

盛昭瀚 张军 杜建国 等著

# 社会科学计算实验 理论与应用



上海三联书店

**图书在版编目(CIP)数据**

社会科学计算实验理论与应用/盛昭瀚等著. —上  
海:上海三联书店,2009. 7

ISBN 978 - 7 - 5426 - 3060 - 5

I. 社… II. 盛… III. 电子计算机—应用—社会科  
学—研究方法 IV. C39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 060329 号

**社会科学计算实验理论与应用**

---

---

**著 者 / 盛昭瀚 张 军 杜建国等**

**特约编辑 / 钱培洲**

**责任编辑 / 冯 征**

**装帧设计 / 范娇青**

**监 制 / 李 敏**

**责任校对 / 张大伟**

**出版发行 / 上海三联书店**

(200031)中国上海市乌鲁木齐南路 396 弄 10 号

<http://www.sanlian.com>

E-mail: shsanlian@yahoo.com.cn

**印 刷 / 上海市印刷七厂有限公司**

**版 次 / 2009 年 7 月第 1 版**

**印 次 / 2009 年 7 月第 1 次印刷**

**开 本 / 787×1092 1/16**

**字 数 / 700 千字**

**印 张 / 39.5**

---

**ISBN 978 - 7 - 5426 - 3060 - 5/C · 313**

**定价: 68.00 元**

# 序 言

## ——大力推动社会科学研究方法论的创新

社会科学是以社会现象及其发展规律为研究对象的科学。自19世纪至今，经无数学者的努力和潜心研究，社会科学不仅形成了门类和领域众多、内容精深的学科体系，而且出现了体系内学科相互融合和交叉的现象，这说明社会现象及其发展规律本身是极其丰富和复杂的。

复杂性思维和对复杂性的探索，不断加深了人们对社会系统自身复杂性的理解和认识。今天，人们已在社会系统具有高度复杂性这一问题上形成共识，并且认为社会系统的复杂性主要源于：

1. 人的行为的复杂性。社会系统的主体是具有高度智能和自适应能力的人，而“适应性造就复杂性（霍兰）”。

2. 社会结构的复杂性。社会结构普遍是有层次的，而系统层次间一般都会呈现复杂的“涌现”现象。

3. 要素间关联的复杂性。社会系统的组成要素，有人、物和信息，彼此之间的关联方式与因果关系导致相互之间的关联作用呈现多种类型的复杂性，如时滞、非对称、不完全、异构及非线性等。

4. 环境的复杂性。社会现象一般都是社会系统的某种宏观行为，而这种行为必然受到系统环境的影响，特别是当环境变化和高度不确定时，系统行为的复杂性会显著增加。

除了上面提到的这些因素之外，人的思维的复杂性也使得主客观之间的关系又增加了一重复杂关系。

事实表明，社会系统及相应的社会科学问题日益凸现的上述复杂性，不断向社会科学研究方法论提出新的挑战，在这种情况下，随着社会现象复杂性的不断增加，相应的揭示、驾驭这一复杂性的社会科学研究方法论也在不断发展，并推动着社会科学的进步。

当然，在社会科学发展历程中，社会科学研究方法论从来就没有停止过探索与升华，从最初的定性分析方法到后来的定量分析方法，人们从对社会系统外在

表现与特征进行描述进步到通过数理方法探索社会现象和规律。方法和工具的变迁推动了人们对社会系统的认识从外在表象向内在本质的跨越。然而,社会系统中涉及大量的自主主体意识或心理活动以及社会现象中那些难以用数学语言描述或虽能描述但无法“求解”的复杂性,又使社会科学研究中的定量分析方法表现出自身的不足。

更进一步,为了更直接地反映和表达社会系统主体(人)的心理和行为。社会科学研究又运用了由人直接参与其中的实验方法,即构造实验环境与条件,在一定源于社会现实的假设之下,让人直接参与关于社会问题研究的实验,由此探讨复杂社会现象的因果关系与一般规律,该方法目前已经取得了较显著的成果,然而,由于社会问题的实验过程不可重复、难以复原或者考虑到成本、道德、伦理及法律等因素,该方法也存在着较大的限制。

另外,当前社会科学研究方法,主要还偏重于还原论,即主要强调对社会现象某个侧面与断面的分解和分析。当然,为了提高社会科学研究能力,人们也注意到不同研究方法的结合,如定性方法和定量方法相结合,定性、定量方法与实验方法相结合等等。但从总体上讲,这些结合对于充分揭示社会系统整体性现象及动态演化的复杂性来说,仍然是不够的。因此,要充分分析和揭示社会系统的系统复杂性,必须考虑系统中众多主体的自主性和异质性;要考虑动态环境对社会系统宏观结构与主体微观行为的影响;要考虑社会系统不同层次之间的相互作用与行为涌现;要考虑社会系统演化的分岔与对路径依赖等等。这样,就要求借鉴、吸收、集成、融合不同学科的理论、工具与技术,特别是综合自然科学、社会科学与人文科学的技术和方法,在已有的研究方法基础上,形成新的方法论。

在这一方面,近年来,特别重要和有意义的是,出现了基于计算技术、复杂系统理论和演化理论的计算实验方法,该方法被认为是和理论研究、实验研究鼎足而立的科学的基本方法。它不但在自然科学与技术的各个领域中得到成功的应用,而且显示出在社会科学各领域中应用的可能性。人们可以通过在计算机上构建现实社会系统的模拟系统,以此来研究社会系统的演化规律、系统与环境的交互机制及系统动力学原理。

社会科学计算实验方法对社会科学研究而言不仅是简单的研究技巧和具体方法的改进,更具有重要的方法论意义,它把现实社会系统转化成由智能主体构成的演化系统,这样,运用计算机虚拟的社会环境,可以用不同的“人工个体”替代现实社会系统中的“人”,并揭示社会系统个体微观行为与系统宏观行为之间的动力学机理,同时,通过利用不同的计算实验方案,可以研究和归纳关于社会系统问题的解决方案的思路。由此可见,社会科学计算实验是在社会科学领域中,以信息技术为平台,把握嵌入信息技术与复杂系统科学内涵的新的科学实验

概念与方法,因此,相当程度上这是社会科学研究方法论的一大创新。从国内外这一领域的发展以及实际应用情况看,计算实验方法已在社会科学诸多领域,包括经济、管理、环境、公共事务甚至人文学科中的历史、考古、语言等领域都有令人耳目一新的研究成果,说明了计算实验方法的有效性。

计算实验方法的产生与发展过程体现了不同思维理念的互动、不同知识体系的融合、不同技术和方法的集成,本身就是一次复杂的知识系统工程,其中有许多值得我们总结和借鉴的经验,例如:在社会科学研究中:

1. 要充分地把还原论和整体论结合起来;
2. 要充分发挥开放式的学科集成平台的作用;
3. 要充分发挥逻辑思维、形象思维的作用并努力将其有机结合起来形成新的创新思维;
4. 要充分做好学科融合的组织与管理工作,认真培育有利于学科交叉与融合的学术生态环境;
5. 要充分注重培养既有创新激情又能坚持不懈的学科交叉型人才。

通过学科交叉与融合产生新的有效的研究方法不是简单的学科叠加,正如钱学森指出的“逻辑思维,微观法;形象思维,宏观法;创新思维,宏观与微观相结合。创造思维才是智慧的源泉,逻辑思维和形象思维都是手段”。社会科学计算实验方法,又一次证明了这一点。

本书为南京大学工程管理学院的学术团队经过较长时间潜心治学、坚持不懈地探索和研究的成果总结,本书之出版,对大力推动计算实验方法在我国社会科学研究领域中的普及与应用具有重要的开拓意义。同时,也再一次引发我们关于大力推动社会科学研究方法论创新的思考,希望有更多的社会科学家,特别是中青年社会科学研究人员以强烈的科学精神和责任感,大力推动社会科学方法论创新,为进一步繁荣我国社会科学研究做出新的贡献。

中国工程院院士

王众托

2009年春

# 前　　言

实践证明,随着社会系统日益复杂,其所反映出来的复杂性是任何单一的研究方法都难以驾驭的。特别是社会系统中的主体——人,作为最复杂的要素,具有很高的智能性,其认知与决策行为本身就是一个通过与其它主体以及环境之间的交互,不断进行演化学习,又通过学习进而改变自身行为的适应性过程。同时人在不同的时间和不同的条件下,其行为可能是不同的,这就使得由其参与的系统具有明显的复杂性。

社会经济系统的复杂性决定了社会系统具有多种演化的可能性。所以霍兰认为是复杂适应系统中主体的适应性造就了复杂性(霍兰,2000)<sup>①</sup>。而正是由于这种主体的适应性,我们难以用传统的还原论的方法来对社会系统进行研究,从而需要新的方法论。能够解决复杂系统的研究方法必须要有如下特点:一、该方法要考虑复杂系统的多自主主体;二、该方法要考虑复杂系统多个层次间相互作用与涌现现象;三、该方法要考虑复杂系统演化的多种可能性;四、该方法要充分考虑动态环境,特别是非连续变化环境对复杂系统宏观结构和微观行为的影响。

针对上述问题,以综合集成方法论为指导的社会科学计算实验方法是综合集成计算技术、复杂系统理论和演化理论等,通过计算机“构造”出现实系统的“替身”,并在此基础上进行社会系统复杂行为分析,探索社会系统演化规律的一种科学研究方法。通过社会科学计算实验方法,我们可以对当前社会科学一些难以研究的问题进行分析实验,进而掌握其本质特征。它不仅为我们提供了研究复杂社会系统自组织、动态演化及宏观与微观层次之间相互作用等问题的新的工具和手段,而且还和传统的社会科学研究方法,即定性与定量方法、传统社会实验等方法,在综合集成思想指导下形成现代社会科学研究方法体系:定性定量、科学实验、虚实结合、综合集成。这一体系不仅不否定对于社会科学研究有重要贡献的各种传统方法,而且在深入发掘它们各自作用的基础上,将它们相互整合、互补优势,形成更为强大的关于社会科学问题的认识、分析与驾驭能力。

---

<sup>①</sup> 霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性.周晓牧等译. 上海:上海科技出版社,2000.

这既是计算实验自身意义的体现,更是在综合集成思想下涌现出来的整体方法体系价值。

作为社会科学计算实验系列丛书的“开路先锋”,本书主要目标就是探索社会科学计算实验的理论基础、研究体系框架和研究范式,给出作者和当前学术界在社会科学计算实验多个领域的大量研究成果,期望通过这些成果,使读者对社会科学计算实验的基本内容、方法和过程有一个较为清晰的了解,为他们进一步研究和应用打下基础。

在这个理念下,本书分为两个部分,第一部分为理论篇,第二部分为应用篇。在理论篇,我们主要从社会系统是一个复杂系统的角度对社会系统进行了剖析,探讨了社会系统复杂性的表现和根源,在此基础上对已有的社会科学研究方法进行了回顾与评述。同时,根据社会科学研究的困难,指出了社会科学计算实验方法可以解决复杂社会经济系统面临的挑战,并对社会科学计算实验的理论基础、研究体系框架、研究范式以及研究技术路线进行了较详实的阐释。在应用篇,我们主要提供了基于计算实验的研究方法在社会科学领域的一些研究案例。首先,围绕着复杂社会系统的典型案例供应链系统的协调与优化的若干问题,我们应用了计算实验方法对之进行了研究,详细地给出了研究问题、研究思路、实现过程以及最终的研究结果。其次,我们列举了作者和国内外社会科学领域的专家们开展的典型研究案例,以期说明计算实验的有效性和广泛的适应性。

具体来说,本书共分为 21 章。第 1 章从复杂系统的角度论述了社会经济系统的复杂性表现及复杂性产生的根源。第 2 章对社会科学的研究方法进行回顾,分析了社会经济系统复杂性对研究方法论带来的挑战,并对应用人工社会方法开展社会科学问题研究进行了阐述。第 3 章根据上两章的研究基础,提出了解决社会科学复杂问题的有效方法——计算实验方法,并详细介绍了计算实验研究的基本概念、模型结构与框架、研究范式、技术路线,并对应用计算实验过程中可能遇到的问题进行了阐述。第 4~7 章分别对供应链系统中的库存控制、价格协调、供应风险、网络设计等协调与优化问题进行了分析研究,详细介绍了研究问题、建模实现过程和实验结果。第 8 章引入计算实验的理论研究框架,利用多主体建模工具 Swarm 来实现对投资者在市场中的学习行为研究,力图发现证券市场中各种宏观现象和规则产生的内在机制。第 9 章利用计算实验方法研究企业的技术创新策略选择,突破了常用的以博弈论为主要工具的定量研究方法和以市场调查与定性描述为主要特征的研究方法。第 10 章基于社会心理学的研究成果,从决定个体心理因素的文化基因微观层次出发,用计算实验方法这一全新视角来研究宏观组织行为演化问题,并对演化计算结果进行分析。第 11 章研究了软件产品的扩散现象,对影响正版软件扩散的因素及盗版软件对正版

软件扩散的影响进行了分析与实验。第 12 章研究了行人疏散问题,首先模拟了室内人员的疏散过程,在此基础上对疏散时间与出口的宽度、人员的初始密度之间的关系进行了模拟实验研究。第 13 章从整个传播系统的角度来考察谣言形成与传播扩散,建立谣言传播的计算实验演化模型以再现谣言传播演化过程,从中分析谣言形成与传播过程中各种因素的影响。第 14—21 章主要介绍当前一些国内外学者对社会科学研究的领域的一些研究成果。第 14 章,构造了基于主体的消费者购买决策模型,以揭示消费者做出购买决策时的内在心理过程,通过在人工市场中创建大量的异质消费者主体模拟了一个市场涌现现象——诱饵效应。第 15 章以跨区域和跨文化的人类—自然耦合系统概念为基础,构建了森林地区人与自然的动力学模型,模拟了人类利益相关者之间的相互作用,并对哪些核心的价值观驱使利益相关者做出土地使用的决策从而使得土地覆盖发生变化以及这些价值观如何影响决策和政策的制定,并使得人类和自然系统能够在同一个地方共存等问题进行了研究。第 16 章构建了一个能描绘大部分农业活动景象的农业社会模型,并采用基于主体的模拟方法得出从正常增长到周期性饥荒导致的周期性衰退的一系列不同结果。第 17 章从社会科学的角度出发,利用元胞自动机与日常交互的社会网络的镜像来模拟新加坡、台北、多伦多 SARS 传播的动态演化过程,并讨论了这些城市每个公众卫生政策的成效。第 18 章设计了一个研究资源、种族和冲突的基于主体的建模架构,并以两个基线模型的运行为例,说明在不同的主体策略下,种族、资源对内战发生的影响,以此来解释内战的原因、潜在机制和演变轨迹。第 19 章使用 NetLogo 工具包构建了基于主体建模的计算模型,通过改变原始种群规模、种群增长速度等参数,估算不同条件下种群的物种多样性度,得出了有意义的结论。第 20 章提出一个基于多主体的计算框架以研究交流和语言的涌现,研究表明,认知主体的语言能力严格地依赖其社交、运动、神经系统和认知能力。第 21 章使用基于主体的计算机建模来创建人工社会,对改变人群环保态度的策略进行了研究,研究发现人与人直接交流的环境保护运动比只使用大众媒体的运动更有优势。

最后我们提出如下的关于社会科学研究方法体系:定性定量、科学实验、虚实结合、综合集成。

本书既介绍了作者研究团队近年来关于社会科学计算实验研究工作的总结,又介绍了这一领域内其他学者的一些典型研究成果。其主要目的是想借此书推动这一对于提高社会科学研究水平和规范性的研究方法在国内的发展,并以此进一步繁荣我国社会科学研究工作。

2009 年 5 月

# 目 录

序言	1
前言	1

## 理 论 篇

<b>第 1 章 社会系统是复杂系统</b>	3
1. 1 系统与系统科学	3
1. 1. 1 系统的基本概念和特性	3
1. 1. 2 系统思想与系统论	8
1. 1. 3 系统科学的形成和发展	10
1. 2 复杂系统与系统复杂性	14
1. 2. 1 复杂系统	14
1. 2. 2 系统的复杂性	18
1. 2. 3 复杂适应系统理论	22
1. 3 社会经济系统的复杂性	25
1. 3. 1 社会与社会经济系统	25
1. 3. 2 社会经济系统的复杂性表现	27
1. 3. 3 社会经济系统复杂性的根源	34
参考文献	41
<b>第 2 章 社会科学的研究方法综述</b>	45
2. 1 社会科学研究方法回顾	45
2. 1. 1 定性方法与评述	46
2. 1. 2 定量方法与评述	51
2. 1. 3 实验研究方法与评述	56
2. 2 社会经济系统复杂性对研究方法论的挑战	61
2. 2. 1 方法论概述	62

2.2.2 系统复杂性需要的方法论	65
2.3 社会科学研究中的人工社会方法	73
2.3.1 人工生命简介	73
2.3.2 人工社会方法与评述	78
参考文献	82
<b>第3章 社会科学研究中的计算实验方法</b>	<b>87</b>
3.1 社会科学研究中的计算实验	87
3.1.1 社会科学研究中的难点	87
3.1.2 计算实验方法概述	90
3.1.3 基于系统科学思想的社会科学计算实验	91
3.1.4 社会系统的可计算性	93
3.2 社会科学计算实验的模型结构与研究框架	96
3.2.1 基于计算技术的人工社会	96
3.2.2 社会系统的两个基本演化机制	97
3.2.3 社会科学计算实验的模型结构	99
3.2.4 社会科学计算实验的研究框架	102
3.2.5 计算实验的作用	105
3.3 社会科学计算实验的研究范式	106
3.3.1 界定研究的问题与环境	106
3.3.2 设定研究的基本假设	109
3.3.3 建立可计算模型	111
3.3.4 实现计算实验	113
3.3.5 实验结果的评估与比较	115
3.4 社会科学计算实验的技术路线	117
3.4.1 社会科学计算实验的程序设计方法	118
3.4.2 基本建模方法	124
3.4.3 常用数理方法简介与应用	129
3.4.4 学习模型	132
3.4.5 进化模型	141
3.4.6 不确定性推理	144
3.5 社会科学计算实验之评述	149
3.5.1 实验管理方法与计算实验方法	149
3.5.2 计算机仿真方法与计算实验方法	151

3.5.3 社会科学计算实验之评述	153
3.6 应用计算实验的常见问题	155
3.6.1 应用计算实验的基础知识	155
3.6.2 信息处理及其可视化	156
3.6.3 定性要素的量化处理	157
参考文献	160

## 应用篇上部

### ——计算实验在供应链协调与优化中的若干问题研究

前言	169
----	-----

#### **第4章 供应链动态库存控制及其计算实现** ..... 172

4.1 基于案例推理的强化学习算法设计及其计算实现	172
4.1.1 简介	172
4.1.2 多代理供应链模型	174
4.1.3 基于案例推理的强化学习(CRL)	177
4.1.4 计算实验结果与分析	180
4.1.5 结论与研究方向	184
4.2 异质供应链( $S, s$ )随机库存控制系统研究	185
4.2.1 引言	185
4.2.2 研究现状	185
4.2.3 模型及其参数设定	186
4.2.4 结果分析	189
4.2.5 结论	192

#### **第5章 基于不确定信息的供应链协调及其计算实现** ..... 194

5.1 引言	194
5.2 相关研究现状	195
5.3 简单的供应链背景:出口羽绒服供应链	196
5.4 代理模型	197
5.4.1 零售商代理	198
5.4.2 生产代理	199
5.4.3 供应商代理	201

5.5 案例研究	201
5.5.1 系统假设	201
5.5.2 企业收入的稳定性分析	204
5.5.3 应用分析	205
5.6 结论分析	206
<b>第6章 基于人工供应链模型的供应风险问题研究</b>	207
6.1 基于计算实验的人工供应链模型构建	207
6.1.1 供应链网络中角色的定义	207
6.1.2 人工供应链模型的构建	209
6.1.3 程序实现和实验环境	215
6.1.4 小结	220
6.2 交货提前期对供应风险的影响分析	221
6.2.1 问题背景	221
6.2.2 建模规则	222
6.2.3 实验分析	226
6.2.4 结论分析	230
6.3 供应风险应对策略及其计算实现	231
6.3.1 引言	231
6.3.2 问题的描述	234
6.3.3 供应链模型构建	234
6.3.4 计算实现过程	239
6.3.5 实验结果与分析	242
6.3.6 小结	254
<b>第7章 基于计算实验的供应链网络设计问题研究</b>	255
7.1 基于计算实验的逆向物流网络优化设计	255
7.1.1 引言	255
7.1.2 逆向物流网络的功能、类型与研究内容	256
7.1.3 逆向物流网络问题描述	259
7.1.4 基本模型构建	260
7.1.5 随机环境下固体废弃物逆向物流网络基础设计	265
7.1.6 随机环境下固体废弃物逆向物流网络进阶设计	269
7.1.7 小结	276

7.2 供应链网络动态演化及其计算实现	277
7.2.1 引言	277
7.2.2 问题的描述	278
7.2.3 模型的构建与计算实现	278
7.2.4 实验结果和分析	288
7.2.5 小结	300
7.3 基于计算实验的供应链网络结构突变管理研究	301
7.3.1 引言	301
7.3.2 问题描述	303
7.3.3 模型构建及结构突变分析	305
7.3.4 小结	314
参考文献	315

## 应用篇下部

——计算实验在社会科学其他领域的应用

<b>第8章 投资者学习、策略调整与市场均衡</b>	327
8.1 问题的描述	328
8.2 人工股市模型结构	328
8.2.1 交易市场环境	329
8.2.2 主体与行为模式	330
8.2.3 价格形成模型	331
8.2.4 红利生成模型	332
8.3 模型实现与结果分析	333
参考文献	335

<b>第9章 企业技术创新策略选择的演化分析</b>	336
9.1 问题描述	336
9.2 计算环境、模型与实现过程	337
9.2.1 基本假设与边界条件	338
9.2.2 演化计算的实现过程	339
9.2.3 计算参数设置	339
9.3 计算实验结果分析	341
9.3.1 依据经典“智猪博弈”模型条件的演化计算结果	341
9.3.2 游戏规则对企业技术创新决策影响的演化分析	343

9.3.3 竞争与合作对企业技术创新决策影响的演化分析	345
9.4 结论	346
参考文献	346
<b>第 10 章 基于文化基因研究组织行为演化问题</b>	347
10.1 问题描述	347
10.2 文化基因与计算实验模型	348
10.3 计算实验环境与实现过程	350
10.3.1 基本假设与边界条件	350
10.3.2 演化计算的实现过程	351
10.3.3 计算参数设置	352
10.4 计算结果分析	355
10.4.1 组织行为问题的演化分析	355
10.4.2 行为多样性的演化结果	357
10.5 结论	359
参考文献	359
<b>第 11 章 软件扩散的元胞自动机模型实验及实现</b>	361
11.1 引言	361
11.2 软件扩散的元胞自动机模型及实现	363
11.3 演化及结果分析	364
11.4 结论	371
参考文献	371
<b>第 12 章 室内人员疏散的元胞自动机模型研究</b>	373
12.1 引言	373
12.2 模型与演化规则	376
12.3 计算机模拟及结果	377
12.4 结论	381
参考文献	382
<b>第 13 章 谣言传播的计算实验建模与实现</b>	384
13.1 概述	384
13.2 谣言传播的计算实验模型设计	386

13. 2. 1 社会网络模型设计	387
13. 2. 2 人个体设计	388
13. 2. 3 谣言的设计	390
13. 2. 4 人际交流行为的情景设计	392
13. 3 实验实现	393
13. 3. 1 实验的实现	393
13. 3. 2 属性及默认值设定	394
13. 4 实验结果分析	395
13. 4. 1 社会网络分析	395
13. 4. 2 邻居人数对实际传播过程的影响	398
13. 4. 3 谣言的敏感性分析	401
13. 5 结论	406
参考文献	407
 <b>第 14 章 基于主体的消费者购买决策及诱饵效应的模拟</b>	409
14. 1 问题的描述	409
14. 2 消费者购买决策的传统理论框架	411
14. 3 基于主体的消费者购买决策模型	412
14. 3. 1 有关行为和决策的心理学理论	412
14. 3. 2 购买动机模型	412
14. 3. 3 购买决策模型	413
14. 3. 4 动机函数	415
14. 3. 5 模型校正	416
14. 4 诱饵效应的多主体模拟	418
14. 4. 1 诱饵效应	418
14. 4. 2 对单个个体的诱饵效应的数学分析	419
14. 4. 3 模拟实验	422
14. 4. 4 实验结果	424
14. 5 结论	426
14. 6 建议和进一步探索	427
参考文献	427
 <b>第 15 章 森林地区人与自然的动力学模型</b>	
——跨地区和跨文化的整合	430
15. 1 背景介绍	431

15.2 研究区域	436
15.2.1 总体特征概况	436
15.2.2 得克萨斯地区:大丛林和绿地廊道	437
15.2.3 委内瑞拉区域:卡帕罗森林保护区和伊马塔加山森林保护区	438
15.3 人类—自然耦合系统的概念整合	440
15.4 建模方法	443
15.4.1 得克萨斯:绿地廊道地区	443
15.4.2 委内瑞拉:卡帕罗森林保护区	448
15.5 模型框架合成	453
15.5.1 模型的独特性和共性	453
15.5.2 功能共性	454
15.6 结论	455
参考文献	457
 第 16 章 一个基于主体的原始农业社会的模拟模型	465
16.1 介绍	465
16.2 生长人工社会	467
16.3 模型概述	468
16.4 空间、时间和界限	468
16.5 环境	470
16.6 商品	471
16.7 主体的属性	472
16.8 生产和消费	474
16.9 市场	476
16.10 人口统计学	478
16.11 学习	479
16.12 模拟	479
16.13 结论:真实的世界和熟悉的模型	483
附录 A	484
附录 B	489
参考文献	490
 第 17 章 模拟非典:基于小世界网络的传染病模型和公共 卫生政策评估	492

17.1 引论	492
17.2 相关的传染病模型	493
17.2.1 SIR 仓室模型	493
17.2.2 元胞自动机模型	494
17.2.3 小世界社会网络模型	496
17.3 构建的模型	496
17.3.1 带镜像的元胞自动机(CAMIM)	496
17.3.2 模拟传染特征	501
17.3.3 公共卫生政策建模	505
17.4 用 CAMIM 模拟 SARS	507
17.4.1 将模拟结果与实际案例相比较	507
17.4.2 公共卫生政策的分析	511
17.5 结论	514
附录 17. A	514
参考文献	519
<b>第 18 章 基于 REsCape 的资源、种族和冲突之间的关系研究</b>	524
18.1 简介	524
18.2 REsCape:一个基于主体的计算架构	527
18.3 示例运行及结果	532
18.3.1 示例 1	532
18.3.2 示例 2	535
18.3.3 结论	537
18.4 附录	539
参考文献	544
<b>第 19 章 始祖效应、漂变和自适应变化对欧洲新石器时代早期种植作物的影响研究</b>	547
19.1 引言	547
19.2 新石器时代早期种植作物的使用	549
19.2.1 原假设:中性漂变	552
19.2.2 对立假设:选择	553
19.3 线纹陶时期(LBK)作物中性漂变模型	555
19.3.1 模拟结果	557

19.3.2 总结	560
19.4 讨论	560
参考文献	561
<b>第 20 章 文化变异及其内部行为表征的影响研究</b>	
——分布式语言的适应性主体建模	566
20.1 问题的描述	566
20.1.1 内部符号定义	567
20.1.2 外部符号定义	568
20.2 分布式语言的基础的自适应主体模型	569
20.2.1 共享的复合式语言的演化涌现	570
20.2.2 模型和模拟设置	570
20.2.3 复合式语言涌现的结果	571
20.2.4 文化变异和语言的 Baldwinian 演化	572
20.2.5 共享的复合式语言的感觉运动基础	574
20.2.6 模型和模拟设置	574
20.2.7 名词和动词演化的结果	576
20.2.8 关于感觉运动和语言表征的分析	577
20.3 结论与分析	579
参考文献	581
<b>第 21 章 改变人群环保态度的策略研究</b>	
——基于主体的环保运动模拟设计	584
21.1 介绍	584
21.2 方法	587
21.3 实验结果	592
21.4 讨论	596
21.5 结论	598
参考文献	599
结束语 社会科学研究方法论体系探索	602
后记	610



# 社会系统是复杂系统

## 1.1 系统与系统科学

### 1.1.1 系统的基本概念和特性

#### 1. 系统的定义

“系统”一词来源于古希腊语，是由部分构成整体的意思。今天，“系统”这个词经常出现在人们的日常交流中，或是在政府的报告中。2008年8月29日，我们在百度中搜索“系统”一词，有94300000项，搜索“系统科学”一词，有644000篇资料。在Google中搜索“系统”一词，出现620000000项，搜索“System Science”，出现1170000000项。这些数据充分说明了系统和系统科学的思想已被人们普遍认识和接受。系统存在于世间万物，是人类迄今为止认识的、重要的概念之一。系统的定义不下几十种，这主要是人们从不同角度去强调系统特征造成的差异。这里分析几种定义，以加深读者对系统定义的认识。

《中国大百科全书》对“系统”给出了这样一个描述性定义：

由相互关联、相互制约、相互作用的一些部分组成的，具有某种功能的整体；

《韦伯斯特大词典》从几个方面对系统作定义，其核心观点是：

由一组有序的、相互作用或相互依存的要素组成的统一体及其运行机制；

L. V. 贝塔朗菲在《一般系统论》一书中把系统定义为：

处于特定相互关系中的诸要素的集合。

由上面的定义可知，系统是一些要素为了某种目的而有机结合的整体。进一步地讲，从系统定义还能延伸出以下的意思：

(1) 系统中一部分要素也可以成为一个系统,一般称为“分系统”,如果这一部分要素能够实现一定的目标,则称其为“子系统”。

(2) 不属于某个系统,但与该系统有着密切联系的那些事物,我们称之为“该系统的环境”。

(3) 一般地,系统与环境之间的联系,常表现为相互之间具有物质、能量与信息的交换,这样的系统称为“开放系统”。开放系统对环境会产生作用,称为“系统的行为”。系统对环境的作用往往是复杂、多样的,如企业这类系统,它既能向社会提供产品,又可能对环境造成污染。故前者表现出的作用是“正向”的,而后者表现出的作用则是“负向”的。

(4) 系统的行为通常是时变的,随时间的变化而变化。

## 2. 系统的结构与功能

系统要素及要素之间的关联方式的总和,称为“系统结构”。如果系统的结构比较“精细”,能使系统产生比较“丰富”的行为,这样的结构称为“有序结构”,这时也称系统是有序的;反之,称为“无序结构”,或系统是无序的。结构的有序与无序或系统的有序性与无序性是相对的,在一定的条件下可以相互转化。系统结构分析的主要内容包括:系统要素间的关联方式、划分子系统、分析各个子系统的结构(包含哪些要素及如何相互关联)、阐明不同子系统之间的关联方式等。结构分析时要特别注意:按照不同标准划分出来的子系统一般没有可比性。

处于特定环境中的系统,外界给予它一组输入,不论这组输入是受控的还是不受控的。一般地,系统能对该输入进行变换和处理,并产生一组返回给环境的输出(吴广谋,2005)。系统内部对输入的处理能力是通过系统要素之间的关联方式与协调、配合行动来实现的,它与系统的结构有密切的关系。在社会经济系统中,输入是对系统作出某种决策而采取的行动,而输出则是系统相应产生的反应与行为。

系统的输入一般可分为两大类:一类是系统直接接受并处理的输入;另一类是影响系统行为的输入。例如:在制造型企业系统中,各生产要素如资金、材料、能源等是由企业直接处理的输入,而市场价格、法律法规等则是影响企业行为,但不被直接加工的输入。通常我们把影响系统行为但不被系统直接处理的输入称之为系统的环境因素,也就是一般把输入区分为直接被系统加工的输入与环境因素。系统的输入、处理、输出,以及与环境因素的关系如图1.1所示。

在一定的环境因素作用下,一组输入通常会产生相应的输出。从这个意义上说,系统的“输入——输出”过程也可视为系统的行为。系统全体行为的集合

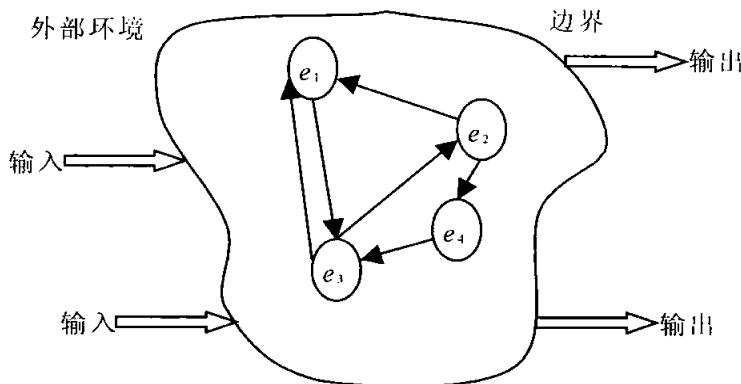


图 1.1 系统的功能

记录了系统与环境、输入与输出的全部关系。系统的功能就是指系统与环境在相互联系与相互作用过程中的能力(吴广谋,2005)。可以看出,系统的功能由系统结构以及环境共同决定。对于大多数系统,人们往往只是认识该系统功能的一部分,而可能忽视或遗漏了其他功能。这是因为人们通常关心系统在特定环境中某些特定的输入类型、某一部分输出的质和量,也就是某一部分的功能。例如:一个制造型企业系统,有制造产品和创造利润的功能,也有产生污染物的功能,但人们往往只注意到前面的功能,而忽视了后面的功能。必须注意的是,即使人们一时无法了解系统的全部功能,也必须关注系统的各种功能,尤其是那些具有副作用的功能。近年来,社会经济领域中出现的一些问题,如重大安全、环境事故等,除了人们的控制能力不足外,在很大程度上还与我们对社会经济系统产生的“负面”功能认识不足有关。

### 3. 系统的特征

#### (1) 整体性

系统虽由若干要素所组成,但它是一个整体。所谓整体,就是说要素在一定的关联下组成了系统,则“系统”就不再是这些要素简单的“和”,这时的“系统”就具有了自己的行为、功能和特点等,而这些都可能是那些要素或部分所不具有的。我们常把系统的这种“整体性”称为“整体大于部分之和”,或  $1+1>2$ (何有世和刘秋生,2003)。系统的整体性告诉我们:系统的局部问题必须放在系统的全局中才能有效解决;系统的全局问题必须放在系统的环境中才能有效解决;局部的目标、关联、功能、质量必须服从整体;系统的行为功能与特性必须通过整体理解,才有可能实现优化。

#### (2) 关联性

关联性不仅存在于系统内部诸要素之间,还存在于系统与外界环境的密切关系中(何有世和刘秋生,2003)。关联性与系统的结构、功能有着密切联系,系

统的整体性正是由各组成部分在结构与功能上的关联性保证的,所以,我们经常以“关联性”来理解“系统性”。关联性常常表现为系统内部各部分的相互联系、相互依存、相互作用和相互配合。

### (3) 动态性

系统的动态性指的是系统行为或状态的变化或要素构成的变化以及它们之间关联的变化等等,体现为系统与系统、系统与环境之间物质、能量、信息的交换和运动。比如,由古至今社会系统的发展演变就是系统动态性的真实写照。再如:企业的生存和发展实际上是一个物流、资金流和信息流动动态演变的过程。

### (4) 有序性

系统要素间的关联与结构体现了系统的组织程度和有序程度。系统的组织程度通常由系统功能上的有序性来维护,而功能上的有序性的保持又要依靠系统与环境之间物质、能量和信息的交换。系统的有序性主要表现在两方面:一是系统各要素间相互作用的层次性,二是各要素间相互作用的方向性(何有世和刘秋生,2003)。例如,企业系统按横向划分,可以分为生产、销售、研发、财务、人事等子系统,按纵向划分,又可分为战略管理、经营管理和作业层次,如图 1.2 所示。一般来说,企业系统下层处理的问题比较简单,但处理量大,上层处理的问题比较复杂,但处理量相对较小。

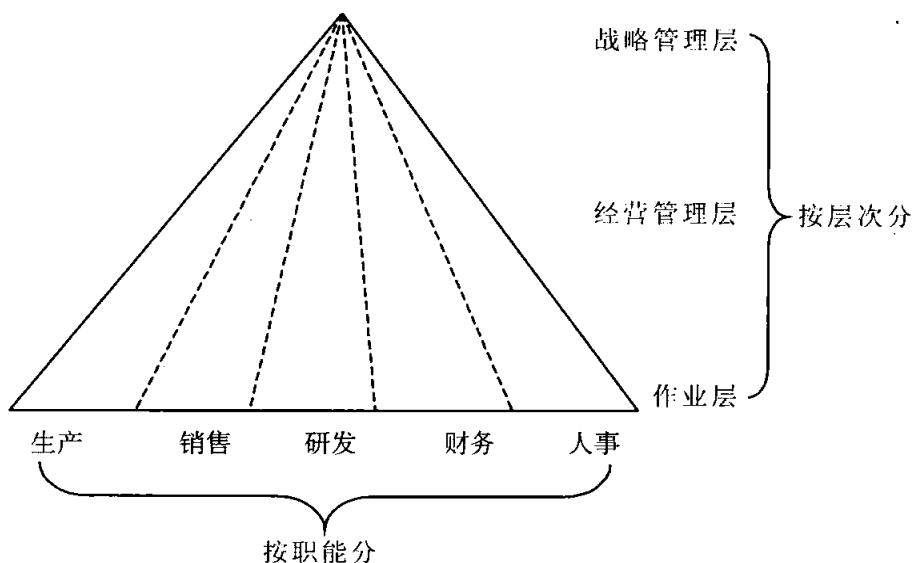


图 1.2 企业系统的管理层次

### (5) 目的性

系统在内外诸因素作用下的动态演变必然具有一定的方向性,而且运动的方向由众多内在因素共同决定,并受环境因素的影响。系统的运动趋势总是指向一个或一些目标,这就是所谓的系统的目的性。比如:高校就是由学生、教师、

管理人员以及教学和科研设备等要素组成的系统,高校存在和发展的主要目的就是为社会经济发展输送大量的、高素质的人才。

#### (6) 适应性

系统与环境的影响是相互的,不仅系统要适应外界环境的变化,而且环境也会适应该系统的变化。比如:企业要根据市场需求(环境)的变化来调整自身的生产经营活动,反过来,企业技术水平的提高、新产品开发,再加上必要的营销宣传,也会引导市场与消费倾向的变更(何有世和刘秋生,2003)。

### 4. 系统的分类

为了揭示系统的特征并深刻认识系统的内涵,人们通常会对系统进行分类。从不同的层面或角度出发,有不同的系统分类方法。

#### (1) 按系统的复合程度由低到高划分

从系统的复合程度考虑,可以把系统分为物理系统(如框架、钟表、控制机械)、生物系统(如细胞系统、植物、动物)和社会系统(如人类、社会、宇宙)(薛华成,1999)。

#### (2) 按人类干预的情况划分为自然系统、人造系统和复合系统(霍绍周,1988)

自然系统是由自然物作为单元组成的系统,其特点是自然形成。原始的系统都是自然系统,如天体、海洋、生态系统等。

人造系统是由人工造成的各种要素组成的系统。人造系统一般可分为三类:一是人们从加工自然物中获得的系统,如工具、仪器、设备以及由它们组成的工程技术系统;二是由一定的组织、制度、程序等组成的管理系统以及政治、经济、军事、文化、教育等组织系统;三是人们对自然现象和社会现象的科学认识所创立的科学体系和技术体系。

复合系统由自然系统与人造系统复合而成。我们研究的系统大多是复合系统,如农民种田,种子和土地是天然系统,耕田用的工具和机器是人造的,还需要有一套管理制度。

#### (3) 按系统和外界的关系分为封闭系统和开放系统

封闭系统指的是外界环境不影响系统主要现象的复现,不管外部环境如何变化,系统始终处于一种内部稳定的均衡状态。完全的封闭式系统比较罕见,通常所说的封闭系统都是相对封闭的系统,即其输入受到控制,与外界无明显联系的系统。如生产集成电路的超净空间、密闭罐中的化学反应等。开放系统是指与环境之间有物质、能量和信息交换的系统。比如:商店就可以看成一个开放系统,它必须从外面进货,并把货物出售给顾客,否则,就不是商店了。企业、学校、地区和国家都是开放系统。

#### (4) 按照系统的抽象程度分类

按抽象程度可把系统分为三类:概念系统、逻辑系统和实在系统(薛华成,1999)。

A. 概念系统是人们根据系统的目标和以往的知识初步构思的系统雏形,它用于表述系统的主要特征、描绘系统的大致轮廓。概念系统从根本上决定了以后的系统形态,如一个新单位的结构设计框图。概念系统一般在各方面还不完善,通常有许多很含糊的地方,甚至有可能不能实现。概念系统是最抽象的系统。

B. 逻辑系统是在概念系统基础上,根据一定的基本原理构造的系统。概念系统需考虑总体的合理性、结构的合理性并有清晰的逻辑关系,如法律系统、语法系统、科学系统等。逻辑系统认为:现在的设备能达到规定的要求,是摆脱了具体实现细节的合理化系统。

C. 实在系统也称为物理系统,它是完全确定的以物质为载体的、完全能实现的系统,如机器的型号、终端的数量、摆放的位置等都完全确定的计算机系统。

#### (5) 系统的全面分类

钱学森等系统科学家认为:系统是一个有着丰富内涵的概念,必须作出全面的分类,才能在系统科学领域找对自己的研究对象和研究方法(黄欣荣,2007)。钱学森(2001)依据系统要素和子系统的数量以及它们的关联关系的复杂程度,对系统作了全面分类,结果如图 1.3 所示。

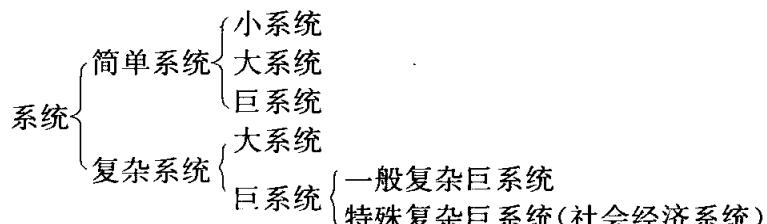


图 1.3 系统的全面分类

### 1.1.2 系统思想与系统论

系统思想首先强调系统的整体性、相关性、目的性、环境适应性等特性。这一思想源远流长,早在远古时代,人们就试图用整体性的眼光看待世界,从事物的相互联系中认识世界,由此产生了古代的系统思想。例如:中国传统文化中的“天人合一”观念、“阴阳五行”的宇宙模式和古希腊的以“水”、“数”、“火”、“原子”作为世界的“始基”来认识世界的整体等等(参见:武秋霞,2004)。由于观测工具和手段的限制,古代先哲通常依靠不充分的直觉观察或经验判断来认识社会现象,往往带有朴素性和自发性的特点。这种系统观,因认识能力和思维水平的限

制,多数只是一种朦胧状态下的猜测,被称为朴素的系统观。

17世纪,牛顿的《论宇宙系统》认为宇宙是相互联系的系统。17至18世纪,莱布尼茨在《单子论》中明确提出:单子是一种组成复合物的单纯实体,宇宙是一个有着完美秩序的统一体系。他还认为:任何事物都存在于系统中,在联系中显现出来;系统联系规定每一事物,而每一事物又能反映系统和联系的总貌。莱布尼茨的许多论点与现代系统论非常接近,影响着现代控制论和系统论的创立。

18世纪,德国大哲学家康德经推测后认为:整个宇宙具有不同的层次。特别是,他对知识有着独特的理解,他认为知识是相互关联、相互联系的要素构成的整体,第一次提出了人类知识的系统性问题。

19世纪的辩证法大师黑格尔第一次把自然的、历史的和精神的世界描写成一个统一过程,他认为:必须把真理和科学作为有机的整体加以研究,真理只有作为系统才是现实的。用系统方法构造出的完整哲学体系是黑格尔系统思想的突出表现。恩格斯对黑格尔的这种思想给予了很高的评价:它体现了“世界不是一成不变的事物的集合体,而是过程的集合体”这一伟大的基本思想。马克思和恩格斯批判地继承了康德、黑格尔等人的辩证法和系统思想,并形成了自己的系统观。他们把社会作为一个有机整体来看待,同时,把社会形态的演化发展当作一个有机体的进化过程来研究。恩格斯在《自然辩证法》中指出:“宇宙是一个体系,是各种物体相互联系的总体。”恩格斯还在他的著作里完整地表达了关于物质世界的层次思想、物质世界的层次结构与一定的运动形式的内在联系等。《资本论》、《反杜林论》等许多著作,都包含了马克思和恩格斯的丰富的系统思想和方法。

科学的系统思想在19世纪逐渐形成。其中最具有代表性的是美籍奥地利人、理论生物学家L.V.贝塔朗菲(L. Von. Bertalanffy)的系统思想。1968年,贝塔朗菲发表了专著《一般系统论:基础、发展和应用》(General System Theory: Foundations, Development, Applications),该书被公认为是这门学科的代表作(贝塔朗菲,1987)。贝塔朗菲强调:应当把有机体当作一个整体、一个在时空上有限的、具有复杂结构的自然整体来考虑。

系统论是研究系统的一般模式、结构和规律的学问,它研究各种系统的共同特征,用包括数学方法在内的各种方法定量地描述其功能,寻求并确立适用于一切系统的原理、原则和数学模型,是具有逻辑和数学性质的一门科学(陈元生,2007)。

系统论的核心思想是系统的整体观念,系统论研究客观事物的整体性、关联性、等级结构性、动态平衡性、时序性等所有系统共同的基本特征。贝塔朗菲强调:任何系统都是一个有机的整体,系统的整体功能不是各个部分的机械组合或简单相加,是各要素在孤立状态下所没有的性质,即整体大于部分之和(胡天佑

和张扬,2008)。他认为:并不是要素性能好,整体性能就一定是好的;系统中要素并不是孤立存在的,每个要素都处于一定的位置上,起着特定的作用;要素之间相互关联,构成了一个不可分割的整体,并反对以局部说明整体的机械论和还原论的观点。如果将要素从系统整体中割离出来,它将失去原有的功能。例如,人手在人体中它是劳动的器官,具有丰富的功能和重要的作用,但是一旦脱离了人体,它将失去原有的功能,不再是劳动的器官了(方美琪和张树人,2005)。

系统论研究的基本思想方法就是:把所研究和处理的对象当作一个整体,分析其结构和功能,研究整体、组成要素和依存环境三者之间的相互关系和变动的规律性,并协调其要素行为,优化系统的结构。系统论的任务在于认识系统的特点和规律,并利用这些特点和规律去控制、管理、改造或创造系统,使它的存在与发展更为和谐。也就是说,研究系统的目的在于调整系统结构、协调要素关系和优化系统目标(侯光明等,2006)。

系统论的出现,使人类的思维方式发生了深刻的变化。经典的机械论、还原论方法研究问题,主要是分析方法,包括实验、解剖和观察,把整体事物分成若干部分,分门别类地进行细化研究。一般是把事物细分,抽象出最简单的因素后,再以部分的性质去说明事物(方美琪和张树人,2005)。这种方法由于忽略了事物之间的联系和相互作用,“堵塞了从了解部分到了解整体,到洞察普遍联系的道路”,不适合研究复杂问题,特别是复杂的社会经济问题。系统论符合现代科学发展的趋势和现代社会大生产的特点、体现了现代社会生活的复杂性,其理论和方法越来越受到重视并得到广泛应用。系统论为现代科学的发展提供了理论和方法,是解决社会经济系统中复杂问题的方法论基础(侯光明等,2006)。

### 1.1.3 系统科学的形成和发展

系统科学是由以系统为研究对象的基础理论和应用技术的学科组成的学科群。它重点研究各类系统的结构、性质、功能和演化的共性规律,探讨与系统有关的各种理论和方法。系统科学经过半个多世纪的发展,对社会生活各个领域与科学技术的发展产生了重大影响。贝塔朗菲、哈肯、维纳、普利高津、香农、钱学森等杰出的科学家都是系统科学的先驱和主要代表人物,他们叙述的复杂性研究的来龙去脉代表了系统科学发展的基本历程。

系统科学是一种注重思维方法的学科,它不断地探索,并在探索中发展。20世纪中叶以后,出现了一大批隶属于系统科学的科学理论(关于这些理论的形成和发展可参见:周树杰,2006),如图 1.4 所示。

一般系统论的概念最初由贝塔朗菲在芝加哥大学哲学研究班上提出,经过

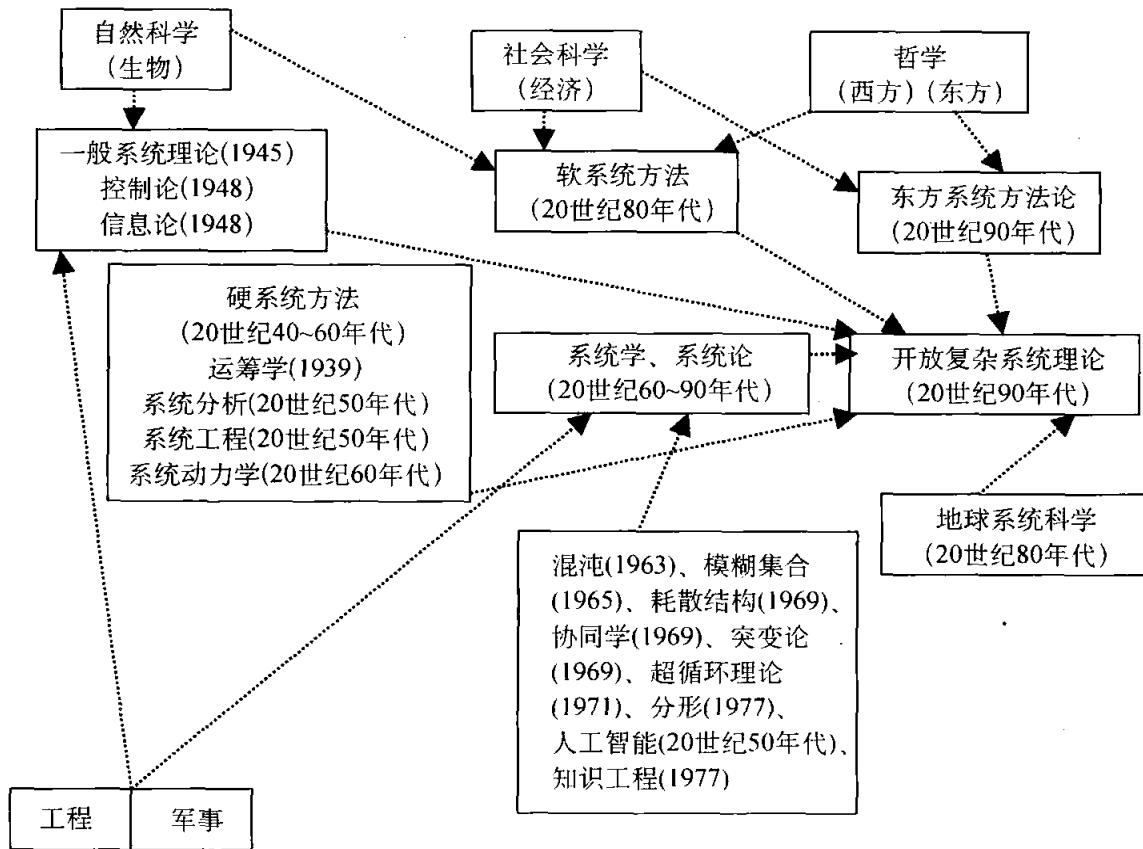


图 1.4 系统科学运动图

资料来源：许国志等，《系统科学与工种研究》，上海科技教育出版社，2002。

总结、完善，于1945年发表了《关于普通系统论》，该文的发表标志着一般系统论作为一门崭新的学科的诞生。贝塔朗菲在后期的研究中，完善了一般系统论的概念、原理、范式、原则和体系等。1972年，贝塔朗菲发表了最后一部著作《一般系统论的历史和现状》，指出一般系统论包括系统的科学和数学系统论、系统技术以及系统哲学三个内容。其中，系统技术主要研究系统思想、系统方法在现代科学技术和社会等系统中的应用。系统哲学主要研究系统论的科学或哲学方面的性质，使系统论取得哲学方法的地位。

1946年，美国的莫尔斯(Morse)和金博尔(Kimball)对二战期间的实践经验和研究成果进行了总结，并于1950年公开发表《运筹学方法》，标志着运筹学的诞生。美国的香农分别于1948年和1949年发表了《通讯的数学理论》、《噪声中的通信》，奠定了现代信息系统的理论基础，标志着与系统论紧密相联的信息论的诞生。数学家维纳于1948年发表了《控制论》，1949年，发表了《平稳时间序列的外推、内插和平滑化》，由此创立了控制论。

以钱学森为代表的科学家在国内研究和普及系统科学及其哲学投入了毕生

精力,做出了巨大贡献。1954年,他运用控制系统理论和方法首创了工程控制论,并推广应用于工程技术领域。1981年,钱学森发表了《再谈系统科学体系》,进一步发展了系统科学。他把系统科学体系作了新的归纳,认为系统科学体系包括哲学、基础科学、技术科学和工程技术四个层次的内容。

1963年,美国气象学家洛伦兹的《确定论的非周期流》一文揭示了确定性非线性方程在一定条件下会出现混沌现象,标志着非线性科学的产生。1965年,美国的计算机与控制论专家扎德发表了《模糊集合》一文,提出了用模糊集合作为表现模糊事物的数学模型,创立了研究模糊性或不确定性问题的理论方法。

法国的勒内·托姆于1967年发表《形态发生动力学》一文,阐述了突变论的基本思想;1969年,发表《生物学中的拓扑模型》,奠定了突变论的基础;1972年,出版了《结构稳定性与形态发生学》,创立了突变论。突变论主要研究系统生成演化中的突变现象,它进一步丰富了系统科学的研究内容。

1969年,比利时物理学家普利高津发表了《结构耗散和生命》,正式提出了耗散结构理论。1974年,他又发表了《时间·不可逆性和结构》,进一步发展了耗散结构理论。耗散结构理论主要研究结构产生、形成、稳定和演变的规律,探讨系统如何形成新的有序状态。

1969年,德国物理学家哈肯首次提出协同学这一名称,后与格雷厄姆合作撰文介绍了协同学。1972年,在德国埃尔姆召开第一届国际协同学会议,并以《协同学》为题出版论文集,标志着协同学诞生。协同学的研究对象为由完全不同性质的大量子系统所构成的各种系统,协同学的任务是研究这些子系统之间如何协同工作而使系统产生有序的演化。

1971年,德国艾根创立了超循环理论,该理论认为:在生命起源和发展演化过程中,会经历这样一个自组织阶段——通过超循环式的组织形成具有统一遗传特征的细胞结构。超循环指的是把自催化循环联系起来的循环,循环系列中的每个元素既能自我复制,又能催化下一个元素的产生。

1977年,曼德勃罗(Mandelbrot)出版了专著《分形、机遇和维数》,标志着分形理论的诞生。

通常认为,系统科学从系统的角度、采用系统的方法来考察认识事物,具有横断学科性质,它主要由一般系统论、信息论、控制论、运筹学和系统工程、耗散结构理论、超循环理论和突变论、混沌理论和分形理论等学科群构成。从上面列举的一些典型代表人物和事件可以看出,系统科学形成于20世纪70年代。

20世纪80年代以来,系统科学广泛应用于经济、政治、军事等研究,在社会诸多领域的研究中发挥了重要作用,受到普遍重视,并取得了许多令人瞩目的成就。李曙华(2002)认为:系统科学超越了西方近代科学传统,并试图从世界观、

方法论的深层次上,将以往相互隔裂的自然科学、社会科学、技术科学与艺术科学内在统一起来,开辟了人类理性的新天地。

钱学森从1986年开始探索社会系统、地理系统、人体系统和军事系统,并于1986年直接组织了“系统科学讨论班”,提出了开放的、复杂巨系统的概念。钱学森等(1990)在《自然》杂志上发表了一篇题为《一个科学的新领域:开放复杂的巨系统及其方法论》的文章,正式提出了开放的复杂巨系统的概念以及处理这类系统的综合集成方法论。1992年,他提出“人机结合”、“以人为主”,诞生了“从定性到定量综合集成研讨厅”的学术思想,把系统科学之研究推向了新阶段。

最早公开将混沌理论用于经济学研究的是美国经济学家司徒泽(Stutzer, 1980),他将 Li-York 定理和分岔理论应用于哈维尔摩(Hawelmo)增长模型离散动力系统,得出了当自发增长率在( $\alpha_c$ , 5.75](其中  $\alpha_c < 5.54$ )取值时,系统出现混沌态的结论。我国学者沈华嵩和傅琳等(1991)首次把混沌经济学应用于我国消费函数分析。此后,我国许多学者从不同角度对经济混沌进行了研究。近年来,经济混沌的研究大致从两个方面展开,一些专家和学者继续在经济数据中寻找混沌存在的证据。另一些专家和学者从寻找经济系统复杂性的成因入手,这包括两种情况:一是通过局部稳定性分析得到系统进入混沌等复杂状态的参数条件,即主要是研究系统纳什平衡点局部失稳(分岔)所导致的复杂性;二是国内外一些学者在经济系统的全局复杂性方面进行了研究,如可行域的边界变成分形结构、可行域在单连通与复连通区域之间转换、某些点出发的轨道经过有限次的迭代以后就失去经济意义等(杜建国,2005)。

Ott 等人(1990)开创了著名的 OGY 控制方法,Pecora 等人(1990)提出:把响应系统与驱动系统用驱动系统中的驱动信号耦合起来达到混沌同步的思想,Ditto 等人(1990)完成了控制混沌的实验。1996 年,Holyst 等学者发表了题为“如何控制混沌经济”的文章,他们首次运用 OGY 方法对一个两企业竞争混沌模型实施了稳定控制,解释了模型控制的含义。此后,许多学者把自然科学和工程中的混沌控制方法应用于经济系统中的混沌控制。

Kopel(1997)采用混沌打靶控制方法成功地控制了独家企业产量调整模型的混沌态。Leo Kass(1998)研究了一个宏观混沌经济模型的控制问题,他将混沌打靶控制方法与 OGY 方法结合起来,对模型的均衡点实施了稳定控制,并得到“企业或政府很难通过有限的市场信号来实施稳定政策”的结论。Ahmed 等人(1999)用带约束的 OGY 方法研究了对通货膨胀—失业模型的混沌控制问题,Agiza 等人(2002)研究了 Kepol 企业产出模型的各类不动点的稳定性,并用 OGY 方法成功地控制了该模型的混沌态。20 世纪末期,国内的学者也开始关注经济混沌控制。叶振飞等(2002)分析了金融危机的内在机理以及通过周期微

扰和 OGY 方法来控制混沌的控制战略。蒋伟进(2002)和陈国华等(2003)讨论了库存管理混沌系统的混沌控制及同步控制。姚洪兴和盛昭瀚(2002)对 OGY 方法进行改进,提出了一种基于预测的反馈控制方法,并分别以失业通货膨胀混沌模型和财产管理混沌模型对该控制方法进行了验证。吕彤和韩文秀(2002)以天津市为例,对区域“经济—资源—环境”复合系统的系统协调及混沌控制进行了研究。盛昭瀚等(2003)开展了一些混沌动力系统的重构、预测与控制以及在经济管理领域的应用工作。杜建国等(2004, 2005)从事了一些混沌控制在经济系统中的应用工作。

1999 年,迪伊·哈克出版了《浑序时代的诞生》,提出了一种新思想——“浑序组织”。他认为浑序是混沌边缘的有序状态,研究创立了浑序组织管理新模式。

2002 年,林夏水发表《非线性科学与决定论自然观的变革》一文,阐述了建立确定性混沌自然观。同年,李曙华出版了《从系统论到混沌学》,进一步阐释了混沌学的定义和内涵,丰富和发展了混沌理论。

非线性问题的研究和发现使得研究者深刻认识到:现实世界本质上是非线性的,不能按照传统的线性思维来思考和解决非线性问题。世界及其变化是纷繁复杂的,传统的还原论的研究思想和方法在研究问题时,常常丢掉一些最本质的东西,使得我们不能系统地认识世界。系统复杂性的研究正在力图给人们提供一种处理复杂系统问题的思考方法。

## 1.2 复杂系统与系统复杂性

### 1.2.1 复杂系统

#### 1. 复杂系统的定义

什么是复杂系统?首先,让我们一起来思考这些问题:生命是如何起源的?飞鸟是如何聚集成群的?蚂蚁如何形成王国?为什么冷战结束,世界反而硝烟四起?为什么苏联以及东欧等一系列社会主义国家会在 1989 年的几个月内解体?为什么在 1998 年爆发亚洲经济风暴,进而经济危机席卷全球?美国为什么会发生次贷危机以及次贷危机与全球股市进入熊市有何关系?人的感情、思想、目的和意识是如何产生的?难道大脑仅仅是简单的随机进化的结果吗?这些问题看似毫无关联,然而,它们都有一个共同点,就是属于同一种系统,即复杂系统(周成虎等,2000)。

复杂系统是相对简单系统而言的,两者具有根本性的区别。简单系统通常由相互作用比较弱的少量要素或具有大量相近行为的个体组成,以至于人们能够应用简单的统计平均的方法来研究它们的行为,如封闭的气体或遥远的星系。复杂系统虽具有一定的规模,但并不是越大越复杂,复杂与系统的规模之间并不具有正比关系。此外,复杂系统中的个体通常具有一定的智能性,如社会网络关系中的人、股市中的股民、生态系统中的动植物等。这些个体都可以根据内外环境、通过一定的规则进行智能的判断或决策(刘恩东,2005)。

根据以上归纳,可以看出:有一类系统,它们除了具有众多的组成要素(子系统)外,这些要素(子系统)还能通过局部信息做出智能性行动,并彼此产生复杂的关联,从而使系统在整体上表现出的行为与特征不能用它的部分(子系统)的行为与特征来解释,我们常认为,这样的系统是“复杂的”。简言之,所谓复杂系统是由众多要素(子系统)组成的、整体行为与特征不能由其要素(子系统)的行为和特征来解释的系统。

## 2. 复杂系统的特征

根据复杂系统的描述性定义,可以总结出复杂系统的以下特点:

(1) 具有众多的异质性主体。简单系统组成要素数目一般较少或由较多的同质性要素组成。对于简单系统来说,可以用牛顿力学范式分析方法或用统计分析方法很好地解释其行为,例如,热力学研究的对象一般就是这样的系统。而复杂系统的组成要素数目一般众多,且存在较多的异质性要素,其间有强烈的耦合作用。用传统分析方法难以有效地解释这类系统的行为,通常复杂性研究感兴趣的正是这类系统。

(2) 智能性和自适应性。复杂系统内的要素或主体具有一定度的智能,其行为遵循一定的规则,能够根据“环境”接收信息调整自身的状态和行为,并且主体通常有能力根据各种信息调整规则以适应环境的变化,产生以前从未有过的新规则。通过系统主体的相对低等的智能行为,系统在整体上显现出更高层次、更加复杂、更加协调的有序性(谢惠明,1992;苗冬升,1998)。

(3) 局部性。在复杂系统中,由于信息不完全、主体的有限理性等原因,主体不可能知道其他所有主体的状态和行为,每个主体只可能从个体集合的一个相对较小的子集中获取信息,处理“局部信息”,作出相应的决策(谢惠明,1992;苗冬升,1998)。也就是说,主体的感知能力和行为策略的影响是有限的,只能针对有限的局部环境。系统的整体行为是通过局部个体之间的相互竞争、协作等交互作用而涌现出来的。

(4) 突现性。在复杂系统演化的过程中,当超越某一个条件“阈值”时,系统将出现新的性质,这种新的性质是原来的系统组成要素所不具备的。比如,生命

的起源就是突现性的典型现象。

(5) 不稳定性。因为复杂系统的局部结构通常是不稳定的、具有多个分岔点,因此,复杂系统在内外机制的作用下,其演化方向一般具有多种可能性,同时,存在对初始条件的敏感依赖性。

(6) 非线性。复杂系统都具有非线性的结构,即系统的组成要素之间、子系统之间、不同层次之间以及系统与环境之间均普遍存在非线性的交互作用。

(7) 不确定性。在复杂系统中,不同质的微观要素在变化的环境中,由于随机因素,各自独立的行为决策和适应性调整及其在非线性结构中的相互作用,可以导致系统演化在宏观上的不确定性。另外,外界环境的作用也会使要素主体的行为出现不确定性,自适应主体的智能程度越高,其行为的不确定性越大。

(8) 不可精确预测性。复杂系统的不可精确预测性表现在:

A. 由于复杂系统涉及的众多不同质的组成要素之间存在相互作用,难以在实际上做到准确预测。

B. 复杂系统在受到外界环境影响时,系统或其组分会相应改变原来的运动状态。由于环境因素难以精确或无法预测,而导致复杂系统的性质难以精确或无法预测。

C. 在复杂系统中,组分之间相互关联形成非线性的结构。当我们采用还原论方法分析某个组分时,由于割断了系统组分之间的联系,从而影响了系统整体预测的准确性。

D. 复杂系统的演化通常存在多态均衡,而非平衡、非线性会导致系统演化具有多种可能性,这使得对复杂系统的预测变得非常困难。

但是,值得注意的是:难以预测并不是不可预测。有时,对复杂系统预测能达到令人叹服的准确程度,比如:在生物进化研究史上,Hamilton(1967)、Werren(1980)和Herre(1985)对“局部交配竞争”的情况下雌雄比例的预测,Alexander(1991)对真社会性哺乳动物的预测等。

### 3. 复杂系统的研究方法

面对具有如此特点的复杂系统,人们是如何进行分析和研究的呢?通常人们采用如下的三种方法:

#### (1) 自下而上的“涌现”方法。

这是目前圣塔菲(Santa Fe)研究所研究复杂系统的主要方法。这种方法利用计算机多主体(Agent)建模技术来模拟复杂系统中个体的行为,让一群主体在计算机所构造的虚拟环境下进行交互作用并演化,让整体系统的复杂性行为自下而上地“涌现”出来。例如:“人工社会”方法就是属于这类方法。人工社会是在计算机上构造的、具有人类社会特性和功能的人工系统,人工社会方法就是

抽取人类社会的基本运行机制来模拟人类社会系统的动态发展过程。人工社会的主要思路是在计算机中模拟人类社会中具有一定适应、学习能力,能独立决策的人(在计算机中统称为智能 Agent),让智能主体在计算机中按照一定的规则相互作用,研究智能主体总体所体现出来的行为特征。圣塔菲研究所的研究者用人工社会方法来模拟现实股市、企业竞争中合作的形成等问题,得出丰富而有意义的结果。

自下而上的“涌现”方法可分析复杂系统中非线性的动态交互,这是传统方法非常困难甚至分析不了的。但是,目前,这种方法还有待上升到方法论层次。如何证明结果的有效性、可靠性以及交互的结构、规则和方法与现实系统的一致性也是亟待解决的问题。

### (2) 自上而下的“控制”方法。

这是一种人脑处理复杂问题的方法,人脑面对复杂系统,可以通过一些不确定信息和判断,作出宏观上大致合理的决策,通过反馈和调整,最终得到满意的结果。

我们以经济系统为例来说明这种方法。首先确定几个宏观经济系统的指标量,比如人均 GDP、就业率、人均收入等。其次,根据这些经济指标累计学习系统运作的规律、构建描述经济系统运作的规则。在此基础上,以这些经济系统规则对经济系统进行控制和协调。政府可通过政策来改变经济系统中每个个体的决策环境和制度环境,进而影响个体的行为,从而改善整个宏观经济系统的运行状况。

### (3) 隐喻的方法。

隐喻(Metaphor)方法是一种研究整体的方法,实际上是利用类似于文学中的暗喻手法,对复杂系统各个方面进行描述和模拟。隐喻把源事物和目标事物置于一个包含内在关联的框架中,并引起这些关联构架的重组,扩大了源事物与目标事物之间的相互作用,将产生不同的、有趣的、感觉很畅快的关联和相互解释(霍兰,2001)。

当用精确语言难于表述复杂事物时,人们主要通过比喻、类比等方式来表述形成隐喻型复杂性概念。复杂性科学以复杂系统为研究对象,在其形成和发展中广泛地采用了隐喻方法,如蝴蝶效应、奇怪吸引子、分形、自相似、混沌边缘、涌现、自组织临界性、路径依赖、报酬递增、模拟退火、复杂适应系统、人工生命等概念都是隐喻型复杂性概念。对社会经济系统这一复杂巨系统的研究,采用隐喻的概念有利于表达其中难以言说的复杂现象,让我们看到新的联系。比如:通过隐喻方法用沙堆的演变来说明市场的剧变(黄欣荣,2007)。

但是,需要注意的是:采用隐喻方法来研究复杂系统,研究结果受所采用的

目标事物的多样性和联系的多样性的影响。目标事物选择的恰当与否和联系类比的恰当与否直接影响研究结果的科学性。

## 1.2.2 系统的复杂性

### 1. 复杂性的界定

近年来,复杂性成为了科学的研究的对象,“复杂性”一词从日常语言中的形容词“复杂”逐渐演化成了一个学科名词。复杂性科学的研究的领域非常广泛,几乎当代每个学科领域都有自己的复杂性研究,每个研究者对复杂性都有自己的见解(参见:黄欣荣,2007)。约翰·霍根(1997)在《科学的终结》一书中指出:仅物理学家 Seth Lloyd 向他提供的一份关于复杂性定义的清单,就有 45 种之多。从科学的角度讲,复杂性究竟是什么?这是需要首先回答的问题。

对复杂性的理解通常可从认识论和本体论的层次上界定。认识论认为:简单与复杂是相对的,一个事物在未被认识前是复杂的,认识后,就变得简单了。本体论层次上的复杂性指事物的组成杂而多、事物自身特有的规定性。实际上,复杂性处于主体与客体相互作用的界面上,它既有主体性又有客体性。复杂性的客体性来自描述对象的客观性,要求其指称和内涵必须明确。复杂性的主体性来自认识主体的主观性,体现为它的相对性和它对认识主体的作用。但作为科学概念,复杂性的指称对象应该明确(张本祥,2002)。不能把复杂性都归结为人们认识的原因,必须承认客观复杂性、必须找出简单性和复杂性之间的根本性区别,以达到明确复杂性科学的研究领域的目的。

#### (1) 国外学者对复杂性的界定概述

Warren Weaver(1948)在《科学与复杂性》一文中提出了复杂性和复杂性科学的概念,但没有给出复杂性的定义。普利高津虽然较早著有《探索复杂性》,但他所说的复杂性主要指自组织,全书所研究的也都是自组织现象。20世纪 60 年代,随着计算数学的发展,出现了对算法进行评价的计算复杂性分支。计算复杂性是指为解决一个问题、按照一定规则进行符号变换所耗费的时间和需要的计算机存储量。目前,由于计算机存储技术的发展,计算所需要的存储空间一般都能满足,计算复杂性主要指时间上的计算复杂性。

Kolmogorov、Chaitin 和 Solomonoff 于 20 世纪 60 年代中期分别提出了描述复杂性,也称算法复杂性。算法复杂性等同于在给定粒度下,存在一种通用方法描述一个数据集规律的代码的最短长度。盖尔曼(1997)认为:描述复杂性依赖于描述语言和背景知识等,具有一定的主观性。他在《夸克与美洲豹》一书中提出了原始复杂性的概念,并把原始复杂性定义为:用双方事先共享的语言、知识等,将一个已知粗粒化程度的对象描述传给远处某人时,所用最短信息的长度

(盖尔曼,1997)。

20世纪50年代,Chomsky和Lindemayer分别通过对串行研究语言和并行生成语法的分类,用语法复杂性来描述形式语言的复杂性。卡拉默(2000)在《混沌与秩序》一书中用系统可能状态的数目来定义复杂性。他还以算法为基础,定义了亚临界复杂性、临界复杂性和根本复杂性。临界复杂性是指复杂性的特定阶段,在临界值上涌现的某些结构。他认为:只要系统有着混沌或不确定性,就是根本复杂的。

盖尔曼(1997)提出用系统或数串的有效规律性的简要描述长度来表示复杂性,即有效复杂性。有效复杂性处在完全有序和完全无序之间的中间地带。“混沌之父”洛伦兹在《混沌的本质》一书中指出:复杂性指的是初始条件的敏感依赖性,并把复杂性等同于空间上的不规则性。西蒙通过复杂系统的层次结构提出了分层复杂性的概念。Langton(1992)则把复杂性理解为混沌的边缘。

巴克(2001)把复杂性理解为自组织临界性,主要指当一类开放的、远离平衡态的、由多个单元组成的系统能够通过一个自组织过程演化到一个临界态,处于临界态的一个微小扰动可能会通过类似“多米诺”的机制被放大,甚至延伸到整个系统,形成一个大的“雪崩”。霍兰把复杂性看作是一种“隐秩序”以及系统的“涌现性”,并认为复杂适应系统中主体的适应性造就了复杂性(霍兰,2001)。

## (2) 国内部分学者对复杂性的界定

在国内,对复杂性理解也呈现出一种多样性。钱学森从方法论上认识复杂性。他认为:凡是现在不能或不宜用还原论方法处理的问题,而要用或宜用新的方法处理的问题,都具有复杂性。钱学森(2001)在系统再分类的基础上,对复杂性进行了创新性界定。他认为:复杂性可概括为:各子系统间存在各种方式的通讯;子系统种类多且各有其定性模型;各子系统中的知识表达及获取方式不同;系统及子系统的结构随着系统的演变而不断改变。钱学森认为:复杂性实际上是开放的复杂巨系统的动力学,是开放的复杂巨系统的特征。

颜泽贤等(1993)在《复杂系统演化论》一书中对复杂性定义如下:复杂性是客观事物的一种属性;复杂性是客观事物层次之间的一种跨越;复杂性是客观事物跨越层次的不能仅用还原论处理的相互作用。苗东升(2003)从分形的角度解读了“复杂”这一词汇。“复”的含义指系统包含很多的层次,不同层次都显现出相同的精细的结构,部分和整体之间具有结构上的相似性;“杂”的含义是指多样、破碎、纷乱,形成某种不规则的、无序的结构。吴彤(2001)提出了客观复杂性的概念,他认为:客观复杂性包括结构复杂性、边界复杂性和运动复杂性。其中,结构复杂性又可分为分形复杂性和非稳定结构复杂性;运动复杂性可再分为分

岔运动复杂性、突变运动复杂性和混沌运动复杂性。

### (3) 复杂性的定义

虽然复杂性的概念有很多且尚未达成共识,但是,我们仍需给定一个定义,以便讨论复杂性的概念及复杂性的基本问题,进而研究和解决复杂性问题。这里,我们以张本祥(2002)给出的一个定义进行概括:

复杂性是一种“性状”的描述,存在多个有意义、不确定、非周期的可区分状态,或者以多个有意义的可区分状态以不确定、非周期的方式存在。其中,“有意义”是指对象状态必须是由对认识主体而言的所谓“物理变量”表征的,而且状态的区分是必要的。

该定义具有一定的普遍适应性。例如:实际意义上的混沌,一般都具有初始条件敏感依赖性所导致的多值不确定性、轨道的非周期性;分形体在同一标度下是非周期的,且标度分布性质具有非确定性;复杂适应系统中的随机性、突现都意味着不确定性和演化历程的非周期性。自组织临界态中“雪崩”的规模从小到大可跨越多个标度区间,“雪崩”的特定时间与特定规模之间是相互不确定的,而且其时空分布都是非周期的(张本祥,2002)。

## 2. 复杂性的分类

Rescher(1998)对复杂性作了系统分类,他按认识论和本体论模式来划分复杂性。按认识论模式,复杂性可以划分为:

(1) 描述复杂性。指对所研究的系统进行充分描述所需要的描述长度。

(2) 生成复杂性。指提供一个描述程序生成所研究的系统所必需的指令集的长度。

(3) 计算复杂性。指解决一个问题所花费的时间和精力的数量。

按本体论模式,复杂性可以划分为如下六种:

(1) 构成复杂性。指系统构成要素或成分的数目。

(2) 分类复杂性。指系统构成要素的种类。

(3) 组织复杂性。指不同的关联模式下,把系统中要素组织起来的不同方式的种类。

(4) 层级复杂性。指包含或包容关系中从属关系的复杂性。

(5) 运筹复杂性。指运筹模式的种类或功能的类型。

(6) 规则复杂性。指统摄现象之规律的精细性和错杂性。

其中,前两种构成组分复杂性,由组成成分的规模、彼此的差异与多样性产生;接下来的两种构成结构复杂性,用于描述组分组织方式产生的层级与关系的复杂性;最后两种构成功能复杂性,主要指相互作用的复杂性。尽管各种形式的复杂性在理论上可以区分,但在实践中,它们往往相互交织在一起。

吴彤(2001)从科学哲学的角度对复杂性作过如下比较详细的分类：

(1) 结构复杂性。指系统内部要素之间通过相互作用构成的排列组合的复杂性。结构复杂性又可进一步细分为：

A. 分形结构复杂性。指系统内部结构具有多层次、多部分，且各个部分相互联结、嵌套和递归。

B. 非稳定结构复杂性。指局部非稳定的结构具有多个分岔点、鞍点。结构整体和局部稳定的为简单结构。对完全不稳定结构，由于它存在的时间极短，目前还不能分析。

(2) 运动复杂性。指复杂系统在运动过程中所表现出来的复杂性。传统数学难以分析这些运动，现代分析工具主要有混沌、分岔理论和非线性动力学等。由于运动复杂性涉及运动发生条件、对条件的敏感依赖程度以及不同层次和尺度，可进一步做如下细分：

A. 分岔运动复杂性。指运动过程中存在分岔，存在选择性的不同道路。分岔运动的复杂性也包括进化过程的分岔复杂性，例如：树木生长、科学发展的分岔发展。

B. 突变运动复杂性。通常光滑、连续的运动是简单的。突变运动复杂性指的是运动曲线或轨道非光滑又突然的跳跃。

C. 混沌运动复杂性。指运动的相邻轨道永不相交，同时，又相互分离的非周期运动。运动相邻轨道相交的、有周期行为的运动则是简单的。

(3) 边界复杂性。指系统与环境的交界处通过相互作用产生的复杂性。这里的边界指的不是没有质量、没有宽度、没有面积、不占空间的数学意义的线，而是由系统与环境的界线与跨界限部分组成。界限起过滤、标准化作用，如细胞膜。跨界限起沟通和缓冲作用，就像通常所说的“缓冲带”。

### 3. 对复杂系统与复杂性的理解

首先，究竟什么是复杂系统，本身就是一个“复杂”问题。而且过去几十年来，人们是从不同领域、运用不同方法研究系统的方方面面，先后提出了许多假说、归纳了许多特征、给出了许多定义。然后，在他们的基础上，人们逐渐凝练出复杂系统的概念，因此，这些定义、概念之间有先有后，刻画的重点也不一样，当然，也存在一定的关联。弄清楚它们之间的关系，对我们准确而深刻地理解复杂系统的概念具有重要的帮助。

前面说过，一类整体行为与特征不能由其部分行为和特征来解释的系统称为复杂系统。换句话说，整体能够由部分解释的就是“简单系统”。由这一基本描述出发，我们有以下一些理解：

(1) 说一个系统是复杂系统，意味着它一定存在着某些整体行为或特征不

能由部分来解释,但这并不意味着它的所有的行为或特征均不能由其部分来解释,也就是说,复杂系统除了有复杂性外,还可能有简单性,但简单系统只有简单性。

(2) 系统的“整体”之所以不能由“部分”来解释,是因为系统在由“部分”生成“整体”的过程中,出现了新的行为与特征,也就是说出现了“涌现”现象。这样,系统是否有“涌现”现象,就成为系统是否为复杂系统的重要标志。

(3) 进一步分析:什么样的系统具有“涌现”现象呢?研究表明,系统的“涌现”一般都是系统自组织的结果,这表明,具有自组织现象的系统就是复杂系统。事实上,“自组织”是复杂系统微观层次上的现象,而“涌现”则是复杂系统宏观层次上的现象,二者是一致的。

(4) 系统的“自组织”或“涌现”必然使系统表现出“演化”过程。因此,我们还可以进一步说凡经过自组织而“演化”的系统就为复杂系统。

(5) 复杂系统要素之间或子系统之间一定存在着非线性关系。或者说,复杂系统一定是非线性系统。有些具有非线性关联的系统,它也会有一些“复杂”行为,但这只是语义上的“复杂”。如太阳系,由于是多体运动,因此,是复杂的,但它并不是我们所定义的复杂系统。

(6) 被学者称为“混沌”的现象在常规意义下是相当复杂的,但混沌系统和复杂系统尚不是一件事。因为混沌系统表现出来的一些性质,如:产生混沌宏观结构,并不是系统自组织“涌现”的结果,因此,不能认为凡是混沌系统都是复杂系统。

(7) 也不能完全用系统组成要素的多少来判别是不是复杂系统。当然,系统要素多,关联就复杂,成为复杂系统的可能性也就大。但通向复杂系统的道路并非“简单”地考虑要素的多少,还得看要素之间的关联以及这些关聟能否在一定条件下形成系统的“自组织”。

因此,在系统科学发展的过程中,一些有重要影响力的概念,如:混沌、非线性、涌现、自组织等等,它们既与复杂系统概念有这样那样的联系,但也不能“简单地”就将这些概念与复杂系统概念等价起来。复杂系统的深刻内涵还在于:系统整体与部分之间的“不可加”性,即不能用“还原论”来完全准确地认识、分析系统整体行为与特征,这应当是复杂系统的本质之处。

### 1.2.3 复杂适应系统理论

复杂适应系统理论(Complex Adaptive System,简称 CAS)是一种复杂性科学理论,由霍兰(Holland)在多年研究成果的基础上,于 1994 年在圣塔菲研究所成立 10 周年的演讲报告中正式提出。CAS 理论的核心思想是适应性造就复杂

性,指出了具有适应能力的、主动的个体,为了生存和发展,会根据环境的变化改变自己的行为规则。目前,CAS理论已成为圣塔菲研究所的理论支柱之一,作为解释复杂系统的机制,广泛地应用于各个领域。成思危把该学派列为复杂性研究中的五个代表学派之一(成思危,2002)。

CAS理论的基本思想是把复杂系统中的要素看成是具有自身目的的、主动的、积极的、活动的和具有适应性的主体(Adaptive Agent)。所谓的适应性就是指主体能够与环境以及其他主体进行交互作用。主体在这种持续不断的交互过程中,不断地“学习”和“积累经验”,并且根据学到的经验改变和调整自身的结构和行为方式。复杂适应系统理论认为,正是这种主动性以及它与环境之间反复的、相互的作用,才是系统发展和进化的基本动因(张军,2006)。

在复杂适应系统理论中,霍兰对系统整体与部分的关系提出了自己独到的见解。他认为,作为系统组成部分的“要素”是“具有适应能力的主体”或“主体”。个体的主动程度决定了整个系统行为的复杂程度。或者说,系统的整体性变化主要来源于系统内主体间的“主动的适应性”。宏观的变化和主体分化都可以从主体的行为规律中找到根源,也就是通常所说的“适应性造就复杂性”,适应性是产生复杂性的根源之一(霍兰,2000)。概括地讲,CAS理论的主要特点(许国志,2000)是:

- (1) CAS理论把系统的构成要素看成是主动的、活的主体;
- (2) CAS理论认为主体与环境以及主体之间的相互影响和相互作用是系统演进的主要动力;
- (3) CAS理论为架设宏观与微观之间的桥梁提供了一种新的思路;
- (4) CAS理论把随机因素引入遗传算法中,随机因素不仅影响主体状态,而且影响系统结构和主体行为方式。

CAS理论有几个基本的概念(黄欣荣,2007),包括:

#### (1) 核心概念

CAS理论采用了具有适应能力的主体(Adaptive Agent),强调主体具有自己的目标、内部结构和向环境学习的能力。

#### (2) 特性概念

A. 聚集(Aggregation):指复杂系统在演化过程中,较小的、较低层次的主体相互结合并形成较大的、较高层次的主体,也称为多主体的聚集体的方式或过程。

B. 非线性(Nonlinearity):指主体以及它们的属性在发生变化时,并非遵循简单的线性关系。

C. 流(Flow):在主体与环境之间,以及主体相互之间存在着物质流、能量

流和信息流。流的畅通程度直接影响系统的演化过程。

D. 多样性(Diversity):在复杂系统的演化中,由于相互和不断适应,使主体向不同的方向发展变化,最终形成分化。

聚集、非线性、流和多样性是复杂适应系统的几个特性,它们在系统的适应和进化中发挥着重要作用。

### (3) 机制概念

A. 标识(Tagging):标识是区分主体身份的标志,其作用主要在于实现信息的交流。

B. 内部模型(Internal Models):每个主体都有复杂的内部机制,对整个系统来说,统称为内部模型。

C. 积木(Building Blocks):复杂系统往往以一些相对简单的构件为基础,通过改变它们的组合方式形成,这些构件被称为“积木”。

标识在主体与环境的交互中具有非常重要的作用。内部模型和积木的作用在于加强层次的概念,具体思路为:把下一层次的内容和规律作为内部模型“封装”起来,暂时“不考虑”其内部细节,以一个整体参与上一层次的相互作用。这一思想与计算机领域中的模块化技术和“面向对象方法”不谋而合。

Gell-Mann(1994)认为复杂适应系统应具有以下特征:

- (1) 系统是开放的,即与其环境有能量和物质交换;
- (2) 系统能识别其动态过程中的一些规律性;
- (3) 系统将无规律的信息作为随机信息处理;
- (4) 系统具有记忆、学习和产生对策的能力。

Levin(1999)认为:复杂适应系统最本质的特性是自组织性,具有异质性、非线性、等级结构和流等四大要素,它们是系统产生自组织行为的根本原因。系统一般是通过异质组分之间的非线性作用而自组织成等级结构,而这一结构又支配构成系统组分间的物质、能量和信息流,并受这些流的影响。因此,复杂适应系统最本质的特性是自组织性。通过自组织,系统的整体属性由局部组分间的非线性相互作用产生,而系统又能通过反馈作用或增加新的限制条件来影响组分间相互作用关系及其发展。自组织过程是一个破除“旧约束”和建立“新秩序”的过程。在复杂适应系统中,“破除”引发“重建”、有序来自无序。这种自组织性来源于系统组分之间相互作用产生的“自下而上”的整体效应。自适应性体现了复杂系统在系统层次上的自身调控能力。

CAS理论将组成系统的元素视为具有适应性的主体,在其他主体的作用和环境的影响下不断自组织、自学习和自适应,从而使系统不断向前发展和演化。CAS理论强调主体行为是系统进化的根本动因,充实和扩展了系统科学中的相

互作用思想,将这一理论应用于生物、经济、社会等领域具有非常广阔前景。

## 1.3 社会经济系统的复杂性

### 1.3.1 社会与社会经济系统

#### 1. 社会

也许“社会”是人们司空见惯的东西,很少有人去探讨“社会”的实质性定义。王志康和谢惠媛(2005)认为:“社会”是实实在在的物,但不像我们看到的一座山、一条河;“社会”也不像我们理解的一组数据、一个方程和一条逻辑命题规则。“社会”是抽象的,人们无法看见“社会”,也难以看到社会中的所有的东西。人们只能看到个体的人以及他们的行为;只能看到人改造自然界留下的痕迹;只能看到记载人的历史和行为的物件。社会究竟是什么呢?在社会科学被正式提出来之前,一直很少有人对这个问题展开讨论。今天,虽然社会科学已经得到公认,但“社会”这一概念依然未得到统一。“社会”这个词是一个约定俗成的概念,人们自觉或不自觉地把它当成明白无误的概念,并经常用它来修饰其他词汇,并未追究它的真正含义。但是,“社会”这个词在不同的研究阶段有着不同的含义,甚至在不同的研究方法下也有着不同的含义。

17世纪至19世纪末期的“社会科学”,即自然主义的社会科学,包括孔德的实证主义在内的社会物理学、社会人种学、心理社会学等,大多都是把社会作为自然界的一部分来研究的。在这个时期,社会虽然一直在科学的视野之内,人们或许能够意识和推测到社会的存在,但很难把握。社会并非像太阳系、细胞和分子那样可以直接诉诸实证。研究者只能对单个人的性质及其行为直接诉诸实证手段,虽然他们也可以从中归纳和抽象出由许多个人组成的集合或集体的性质和行为,但研究者永远都看不见、摸不着“社会”。由于用看得见的手段去研究看不见的“社会”,加之受到生命哲学和人文主义猛烈批判,自然主义的社会科学在19世纪末期开始衰落。从20世纪开始,社会科学重新获得承认。绝大多数研究者不仅将社会视为物质的一部分,同时,将社会视为思想的一部分。《Science》杂志发表了一项研究报告:从1900年到1965年的六十二项社会科学成果,绝大部分属于思想内容而不是实体描述。社会的成分虽然是物理的,但社会是思想的。社会科学的研究对象即“社会”实质上有两个方面:作为物质系统的社会和作为思想系统的社会。作为物质的社会,是指人类和与人类发生联系的自然物的总体。此时,社会被理解为实实在在的物质系统。作为思想的社会,

是指社会属于思想性质的东西,是思想产物和思想的总体。这时,社会是各种类型、各个层次思想的集合体,社会性质就是各种思想集合的性质,社会关系就是各种思想的关系(王志康和谢惠媛,2005)。

马克思曾指出:现在的社会是一个能够变化并且经常处于变化过程中的有机体。有机体这一概念,实际上暗含着社会是一个由政治、经济、文化、历史、宗教、哲学等各种要素构成的有机整体。在社会这个有机整体中,各种组成要素极为复杂多样,各自具有其独特的结构组成和行为方式,但各个要素能协调共处,相互之间发生着密切的联系和作用。彼此之间通过交流而形成协调一致的不同于子系统的行为模式,由此涌现出整体的、区别于要素或子系统的、完全不同的、新的功能,而且整体的功能大于要素或子系统的功能。所以,当整体与它的组成部分发生矛盾和冲突时,应首先照顾整体的利益(张镇,2006)。

社会具有结构,社会是由人类生活过程的各种要素或各个方面的总和构成的具有结构性的总体组织。如社会结构可以分为经济、政治、历史、哲学、宗教、文学等。总体上来看,社会结构大致由经济基础和上层建筑两个基本层次构成,生产关系的总和构成社会的经济结构,上层建筑则是由经济基础影响和制约的各种制度、情感、信念、思想和世界观的总和。上层建筑包括两个层面:一是政治、法律制度;二是社会意识形态,如哲学、宗教、艺术等(张镇,2006)。

社会这个整体自形成起就是不断发展和向前运动着的。在社会发展史上,人类依次经历了原始社会、奴隶社会、封建社会、资本主义社会和社会主义社会这几个阶段。在各个阶段中,社会又各自具有其独特的形态和运作机制,并且在社会发展的总过程中呈现出一种螺旋式上升的、有层次联系的社会发展规律。社会的这种动态发展是其内部各个组成部分彼此相互作用的结果和体现。社会作为整体的存在,不能离开自然环境这个载体的存在,在自然环境中,社会才有了它存在的可能。正是社会与自然的相互作用,社会整体发展的动态性才真正得以实现(张镇,2006)。

社会的整体性、结构性和动态性充分说明社会是一个系统。社会作为系统而存在,社会不仅要被合理地理解为系统,而且还要被合理地理解为复杂性系统,它具有复杂系统所有的非线性、自组织、自适应、自调节、自发展等诸多性质。

## 2. 社会经济系统

社会系统因为通常都具有经济活动,所以,社会系统又常被称为社会经济系统。一般由人介入自然界并且发挥主导作用而形成的各种系统统统称为社会系统。它们具有人为的目的性与组织性。社会经济系统属于“人工系统”、“人造系统”。社会经济系统,按照其研究对象,可以分为经济系统、教育系统、行政系统、医疗卫生系统、交通运输系统、科技系统、军事系统等,其中经济系统又可以进一

步细分为工业系统、农业系统等,工业系统又可以进一步细分为重工业系统、轻工业系统和化工系统等。

20世纪80年代中期,钱学森对社会经济系统等大量复杂系统进行了研究,在综合集成了感性、理性、定性和定量等知识的基础上,提炼与总结出“开放的复杂巨系统”概念。复杂巨系统是指系统的子系统种类很多并形成层次结构、子系统间有很复杂的关联关系等。如果这个系统又是开放的,就称作开放的复杂巨系统。开放的复杂巨系统在结构、功能、行为和演化方面都很复杂。例如:生物系统、人脑系统、人体系统、地理生态系统、社会系统等。这些系统,还有大量的问题我们并不清楚。钱学森认为:开放的复杂系统再往上,就是以人为子系统主体而构成的系统。对这类系统,“开放”与“复杂”具有新的更广的含义。这里的“开放性”指的是:子系统间、子系统与系统和外界有各种信息交换;系统中的各要素、各子系统通过学习获取知识。由于人的高智能性,子系统之间关系不仅复杂而且随时间有极大的易变性。一个人本身就是一个复杂巨系统,现在又以这种大量的复杂巨系统为子系统而组成一个巨系统——社会经济系统。人们用过去创造出来的物质财富和精神财富去认识改造客观世界,创造出了巨大的高性能的计算机和有智能行为的机器,人与这些机器作为系统中的子系统可以互相配合、和谐地进行工作。在这类系统中,子系统的种类多并有不断变化的结构,子系统间可以有各种方式的通讯,而且各子系统中的知识表达不同,并以各种方式获取知识。这是迄今为止最复杂的系统,钱学森把它叫做开放的特殊复杂巨系统(钱学森,1990)。

社会经济系统的复杂程度比自然系统的复杂程度要高得多,其中,最重要的原因就是:组成社会系统的每个人不仅具有物质的属性,更具有精神的属性。社会经济系统不仅作为物质系统存在和发展,而且作为精神系统存在和发展。社会经济系统是一个名副其实的复杂系统(王志康和谢惠媛,2005)。为什么难以预见社会经济系统中事件的发生?为什么难以把握社会经济系统的演化方向?为什么难以琢磨社会经济系统中人的行为?社会经济系统的复杂性有哪些表现?它的根源在哪里?本节在下面将尝试回答这些问题。

### 1.3.2 社会经济系统的复杂性表现

社会经济系统是一类开放的复杂巨系统,因此,关于复杂系统的基本特征也适用于社会经济系统。由于社会经济系统中包含具有高度智能的人,所以,社会经济系统的复杂性又具有一些特殊的表现形式。可以从以下几个方面来描述社会经济系统的复杂性。

### 1. 系统中人的行为的复杂性

人不仅具有自然属性,更具有社会属性,人,本质上是最复杂的社会历史存在物。作为社会历史存在物,人绝不是简单的、线性的、同质的、基本不变的物质,而是受经济、政治和精神关系作用的、复杂的、运动变化着的社会存在物。随着社会向前演进和发展,人的社会实践的能力、水平和范围也在不断提高与拓展,人的思想和行为也变得更加复杂(王昭风,2005)。人是社会经济系统的中心,是其中最活跃和最重要的因素。社会经济系统中的人常常为了共同的目标在一起生活、工作,他们之间经常进行信息、经验、感情等各方面的交流。每个人的思想、行为,特别是那些举足轻重的成员对其他成员可能产生重要影响,以至于影响到群体的行为。社会经济系统中,成员之间的交互作用非常复杂,而且这种交互作用及其结果是一种非线性关系,在宏观上会出现涨落,并涌现出复杂的系统行为。这些特征使得社会经济系统中的主体具有记忆、学习和产生对策的能力,具有高智能性和适应性。通常自适应主体的智能程度越高,其行为的不确定性越大,系统就越复杂。

由于主体活动的复杂性,难以完全排除主体行为的偶然性和无序性,一方面,使社会经济系统呈现出极大的随机性、模糊性和不稳定性,另一方面,又表现出一定的秩序性、确定性、必然性和规律性。社会经济系统中的研究对象一般包括人、人的实践活动和人化自然,研究对象必然与人、人的目的、计划、技术、主动性和创造性等相联系,不可能没有主体的参与,也不可能完全剔除人的主体因素与主体性(王昭风,2005)。我们看到,一些地区为了经济发展仅仅将自然作为一个认识、征服、改造、支配的纯粹与人无关的对象,没有注意到社会经济系统的复杂性,结果事与愿违,对环境造成极大破坏,得不偿失,这一现象已引起研究者注意。目前,整个社会科学都在越来越多地关注个体的主动性,并把它作为观察与研究社会经济系统的基本出发点。

我们举个例子来说明社会经济系统中人的行为的复杂性。目前,中国大规模的外出务工人口流动是一个复杂的社会系统现象,涉及外出务工人员、各地方政府、各企业单位等多主体。但这样复杂的社会系统现象会表现出一定的趋势和规律。目前,农村劳动力就业人数最多的地域是珠江三角洲地区,而且就业行业呈分散趋势。为什么这么复杂的系统在宏观上会呈现出一定的规律性?归根结底,还是因为在整个过程中都有人的参与,人在相互交流以及与外部环境的作用过程中,用所展现出来的智能性和适应性使整个系统变得有序。为什么一个从未去过上海的人,到了这个陌生的城市后,还可以找到工作并且生活下去?这是因为人是具有很强的主动性和目的性的适应性主体,会通过学习、模仿、试错和继承、突变等手段改变自身的行为以适应环境的变化。为什么人在相同的环

境下,所产生的行为可能是不同的?这是因为人的一切活动都与人的利益、需要相关,人类独有的情感、心理等因素以及一些随机事件也是导致人行为复杂的重要原因。正是因为人的主观性的存在,在相同或不同的环境下,所采取的行为也是不同的,使得人的行为表现出复杂性和多样性。

## 2. 结构的复杂性

在社会经济系统中,既有人的要素,又有物的要素和信息的要素,包括经济、政治、科技、文化、教育、宗教、艺术等多种因素,是一个人流、物流和信息流的动态集合体。社会经济系统的演化、发展实际上是各种要素交互作用的结果。社会经济系统的结构通常是一种层次或网络结构,往往涉及信息流的结构、工作任务流的结构、资源分配流的结构等等。主体和系统其他要素之间通过这些系统结构联系在一起,所有联系的总和把社会经济系统所有要素关联成一个整体,从而形成特定的、动态的复杂网络结构形态,并且系统和子系统的结构随社会经济系统的演化进程而不断变化。

下面,我们就以南京大学这个社会子系统为例,阐述社会经济系统的结构的复杂性。我们今天所看到的南京大学,无论是它的硬件设施(教学楼、教学器材等),还是它的师资力量(院士、博导等),或是它的学术和教学水平(论文数量、研究生比例等),这些都是各种因素综合在一起所导致的涌现性结果。在一百多年前,最初建立三江师范学堂时,没有人会想到它会发展成今天的南京大学。现在的南京大学风景优美,建筑规模宏大,教学、科研设施先进,已发展成为综合实力位居全国高校前列的一流大学。南京大学这个社会子系统的演化、发展是各种要素相互作用所导致的结果。这些影响要素非常多,既包括南京大学所面临的发展机遇、自身的财务状况、吸引优秀人才的能力、地区经济发展水平、国家的政策、与其他大学的交流合作等等,又包括国家和地区的科技水平、文化的传承、学校的历史沿革、社会的认同程度等多种因素。可见,南京大学这个社会子系统中既包括人的要素,又包括物的要素和信息的要素,是人流、物流和信息流的动态集合。而且其本身的演化发展过程还要受到外界各种因素的共同影响。

在南京大学这个社会子系统中,结构不仅仅是组织结构的层次或网络结构,还包括信息流的结构、工作任务流的结构、资源分配流的结构等等。我们以南京大学的一个下属学院为例,每一个学院会有一个负责人,在这个负责人下面还会有具体负责事务的负责人,每个人都有具体的任务。每个学院都是一个整体,其结构相对于学校可能相对简单,但结构相对简单的学院也具有一个大的、复杂的社会经济系统所具有的基本特点。既包括教师、职工等人的要素,也包括办公室、教学工具等物的要素,还有例如人才招聘、学术会议等各种信息要素参与其中。学院的每一层结构都有可能继续演化成为一个上一层的结构,而且学院每

一层结构都实现了学院某一方面的功能。学院结构在横向 上可以指一个学院中各成员所具有的各项个体特征,比如:性别、年龄、学历、职称等等,每个成员的个体特征都不同。学院结构在纵向上是指层次结构。从学院的负责人到下面的各部门负责人,再到下面具体负责事务的负责人等等。学院的这种组织层次或网络结构只是学院结构复杂性的一方面因素。而学院成员之间的信息沟通、学院工作任务的分配、各种资源的分配又加剧了这种复杂性。学院的成员为了共同的目标在一起生活、工作,他们之间经常进行信息、感情等各方面的交流。学院中每个成员的思想、行为,特别是那些举足轻重的成员都有可能对其他成员产生影响,以至于影响到整个学院的行为。学院成员之间的交互作用非常复杂,而且这种影响是一种非线性关系。学院工作任务分为教学任务和科研任务等,按照每个成员不同的特征分配不同的工作任务。由于各成员的能力、资历、学历等条件不同,将各种资源,比如科研经费等按照各成员不同的特点合理地分配,这些都是影响学院的结构复杂性的因素。教职工等主体和学院内部其他要素之间是通过所有的系统结构关系联系在一起,所有关系的总和把学院内人的要素、物的要素和信息的要素互相联系成一个整体,从而形成特定的、动态的复杂网络结构形态,并且学院这个系统和其下属各部门等子系统的结构是随社会经济系统的演化进程不断变化的。

### 3. 要素间相互作用的复杂性

在社会经济系统中,除了作为社会现象、社会关系、社会运动、社会规律的载体和附属物的客观存在物外,更为重要的是这些实物背后存在的作用着的社会关系、结构和规律,如:生产力、生产关系、人类社会发展的总规律、特殊社会形态发展的规律等等。这些抽象关系物,就像物理学中的“场”一样看不见和摸不着,但它确确实实存在着,是不依人的主观意志为转移的(王昭风,2005)。这种存在于社会经济系统中的关系和结构是动态的,随着时空演化,它们之间的运动不断推动着人类社会向前发展。社会经济系统内部各组成部分、各个子系统之间相互关系、相互依存、相互作用,不但在结构上相关联,而且在各自功能的发挥上相关联。正是由于各组成部分在结构与功能上的关联性,才保证了系统整体功能的涌现。社会经济系统的关联性,不仅表示主体和内部组成要素之间的关联性,而且表示主体行为与外界环境之间的密切关系。各要素、子系统之间不仅有物质、能量、信息等的动态交互关系,而且高智能和适应性主体的行为也时刻影响着这种动态关系。

产业集群是非常典型的社会经济系统。我们就以“长三角”区域产业集群的形成机理来说明社会经济系统的动态关联性。这种关联性主要表现在两个方面:一方面是社会经济系统内部的各个子系统之间的关联,这种关联主要体现在

结构和功能上;另一方面就是主体行为与外界环境之间的关联。产业集群的形成是这两方面关联共同作用所导致的系统整体功能上的涌现。“长三角”区域存在大量的地方性的产业集群,这些产业集群在形成初期,表现为一些松散的企业聚集,各个企业相对比较独立。“长三角”地区企业在追求利润最大化的过程中,需要通过提高效率来增强自身的核心竞争力。因此,企业之间的关系慢慢就发展为两种:一种是供应链的上下游关系,即企业围绕某一产业或产品形成一个完整的产供销体系,企业之间有着相对稳定的交易关系;另一种是平行关系,即企业之间在原材料、人力、设备、技术、信息、资金和订单等方面相互调节和合作。而企业间基于分工和交易上的竞争与合作关系,其目的主要是提高信息的对称程度,提高企业的创新活力,降低创新的风险性和交易成本,降低管理费用,降低市场的不确定性以及共同发展等(陈继祥,2005)。这种上下游企业和同层次企业之间的相互依存、相互作用就是社会经济系统关联性的第一方面的关联。

“长三角”产业集群形成的外在动因是制度和环境的改变。构成产业集群的主体都具有智能性,这些智能性主要表现在适应环境和应对外部挑战的能力上。“长三角”产业集群内的企业主体能够根据市场和其他环境的变化,灵活地调整自身的经营策略、合作与竞争行为,组成多层次、多功能的结构,在发展过程中,能够通过不断学习来重组并完善其层次结构与功能结构,促使系统从无序进化到有序、从低级进化到高级。而且“长三角”产业集群内共同的风土民俗、相似的文化认同感,能起到协调企业内部关系、促进整体创新的作用,为“长三角”产业集群的自适应行为提供集群文化氛围。政府的相关政策对产业集群也起到了非常重要的引导作用,为“长三角”区域产业集群的形成构建了非常好的外部环境。这种外部环境为产业集群的形成提供了所必需的资源。产业集群系统中的主体通过其与外界环境之间的不断交互,能够有效利用环境资源,涌现出适应环境约束的结构和属性。外部环境中的许多资源依靠单个企业的力量是无法获取的,只有通过企业聚集的产业集群才能够获取,才能承受环境的约束和压力。环境的资源、约束、压力都是产业集群系统整体涌现性的重要因素(陈继祥,2005)。这种产业集群主体与环境之间的关联就是第二方面的关联。

在“长三角”的产业集群系统中,每个企业都因与其他关联企业接近从而改善自身发展的外部环境,并因此受益。产业集群内企业之间的相互作用产生了集群的竞争优势,这种优势远远超出了独立企业相互作用的效果。“长三角”产业集群发挥了系统的总体功能大于各个组成部分之和的作用,而且整个产业集群的特征、行为、属性等都与单个企业的不同。这就是“长三角”产业集群的涌现性特征(陈继祥,2005)。因此,现代产业集群的发展,从低级组织形式不断地进化为高级组织形式,正是社会经济系统中这两种关联性相互作用所产生的结果。

#### 4. 环境的限制和作用表现出的复杂性

社会经济系统是一个开放的系统,它与生态环境之间有着频繁的物质、能量和信息的交流。社会经济系统的演进与生态环境发生着广泛而又密切的联系,二者之间相互依存、相互制约、相互影响、相互作用。已有的研究结果表明:社会经济系统和自然生态系统本身都是一类开放的复杂巨系统,在其演化过程中存在广义自然选择和进化机制。因此,社会经济系统同时面对社会选择和自然生态选择的生存压力。社会选择中的政治选择、文化选择和市场选择对社会组织构成较大压力。外部环境的复杂性必然会引起社会经济系统行为的不确定性和不稳定性。一般来说,社会经济系统一切活动的根本目的是为了主体的生存和发展,为了实现这个目的,各个层次的主体必须不断调整自身的活动以适应外部环境的演化过程,这种调整必然引起系统内部各组分行为、结构形态及其相互作用模式的变化,这种变化含有较多的非线性成分,敏感于初始条件并具有路径依赖性,经过反复的适应性调整和自组织,社会经济系统的演化重新达到有序状态。

“环境污染”、“能源危机”的爆发即是环境作用于社会经济系统复杂性的明证。当前,在地区经济发展中,存在着片面追求社会经济发展而忽视环境的限制和作用的现象。有的地区为了追求GDP的高速增长,盲目引进污染产业并疏于管理,再由于产业的集聚性,使得区域社会经济系统向环境的有害输出严重超过了环境的承载力。有的地区为了追求农业的短期高产,大量施用化肥,使得周围环境不堪重负。“环境污染”的频频爆发向人们敲响了一次又一次警钟:社会经济系统要可持续发展,必须用系统科学、复杂性科学的观点考虑问题、指导社会经济发展战略和计划的制定。

#### 5. 认识论模式上的复杂性

在社会经济系统中,作为社会科学研究对象的人,不像自然科学的研究对象那样具有一种相对的确定性、可重复性、可控制性,而是充满着不确定性、不可逆性、不可控制性。社会经济系统中的主体不仅在不同的场景下可能会做出完全不同的事情或做出非常相似的事情,而且在同样的场景下也可能会做出完全一致的事情,或不完全一致的事情。一方面,社会经济系统中的智能主体,总是生活在一定时代,由于文化的传承,历史知识和风俗习惯等总是影响着主体的行为。另一方面,研究者本身的情感、思想、专业背景、行为偏好等因素也会自觉、不自觉地带入研究中,要想完全抛弃主观因素,客观地分析研究对象和解释社会现象,是十分困难的。还有一个研究的思想和方法问题。社会经济系统是复杂的,而且越来越复杂;社会经济系统的变化也是复杂的,而且更加复杂。传统的研究思想和方法在研究经济系统问题时,常常丢掉一些最本质的东西,使得我们

不能系统地认识世界。所以,社会经济问题不存在完全理性意义上的最优解,社会经济问题也不存在“一劳永逸”的解决方案。特别是在社会经济系统中,问题本身也处于不断变化和发展之中,对问题的认识也不可避免地需要一个不断深化的过程,这也导致了无法精确而“一劳永逸”地解决社会经济系统的问题。关于系统复杂性的研究,给正在力图处理复杂系统问题的人们提供了一种思考方法。

下面,以西部大开发为例,进一步说明社会经济系统认识论模式上的复杂性。在党和国家实施西部大开发战略的进程中,西部各省份的经济发展的重要性是相当引人注目的。西部各省份如何根据自身优势发展经济本身就是一个复杂的系统工程。很多省份可能会把快速发展经济当成是唯一的最优解。但是在发展经济的过程中能够不考虑资源的损耗和生态环境的破坏吗?然而这些影响最优解的因素却较少被人注意,有时甚至被忽略。以云南省为例,云南位于祖国西部,是少数民族自治或聚集较多的地区,云南的资源优势、地理优势和民族文化优势等都是非常巨大的,西部大开发的政策已经带动了云南旅游业的发展,通过发展旅游业可以促进云南经济的发展(郭和平和陈路,2005)。但是在发展旅游业和保护生态环境方面如何寻求一个平衡点,找到帕累托最优解是一个值得关注的问题。其间亦蕴含着极大的复杂性。因为社会经济问题不存在唯一的最优解,而是一个多层次多目标的优化问题。在发展旅游业的过程中,如果相应的制度和措施没有跟上,只急于发展经济,那必然将造成灾难性的后果。快速膨胀的旅游经济也很可能毁掉那些云南引以为豪的生态环境,而一旦环境遭到破坏,我们付出再大的代价恐怕也无法弥补。因此,在解决这一社会经济系统问题时,既要考虑经济因素,又要考虑环境因素。

就开发西部整体来讲,区域要快速发展经济,要加速开发,这是毫无疑问的。但就西部某个局部或特殊地方来看,还可能出现小步发展或是暂不开发的情形,譬如有的珍贵生态地区是生物物种资源库等。停止这些地区的某种发展,能实现全国资源的优化配置(郭和平和陈路,2005)。也就是说,在大开发这个复杂的社会经济系统中,并不是开发的程度越深越广,经济发展越快就是好事。社会经济问题不存在固定模式的解决方案,也不应是单一目标的解决方案。因为问题本身处于不断变化和发展之中。发展西部经济本身就是一个多层次、多目标的问题。要想解决这个复杂的社会经济系统问题,必须在全国这个大系统中来考虑西部的某个局部子系统的发展问题。

社会经济系统是动态的,处于不断演化之中。社会经济系统的问题本身也处于不断变化和发展之中,对问题答案的认识也是不断深化的。西部地区是中国重要的生物物种资源库,承担着维护国家生态大系统的重要任务。但是,目前

的经济发展水平相对于东部沿海地区差距已经比较大。原有的发展东部沿海地区经济、保护西部生态环境的相关政策已经不适应目前所存在的问题。所以,就现阶段来说,重要的任务就是发展西部区域经济,但这一决策不仅要考虑经济发展与自然、生态环境的协调问题,还要考虑到其他各种因素等。也就是说,西部大开发这个社会系统工程还潜藏着各种风险与多方面的复杂因素。因此,社会经济系统的复杂性决定了人的认识模式的复杂性。社会经济系统的演化远比人们现在已经认识到的要复杂得多,适用于现在问题的答案不一定能保证同样也适用于今后的问题。人们在认识模式上具有复杂性本身并不是件坏事,恰恰为展示人类智慧和适应性提供了舞台。我们不要回避认识模式上的复杂性,社会经济系统的复杂性正需要这样一个不断深化的认识过程(郭和平和陈路,2005)。

### 1.3.3 社会经济系统复杂性的根源

社会经济系统的复杂性主要源于以下几个方面。

#### 1. 高智能性和自适应性的自主主体

社会经济系统中的主体为具有高智能的人,或由这样的人构成的各种组织。人是万事、万物中最为复杂的,人有智慧、谋略、计划和理想,也有情感、意志、偏好和欲望,是理性与非理性的矛盾统一体。人总是凭着自己的理想、愿望和感情参与社会活动,一定量的从事社会活动的人以及各种系统要素的相互作用形成了社会经济系统的演化。一方面,人与人之间存在思想、观点、立场、动机和价值观等方面的差异,也可能存在决策背景的差异,甚至存在感知差异。由于客观条件不成熟和人的有限理性等原因,主体在互动中的遭遇和行动选择永远处于不确定状态,只能将自己的选择与决定建立在必然性基础上(秦明瑞,2003)。另一方面,人在一定程度上能控制自身状态和行为,能选择合适的时机采取适当的行为以达到自身的目的。社会经济系统中的主体能通过学习调整自己的行为以适应环境或使自己处于更加有利的地位。举个非常简单的例子,我们去超级市场购买自己需要的商品,一进入超级市场,我们便直奔一排货架,毫不犹豫地拿起自己需要购买的商品。我们不用担心所需商品不在那,因为全世界的超级市场几乎都可以精确地把居民需要的成千上万的形形色色商品送到市场中、货架上。也许我们对这一现象早已司空见惯,然而,仔细思考里面存在着一个很大的谜题:我们为什么都能很快找到自己所需要的商品呢?是什么机制使得那么多商品恰到好处地供应到货架上?去超级市场的人的需求多种多样,商品也五花八门,但大家为什么能够成功并且非常有序地买到自己所需的商品呢?即使商品不放在原来的货架上,我们也可以找到。这就是因为人所具有的智能性和适应性。超级市场整个流程的成功运作需要很多主体共同参与其中,从最初的商品

供应商到中间环节的物流配送体系,从仓储管理到如何将货物摆放在货架上等等,这是一个非常复杂的过程。但我们还是可以轻而易举地买到需要的商品,这完全取决于在整个过程中人的参与。

在社会经济系统中,主体与其他主体以及环境的相互作用,不断改造着自身,同时,也对环境产生影响,即主体能够与其他主体以及环境进行交流,不断进行着演化学习,这种学到的经验改变着主体决策集,进而影响着主体的行为方式。社会经济系统复杂性正是在主体与其他主体之间主动交往,相互作用的过程中形成和产生的。这种相互作用越强,社会经济系统的进化过程就越复杂、多变。方美琪(2003)认为:社会经济系统的复杂性最根本的由来是因为参与其中的人的智能性和适应性,这也是它与非生物系统的最基本的的区别。张大勇等人(2006)认为:社会经济系统复杂性归根结底是具有高度智能的人在活动中所起的决定性作用。在社会经济活动中,无论是消费者、投资者、生产者,还是政府和中介机构,都有自己主观的决策,而且决策者所获得的信息具有不对称性,对事物的认知能力也有偏差,使得整个系统的运动变得复杂多样。

## 2. 非线性机制

社会经济系统在高层次上会“涌现”出单个要素或低层次系统没有的性质,比如:社会经济系统单个要素层面上的杂乱无章与整个系统的协调稳定;再比如:在由利己性个体构成的群体中合作的涌现。系统之所以具有这种涌现性,就是因为系统要素之间的非线性相互作用。正是这种要素之间的非线性相互作用,才使社会经济系统产生如此神奇的结果。

线性作用产生的功能是可积的,可以进行简单的叠加。但在非线性作用下,子系统或组成要素的微小变化,都有可能引起系统相当大的变化。社会经济系统在演化过程中,通常存在着稳定性与非稳定性两种相反的属性或力量。稳定性表现为系统对涨落的抑制,非稳定性则是涨落对系统宏观稳定态的扰动。无论是涨落的放大,还是突破临界后新秩序的形成,都表明了非线性作用的存在。没有非线性作用,就不可能出现巨涨落,也不可能形成新的宏观有序结构。非线性相互作用是社会经济系统复杂性的根源,它突出表现在确定性条件下,系统演化过程出现的类似随机的行为,而且还表现在出现分形的形态结构。请看那起伏波动的股票市场、千姿百态的大千世界、风云变幻的人类社会、扑朔迷离的思维现象,正是非线性相互作用造就了这一切(武显微和武杰,2005)。

社会经济系统非线性主要表现在以下几个方面:

- (1) 各种组成要素相互作用形成动态关联的网络结构;
- (2) 社会经济系统与环境相互依存、相互制约、相互影响、相互作用所表现出来的非线性关系;

- (3) 不同层次间的非线性交互作用;
- (4) 主体行为反应(包括对其他主体和环境的反应)的非线性。

上述各个方面特别是主体行为的多样性以及信息不完全与不对称、信息流的传导偏差、时间延滞,加上信息在复杂网络结构中的非线性传播,均可能使得社会经济系统涌现出复杂的大尺度行为。

我们以金融市场为例,金融市场本身就是一个相对独立的社会经济系统。由于交易过程在时间上的不可逆性、多重因果关系及多主体参与等,都使其具有非常复杂的非线性特征,呈现出一种非线性状态。社会经济系统中,非线性关系才是最普遍的(沈悦和赵建军,2008)。主体行为的复杂多变恰恰是非线性因素相互作用导致的。在现实的股票市场中,非线性效应更为明显,预测市场走势是非常困难的。已有众多学者通过研究得出结论:股市系统是典型的非线性复杂系统,其动力学及运动学规律涵盖了物理、生物、社会及思维系统,相关研究对于非线性科学来说具有巨大的理论价值。这些研究表明,股市价格的多变恰恰是多种因素非线性相互作用导致的(王凤兰和闻邦椿,2005)。影响股票价格的因素非常多,如:公司经营状况、政治因素、心理因素、宏观经济形势、国家调控政策与制度安排、人为操纵等等。这些因素交织在一起共同影响股票价格,并不是简单的线性相加关系,而是清楚地表现为非线性效应。参与股票交易的人这个主体本身具有多样性的特点,再加之人的主观判断,更加剧了金融市场的非线性特征。例如:股民的心理变化对股价变动影响会非常大,在大多数投资者对股市持乐观态度时,会主观地夸大市场有利因素的影响,并忽视一些潜在的不利因素,从而脱离上市公司的实际业绩而纷纷买进股票,这样就使股票价格提高;反之,如果大多数投资者对股市前景过于悲观,这些主体可能对潜在的有利因素视而不见,而特别关注不利因素,甚至不顾发行公司的优良业绩大量抛售股票,致使股票价格降低。如果大多数投资者对股市持观望态度,市场交易量就会减少,这时,股价将会呈现平稳状态。股票市场中的中小投资者由于缺乏必要的专业知识和投资技巧,往往会有严重的盲从心理,而有的人和机构就利用这一盲从心理故意制造假象、渲染气氛,诱使中小投资者在股票交易中盲目跟风,从而加大了股价波动的程度。所以,股票价格的升降不以炒股个人的意志为转移,而是合力的结果。

再举个例子来说明社会经济系统的非线性,我们可以考虑一个制造型企业:在这个企业中,存在两个部门,设计部门和销售部门。销售部门要广泛听取客户的意见,然后,将意见告知设计部门。而当设计部门设计出新产品时,也会告知销售部门,让其根据设计出的产品制定销售策略。由于两个部门存在着相互作用,所以,这个组织肯定是一个反馈系统。首先,设计部门会根据

销售部门在销售过程中所收集到的客户要求等资料作出一个决策。其次,过了一段时间后,这个设计决策又会反过来影响到销售部门所作出的决策。因为销售的决策要围绕这个新设计来展开。在经历了若干时间之后,这个决策又会影响设计部门的某个决策……如此反复循环,一个反馈环就建立起来了,并且它是一个非线性的。这是因为:在社会经济系统中,由于多种因素交织在一起,对于独立智能体来说,其选择并非根据输入量的大小而作出同等比例的反应。这是由于人类个体本身就是个复杂的系统,它对事物的反应除了根据事物本身的特性之外,还会根据时间、地点、偏好、情绪等等来作出判断。这是一种理性和非理性相结合的反应。所以,在社会经济系统中,一个微小的变化被放大为一个重大结果的情况是屡见不鲜的。因此,企业所展现出来的决策往往都是非线性的。

### 3. 开放性

开放性是指系统与外界能进行物质和能量交换的性质。它是一切物质系统运动的普遍规律和固有的属性。社会经济系统的开放性不是人为附加的,是系统本身固有的属性。不仅构成社会经济系统的基本要素的人需要不断地从外部摄取身体所需的各种营养成分,并把废物排出体外,以维持其生命运动。而且作为社会系统的子系统如城市系统、企业系统、农业系统等,为了维持和发展,也需要源源不断地从外界获取信息,按时输入各种能源、材料,同时又需要陆陆续续地向外界传递信息、输出各种产品和废弃物(孔繁玲,1994)。

以南京为例,它作为一个社会经济系统,不仅具有开放社会经济系统演化之基础,而且具有以生产力、生产关系为互相作用的深层结构。它不断通过建构物质而改变着南京的城市面貌,并在改造自然的过程中伴随着能量、信息的流动。开放是社会经济系统固有的运动过程,它不仅与其环境有能量和物质交换,而且其内部的组分和子系统之间经常有物质、能量和信息的交流。这使得社会经济系统很容易受到来自外部的、难以预料的复杂影响,使得社会经济系统的主体和子系统常受到来自于其他主体和子系统的影响。因此,社会经济系统的开放性,导致各种矛盾和问题具有极大的复杂性、多变性和多样性。

南京这座城市具有开放性的特点。因为城市的生存、发展都是建立在与外界联系的基础上的,是一定区域内物质、信息、能量的聚集和淀积,可以看作是人口、权力、文化、财富等在地域表面聚集的节点(段汉明和杨大伟,2007)。城市系统时刻都与其所处的自然环境、社会环境、工程技术环境发生着千丝万缕的联系。城市不仅仅是个容器,而且是一个形态和结构不断变化的“核反应堆”(段汉明,1997)。当“长三角”区域的其他城市的能量、物质、信息不停地输入到南京这个城市中来,引起南京市内部能量、物质、信息不停地振荡、涨

落、激化,生成新的能量、物质、信息,同时,向其周围城市输出和辐射。城市的规模越大,需要与外界交换的物质、信息和能量就越多,其聚集和辐射能力就越强,这也就是大城市的中心辐射作用的原因。也就是说,正因为系统是开放的,所以受到外部环境的影响也就比较大,环境的多样性在很大程度上导致了社会经济系统的复杂性。

由于社会经济系统具有开放性的特点,所以城市的发展过程与生态、环境变迁有着复杂的关联性,环境不仅仅是城市发展的必要条件,而且是城市社会经济系统演化发展的重要因素。此外,社会经济系统的开放性还体现在其内部子系统之间经常有物质、能量和信息的交换。例如,我国长江三角洲和珠江三角洲等人口稠密地区,经济发展非常迅速,城市规模不断扩大。为什么这两个区域的城市经济发展会比较快呢?首先,是因为这两个区域有着有利的外部环境。城市可以与其所在的外部环境进行充分的能量、物质等交换。另外,城市与城市这些内部子系统之间的物质、能量和信息交换也非常多。长江三角洲和珠江三角洲聚集着比较多的大规模城市,这些城市相互之间、城市与环境之间的交流共同促进了城市的发展。当城市规模越来越大,交换的物质、能量和信息也就越来越多,这反过来又促进了城市的发展。城市与其外部环境的众多关联使它们在一定程度上融为一体(段汉明和杨大伟,2007)。这个特定区域不再是城市发展的背景,而是由多个城市组成的、由各类网络相联接的庞大的城市群系统,更突出地体现了城市就是区域的一个重要组成部分这个事实。

#### 4. 层次结构性

层次是事物普遍存在及相互联系的一种方式,人们发现世界是多样性的统一。这种统一有两种基本形式:一种是事物之间有联系但相对独立,不存在质与质的包含和被包含关系;另一种是各个事物相互依存,联系紧密,存在质与质的包含和被包含关系。这种事物之间具有的,质与质的包含与被包含的系列等级关系即为层次关系,将每个等级称为一个层次。层次是质变的表现,意味着突变、涌现,世界多样性统一展现为一个无限的层次结构(王志康和谢惠媛,2005)。

社会经济系统由经济系统、教育系统、行政系统、医疗卫生系统、交通运输系统、科技系统等子系统组成,每个子系统又可以再进一步细分为更低一级的子系统,比如经济系统又可再分为工业系统、农业系统和服务业系统,服务业系统又可以进一步划分为流通业系统、行政服务系统和旅游服务系统等。从系统到子系统再到更低一级的子系统,就形成一个多级的层次结构。当低层次上的几个部分组成上一层次时,一些新的性质、功能和要素就会涌现出来。随着层次的提高,同一类结果很可能由无限多种原因造成,这增加了解释现象成因的复杂性。

上层事物的性质和规律不可能简单还原为下层事物的性质和规律,也难以用下层事物的性质和规律来预测上层事物的性质和规律(刘金伟,2005)。这种跨越层次之间的不可以直接还原的相互关系使社会经济系统表现出复杂性。另外,同一层次主体之间的交互关系和主体跨层次的交互关系(比如通讯)更加剧了社会经济系统的复杂性。社会经济系统中物质的层次性和思想的层次性相互叠加在一起,具有复杂的因果关系。层次之间、同一层次的事物之间、不同层次的事物之间的交互以及外部环境对系统及其要素的影响,是一种线性和非线性的复合作用。社会经济系统内部的各个层次上往往存在着一些特殊要素,这些要素相比其他某些要素,对所在层次的其他要素,对上一层次的某些事物甚至系统整体,具有更大的影响力。社会经济系统中,正因为有层次的存在,偶然性、随机性、非线性以及主体的认知和心理等这些以往难以驾驭的因素才有条件发挥作用。层次之间的相互作用形成了突变和组织等机制,这些要素与必然性、确定性、线性、规律性等要素的统一和协调,共同作用于社会经济系统的演化。社会经济系统特殊的层次结构关系是社会的复杂性的根源之一。

我们以城市系统为例来说明层次结构性所导致的系统的复杂性。南京这座城市可以分为若干个分系统,每一个分系统中又包含着许多分系统,具有明显的层次性。南京城市人口为595.8万,按行政区划分可分为13个区(县),其中城区6个、郊区5个、县2个。全市共有74个街道办事处、51个镇、857个社区居委会、832个村委会(数据来源:南京政府网站)。我们可以将区(县)看成是南京的若干个分系统,而街道办事处和镇就是这些分系统下属的层次更低的分系统。因此,南京这一社会经济系统按职能划分可以分为多个层次和几百个部门,每一个层次都是一个大类,每一个部门都是一个巨大的子系统。周干峙认为:“城市系统具有大系统套小系统的特点,既有横向蔓延的网络状、链状、原子结构状的‘系统元’,也还有串行树枝状结构,各子系统之间既有一致性,又有非均质性和各向异性,如经济系统、生活系统,实际上都是一种以人的活动和意识作为子系统所构成的社会系统,可以看成是一种特殊复杂的巨系统。”(周干峙,2002)在南京这座城市中,各层次、各个子系统之间并不是独立的,而是一个相互联系相互包容的整体,而南京市的每一个分系统、每一个层次、每一种关联都代表着城市的某一个方面。如果将南京的每一个分系统、每一个层次、每一种关联都看作是南京的一个维度的话,那么,南京就是一个多维的社会经济系统。

如果南京不按行政层次划分,而是按照城市的职能划分,还可以分为经济系统、教育系统、行政系统、医疗卫生系统、交通运输系统、科技系统等等,这些子系统又可以进一步细分为更低一级的子系统,比如教育系统又可再分为小学教育系统、中学教育系统、大学教育系统和特殊教育系统等等。大学教育系

统又可以进一步划分为专科教育系统、本科教育系统、研究生教育系统等等。从系统到子系统再到更低一级的子系统,就形成一个多级的层次结构。这些层次结构无疑是巨大和复杂的。当低层次上的几个部分组成上一层次时,一些新的性质、功能、要素就会涌现出来。比如:小学教育系统、中学教育系统和大学教育系统共同作用,就会构建出完整的教育功能,就会培养出各层次、各专业的人才。这种跨越层次之间的非线性的相互关系使社会经济系统表现出复杂性。

此外,同一层次主体之间的交互关系和主体跨层次的交互关系都是不确定和随机的,因此更加加剧了社会经济系统的复杂性。南京社会经济系统的复杂性从本质上源于城市中人的复杂性,正是南京城市系统的各个层次上主体的参与,才造就了南京城市系统构成的复杂性;形成了南京城市众多的结构相互嵌套的子系统和层次关系;形成南京城市中每个层次的不同系统以及每个系统的子系统在交互过程中所具有的不同观点、角度和作用;形成南京城市系统与外界环境系统的千丝万缕的、多种多样的关联机制;形成南京城市系统内部多层次、多类型、范围各异、难以准确描述的复杂混合局面;形成独特的、超越的城市复杂性特征(段汉明和杨大伟,2007)。

在高度工业化和科学化的现代社会,社会经济系统的事务通常涉及多个层面。然而,社会经济系统中的各种组成要素越来越难以协作。在这种情况下,主体一些新的需要产生了,一些新的机构随之诞生,帮助主体将现实结构化。这些新的需求甚至导致新系统的形成,使社会经济系统的层次结构产生分化而增加系统的复杂性。正如秦明瑞(2003)在《复杂性与社会系统——卢曼思想研究》一文中所说,系统的建构是为了减少复杂性,系统的建构又增加了复杂性。

总之,社会经济系统中主体的智能性和适应性、组分与组分之间非线性的交互作用、复杂的层次结构及因果关系、系统的开放性等因素,均使得社会经济现象表现出复杂性、不可分性、不可逆性和难操作性,所以相应的研究方法与技术路线必须充分考虑:

- (1) 系统中人的适应性主体特征;
- (2) 动态与非连续变化环境对系统行为的影响;
- (3) 系统行为与功能在不同层次上的涌现;
- (4) 系统演化途径的多种可能性;
- (5) 既要从系统微观层面上揭示个体行为的决策机理与关联,又要从系统宏观层面上研究其结构、功能,更要系统地把握微观与宏观之间的相互作用。

## 参考文献

- Agiza, H. N., On the analysis of stability, bifurcation, chaos and chaos control of Kopel map. *Chaos Solitons & Fractals*, 2002, 10(11):1909~1916.
- Ahmed, E., El-misiery, A., Agiza, H. N., On controlling chaos in an inflation - unemployment dynamical system. *Chaos Solitons & Fractals*, 1999, 10:1567~1570.
- Alexander, R. D., Noonan, K., Crespi, B. In: *The biology of the naked mole-rat* (Sherman P. W., Jarvis J. U. M., Alexander R. D., eds). Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1991:3~44.
- Bertalanffy, L. V., General system theory: Foundations, development, applications. Harmondsworth: Penguin, 1973.
- Ditto, W. L., Rauseo, S. N., Spano, M. L., Experimental control of chaos. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 65:3211~3214.
- Gell Mann, *The quark and the jaguar: Adventures in the simple and the complex*. W. H. Freeman and Company, New York, 1994.
- Hamilton, W. D., Extraordinary sex ratios. *Science*, 1967, 156:477~488.
- Herre, E. A., Sex ratio adjustment in fig wasps. *Science*, 1985, 228:896~898.
- Holyst, J. A., Hagel, T., Haag, G., Weidlich, W., How to control a chaotic economy. *Journal of Evolutionary Economics*, 1996, 4:31~42.
- Kopel, M., Improving the performance of an economic system: Controlling chaos. *Journal of Evolutionary Economics*, 1997, 7:269~289.
- Langton, C. G., Studying artificial life with cellular automata. *Physica D*, 1992, 22: 120~149.
- Leo Kass, Stabilizing chaos in a dynamical macroeconomic model. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 1998, 33:313~332.
- Levin, S. A., Self-organization and the emergence of complexity in ecological systems. *BioScience*, 2005, 55:1075~1079.
- Levin, S. A., *Fragile dominion: Complexity and the commons*. Perseus Books, Reading, 1999.
- Mandelbrot, B. B. *Fractal: Form, chance and dimension*. San Francisco, 1977.
- Ott, E., Grebogi, C., Yorke, J. A., Controlling chaos. *Physics Review Letters*, 1990, 64 (11):1196~1199.
- Pecora, L. M., Carroll, T. L., Synchronization in chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.* 1990, 64:821~824.
- Rescher, N., *Complexity: A philosophical overview*. Transaction Publishers, New Brunswick, New Jersey, 1998.
- Stutzer, M. J., Chaotic dynamics and bifurcation in a macro model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 1980, 2:353~376.
- Warren Weaver, *Science and Complexity*. *Scientist*, 1948, 36(4):536~544.
- Werren, J. H., Sex ratio adaptations to local mate competition in a parasitic wasp. *Science*, 1980, 208:1157~1160.

- Wu, C. W., Yang, T., Chua, L. O., On adaptive synchronization and control of nonlinear dynamical systems. *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 1996(3):455~472.
- 巴克. 大自然如何工作. 武汉: 华中师范大学出版社, 2001.
- 贝塔朗菲. 一般系统论: 基础、发展和应用. 秋同, 袁嘉新译, 北京: 社会科学文献出版社, 1987.
- 陈国华, 姚洪兴, 盛昭瀚. 库存管理混沌系统的同步控制. 预测, 2003, 22(5):38~41.
- 陈继祥. 产业集群与复杂性. 上海: 上海财经大学出版社, 2005.
- 陈元生. 简述信息论, 控制论, 系统论在现代企业人力资源管理中的应用. 时代经贸(下旬), 2007(06x):108~109.
- 成思危. 与时俱进的中国人文社会科学. 北京: 中国人民大学出版社, 2002.
- 杜建国, 盛昭瀚, 姚洪兴. 一类混沌经济模型阈值控制法研究. 系统工程理论与实践, 2004, 24(10):21~27.
- 杜建国. 一类量本利模型的复杂性与混沌控制研究. 南京大学博士学位论文, 2005.
- 段汉明, 杨大伟. 城市系统复杂性的数学描述初探. 人文地理, 2007(3):113~114.
- 段汉明. 城市界壳的构成与城市系统的关系. 叶树华. 资源·环境·城市研究. 西安: 西北大学出版社, 1997.
- 方美琪, 张树人. 复杂系统建模与仿真. 北京: 中国人民大学出版社, 2005.
- 方美琪. 社会经济系统的复杂性——概念、根源及对策. 首都师范大学学报(社会科学版), 2003(1):101~105.
- 盖尔曼. 夸克与美洲豹. 长沙: 湖南科技出版社, 1997.
- 顾培亮. 系统分析. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- 郭和平, 陈路. 云南经济社会发展与复杂性理论. 云南社会科学, 2005(5):52~53.
- 郭元林, 金吾伦. 复杂性是什么? 科学技术与辩证法, 2003, 20(6):22~28.
- 何有世, 刘秋生. 管理信息系统. 南京: 东南大学出版社, 2003.
- 侯光明等. 组织系统科学概论. 北京: 科学出版社, 2006.
- 黄晚霞, 王志明. 员工群体行为复杂性分析. 科技管理研究, 2005(11):109~110.
- 黄欣荣. 复杂性究竟是什么——复杂性的语义分析. 自然辩证法研究, 2004, 20(5):31~35.
- 黄欣荣. 复杂性科学与哲学. 北京: 中央编译出版社, 2007.
- 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性. 周晓牧等译. 上海: 上海科技出版社, 2000.
- 霍兰. 涌现——从混沌到有序. 陈禹等译. 上海: 上海科技出版社, 2001.
- 霍绍周. 系统论. 北京: 科学技术文献出版社, 1988.
- 蒋伟进. 基于变参数的仓储管理过程混沌控制研究. 微电子学与计算机, 2002, 19(11):55~57.
- 克拉默. 混沌与秩序. 上海: 上海科技教育出版社, 2000.
- 孔繁玲. 论社会系统的开放性. 哈尔滨师专学报, 1994(2):23~24.
- 李曙华. 从系统论到混沌学. 桂林: 广西师范大学出版社, 2002.
- 林夏水. 非线性科学与决定论自然观的变革. 理论视野, 2002(3):22~24.
- 刘恩东. 不确定组合系统的若干控制问题研究. 东北大学博士学位论文, 2005.
- 刘洪, 郭志勇等. 生产过程中混沌的控制. 工业工程, 1998, 1(3):9~13.
- 刘洪. 经济混沌管理——理论、方法、应用. 北京: 中国发展出版社, 2001.
- 刘金伟. 推进社会科学研究方法创新的新视角——基于复杂性研究的思考. 社会科学家, 2004(3):64~66.
- 刘劲杨. 复杂性是什么? ——复杂性的词源学考量及其哲学追问. 科学技术与辩证法, 2005, 22

- (6):40~44.
- 洛伦兹.混沌的本质.北京:气象出版社,1987.
- 吕彤,韩文秀.基于协调的区域“经济—资源—环境”系统混沌控制.系统工程理论与实践,2002,22(3):8~12.
- 苗东升.论复杂性.自然辩证法通讯,2000,22(6):87~92.
- 苗东升.分形与复杂性.系统辩证学学报,2003,11(2):7~13.
- 苗冬升.系统科学精要.北京:中国人民大学出版社,1998.
- 尼柯里斯,普利高津.探索复杂性.罗久星等译.成都:四川教育出版社,1986.
- 钱学森,于景元,戴汝为.一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论.自然杂志,1990,13(1):1~5.
- 钱学森.创建系统学.太原:山西科学技术出版社,2001.
- 钱学森等.论系统工程.长沙:湖南科学技术出版社,1982.
- 秦明瑞.复杂性与社会系统——卢曼思想研究.系统辩证学学报,2003,11(1):19~25.
- 沈华嵩,傅琳,姜旭.“非线性经济学革命”与经济混沌.世界经济,1991(2):66~70.
- 沈悦,赵建军.中国股票交易市场复杂性的实证研究.经济经纬,2008(2):152~155.
- 盛昭瀚,姚洪兴,陈国华等.混沌动力系统的重构预测与控制.北京:中国经济出版社,2003.
- 谭跃进,邓宏钟.复杂适应系统理论及其应用研究.系统工程,2001,19(5):1~6.
- 王凤兰,闻邦椿.非线性视角下的经济系统分析.学术交流,2005,140(11):85~88.
- 王昭风.从社会历史存在物维度看社会科学研究方法的特殊性.聊城大学学报(哲学社会科学版),2005(2):66~69.
- 王志康,谢惠媛.社会系统复杂性与社会科学方法.自然辩证法通讯,2005,27(2):43~49.
- 魏宏森等.系统论——系统科学哲学.北京:清华大学出版社,1995.
- 吴广谋.系统原理与方法.南京:东南大学出版社,2005.
- 吴彤.科学哲学视野中的客观复杂性.系统辩证学学报,2001,9(4):44~47.
- 吴文俊.计算机时代的脑力劳动机械化与科学技术现代化.科技与出版,2005(1):29~31.
- 武秋霞.系统观思想的产生与发展探析.中共太原市委党校学报,2004(4):34~35.
- 武显微,武杰.从简单到复杂——非线性是系统复杂性之根源.科学技术与辩证法,2005,22(4):60~65.
- 西蒙.人工科学.武夷山译.北京:商务印书馆,1987.
- 谢惠明.复杂性与动力系统.上海:上海科学出版社,1992.
- 许国志.系统科学.上海:上海科学教育出版社,2000.
- 许国志,顾基发,车宏安.系统科学与工种研究.上海:上海科学教育出版社,2002.
- 薛华成.管理信息系统.北京:清华大学出版社,1999.
- 颜泽贤等.复杂系统演化论.北京:人民出版社,1993.
- 杨丽平.基于自组织临界性的细胞生长——灭活的一维模型研究.华中师范大学硕士学位论文,2004.
- 约翰·霍根.科学的终结.呼和浩特:远方出版社,1997.
- 姚洪兴,盛昭瀚.经济混沌模型中一种改进的反馈控制方法.系统工程学报,2002,17(6):507~511.
- 叶振飞,曲宏,杨凌.金融危机的内在机理分析和混沌控制方法.同济大学学报(自然科学版),2002,30(12):1532~1536.

- 张本祥.复杂性的概念界定及复杂性的基本问题.系统辩证学学报,2002,10(4):21~24.
- 张大勇,张莲英,姜振寰.社会经济系统复杂性理论研究.学术交流,2006(1):65~67.
- 张军.计算管理研究方法及其实现.南京大学博士学位论文,2006.
- 张镇.社会系统复杂性探析.系统科学学报,2006,14(2):36~39.
- 周成虎,孙战利,谢一春.地理元胞自动机研究.北京:科学出版社,2000.
- 周干峙.城市及其区域:一个典型的开放的复杂巨系统.城市规划,2002(2):7~8.
- 周树杰.系统科学的形成与发展初探.理论界,2006(9):155~157.
- 邹珊刚等.系统科学.上海:上海人民出版社,1987.

# 第2章 社会科学的研究方法综述

社会科学是研究社会现象的科学,它主要探讨人与社会的关系。社会科学的核心问题是解释社会经济系统的活动,包括社会经济现象、社会经济行为和社会经济过程。一般包括经济学、商业与管理、社会学、公共事务与公共政策、法学、新闻与传播、行为科学等(马颖和蒲十周,2005)。当今社会,物质生产和精神生产都离不开社会科学,社会科学已经成为社会发展中不能忽视的巨大力量。因此,积极探索社会科学的研究方法,对发展和繁荣社会科学具有非常重要的意义。目前,社会科学的研究在思想和方法论层面上主要还是偏重于还原论,强调分解、量变,或者从某几个时间断面分析事物,研究方法主要使用定性、定量方法和实验研究方法。本章首先对社会科学的研究方法进行回顾,然后,分析社会经济系统复杂性对研究方法论带来的挑战,最后,对人工社会方法进行阐述。

## 2.1 社会科学研究方法回顾

社会科学研究和自然科学研究一样,有各种各样的方法,通常使用观察、调查、实验、公理化方法、模型方法、系统方法、演绎、归纳、比较分类、分析综合等方法,有时也用常识方法和直觉思辨方法等方法。近年来,随着学科的交叉、融合与互动,从各类自然科学中借鉴、移植研究方法变动越来越普遍。由于社会科学的实践性、综合性、开放性以及研究方法多元化等特征,对社会科学研究方法进行严格的分类存在较大困难,目前,也没有普遍接受的分类标准。如果根据社会科学知识的产生途径对社会科学研究方法进行粗略划分,大致可以分类为:定性研究方法、定量研究方法和实验研究方法。

## 2.1.1 定性方法与评述

### 1. 定性研究的起源与发展

定性研究在国外称为“Qualitative Research”，国内学者将其译成“定性研究”、“质性研究”、“质的研究”。定性研究开始于 19 世纪，在 20 世纪 20、30 年代，随社会调查运动的兴起而得到发展。1914 年，马林诺夫斯基随蒙德人类学考察队，到新几内亚和美拉尼西亚进行实地调查，开创了长时期实地考察的研究方法，并在社会科学界引起了强烈的反响。随后，社会学界研究者开始纷纷效仿这一研究方式。那一时期的代表人物有杜·波依斯、布思、帕克、托马斯和林德。当时的研究者主要采用叙述故事的方式，将被研究者的真实生活反映给读者。随着世界局势的动荡，研究者开始对自身的主观程度进行反思。他们开始探讨研究者的角色及其对研究过程和研究结果的影响。美国社会学家怀特为了增加感性认识，亲自参与到研究对象的生活中，把互动式的观察引入了社会学研究。这一时期，定性研究的方法已初步成形（陈向明，2000）。

进入 20 世纪 70 年代后，定性研究得到进一步发展，呈现出多样化的趋势，表现在研究方法、策略、风格和研究观念等方面，出现了多样化的理解与运用。20 世纪 80 年代，社会科学中，定性研究的文章、出版物数量急剧增加。20 世纪 90 年代，社会科学中掀起了定性研究方法的热潮，定性研究获得了长足发展（谢雁鸣和廖星，2008）。我国社会科学传统的研究方法本质上是偏重定性研究，在计划经济时代，由于受意识形态和国际、国内政治经济环境的影响，社会科学研究基本上使用的是论述性、观点性的方法，往往存在较大的随意性和主观性，比如：在这一时期，经济学的主要研究方向是对马克思政治经济学的诠释和解读（李云娥和张庆，2007）。从 20 世纪 80 年代起，社会科学开始掀起了学习西方定量化分析方法的热潮，而定性研究被淡化。陈向明（1996）在《中国社会科学》上发表论文，详细地介绍了西方兴起的定性研究的定义、理论基础、研究过程及方法，并深入讨论了定性研究的效度、信度、推广度和道德问题，极大地促进了我国社会科学的定性研究。

概括地讲，定性研究方法起源于人类学、社会学和心理学等学科。在发展的早期，研究者个人的主观经验和理论思辨起决定性作用，没有统一的指导思想和规范的操作方法，在自然主义占主导地位的半个多世纪里，定性研究方法曾一度受到冷落。近 20 年来，由于社会科学的人文属性，定量研究方法受到质疑，定性研究方法又逐步发展壮大起来。学术界对定性研究方法的认识产生了质的飞跃（李云娥和张庆，2007）。

## 2. 定性研究方法的定义

目前,学术界对“定性研究方法”没有公认的定义。Denzin 和 Lincoln(1994)认为:定性研究是由一组复杂而相互关联的术语、概念和假设等组成的跨学科、专业和领域的研究方法。李云娥和张庆(2007)认为:我国对“定性研究方法”的理解一般比较宽泛,通常将所有非定量的研究方法均纳入定性研究方法的范畴。陈向明(1996)在借鉴西方有关论述的基础上,将定性研究方法描述为:“定性研究方法指的是在自然环境下,使用实地体验、开放型访谈、参与型和非参与型观察、文献分析、个案调查等方法对社会现象进行深入细致和长期研究;其分析方式以归纳为主,研究者在当时当地收集第一手资料,从当事人的视角理解他们行为和他们对事物的看法,然后,在此基础上,建立假设和理论,通过证伪法和相关检验方法对研究结果进行检验;研究者本人是主要的研究工具,其个人背景及其与被研究者之间的关系对研究过程和结果的影响须加以考虑;研究过程是研究中一个不可或缺的部分,必须详细记载和报道。”

Gabrielian(1999)认为定性研究通常包括三个组成部分:

- (1) 构建的研究认识论,包括后现代、结构主义或自然主义范式;
- (2) 针对解释和揭示事物、现象和事件而制定具体的研究战略;
- (3) 具体的、不需要涉及数字的技术。

Marshall 和 Rossman(1995)把定性研究方法的研究目的归结为以下几个方面:

- (1) 探索性。包括调查不容易理解的现象,识别或发现有价值的变量,提出假设等;
- (2) 解释性。如解释问题中现象产生的机制,识别导致该现象的可能原因等;
- (3) 批判性。如发现论证或叙述主要依赖的内在假设和观念;
- (4) 描述性。如把感兴趣的现象记录下来;
- (5) 行动导向。如通过教育和引导群众来达到改良其行为的目的;
- (6) 预测性。包括预测现象的结果或预测现象导致的事件和行为等。

总的说来,定性研究是建立一套概念系统,借助理论范式进行逻辑推演来解释假设的命题,并得出理论性结论的研究方法。定性研究侧重于用语言文字描述、阐述以及探索现象、事件和问题。定性研究方法主要包括:参与观察、叙述分析、案例研究、档案分析、内容分析、通讯分析、心理分析、问卷研究、结构解剖、行动研究、访问研究等等。社会科学的各个学科广泛地运用定性研究,如社会学、人类学、教育学、经济学、管理学、法学、心理学、新闻学、心理学等等(张梦中和马克·霍哲,2001)。

### 3. 社会科学的定性研究方法

社会科学的定性研究方法,侧重于对社会经济系统的活动进行描述、解释,从具体的实践活动中,抽象出普遍规律或总结带有普遍性的原理和一般方法,这是目前社会科学研究采用的主要方法之一。

#### (1) 社会科学定性研究的主要特点(牛美丽,2006)如下:

A. 定性研究强调在不受任何人为控制的自然情境下开展研究。研究者不能、也不应通过主观努力来改变研究的人文环境和自然环境。

B. 定性研究是对人的研究,它主要研究人的行为和经历,并且试图发掘和解释这些行为和经历背后隐藏的信息。它的研究对象既可以是活着的人,也可以是逝去的历史人物;既可以是单个个体的人,但更多的是处于某个社会组织或文化群体的人。

C. 定性研究过程是一个关于语言技术的过程。在收集资料时包括口头语言、文字记载、影像和图片;在分析资料时要用到相应的语言分析技术和工具,如编码技术;在实地调研时,要运用大量的语言、行为交流,并记录。因此,采用定性研究方法,研究者要擅长运用语言。

D. 定性研究强调研究者和研究对象之间的互动与配合。定性研究在资料收集时往往要求研究对象的积极参与和配合。行动研究在确定研究问题时甚至也要求被研究者共同参与。定性研究有时会把研究发现及时反馈给被研究者。定性研究认为:和研究对象的沟通、互动过程有助于对社会问题或现象的认识。

E. 定性研究不同于定量研究,主要是讲述故事而不是计算数字。对人物、社会群体或社会现象能进行深描是定性研究的优势所在,并通过细述“故事”来完成这种深描。定性研究中即使有数字描述,也是对定性数据的量化,为“深描”服务的。

F. 定性研究可以多维度解释社会经济问题、事件和现象。Denzin(1978)认为定性研究通常综合运用多种研究方法从多个角度来对事实做最真实的描述。

#### (2) 社会科学定性研究的过程

我们把陈向明(1996)对社会科学的定性研究的过程归纳总结如下:

A. 确定研究现象、事件。要注意限定研究范围和定义重要概念。

B. 陈述研究目的。尽可能明确研究的目的,选题具有一定的理论意义和现实意义。

C. 提出研究问题。提出的问题应该清楚,有针对性,应选择现有研究未解决或未完全解决,且研究者感兴趣的问题。

D. 分析研究背景。包括研究背景、研究现状以及研究者个人的看法。

E. 构建概念框架。概念框架能简洁直观地呈现所研究问题的层次和重要

维度,它包括组成研究问题的重要概念及其相互关系。

F. 抽样。定性研究的抽样一般抽取能为研究问题提供最大信息量的样本。抽样时应考虑对研究问题有重要影响的因素,如样本的性别、年龄、职业等。

G. 收集材料。定性研究中收集材料的方法主要有访谈、观察和实物分析。采用访谈方法要注意时间和地点的选择,在访谈过程中,要注意观察被访者的表情和动作,并做好记录。观察一般分为参与型和非参与型。在参与型观察中,研究者通过亲身体验,可以更深刻地领会被研究者行为的意义,但由于研究者同时扮演参与者的双重角色,很难做到价值中立。非参与型观察虽然可以做到较“客观”地观察研究对象,却很难更深入地了解研究现象。实物分析可以补充和验证访谈、观察所获得的材料。事实上,访谈、观察和实物分析是从不同角度对研究结果的检验,必要时应把几种方法结合使用。

H. 分析材料。定性研究的材料分析通常采用归纳法,从原始材料开始,逐步抽象到概念。

I. 作出结论。结论应真实地反映材料。

J. 建立理论。建立和发展理论在原始材料的基础上往往需借助研究者个人的经验和直觉。

K. 检验效度。定性研究所使用的“效度”指的是研究结果与研究者、研究对象、研究方法和情境等之间的一致性。

L. 讨论推广度和道德问题。定性研究结论的推广度是指通过研究构建的理论对同类具体事物的解释力和论证力。定性研究一般涉及伦理、道德规范问题,并对研究的结果产生影响。

M. 撰写研究报告等。撰写研究报告时,应该考虑读者的定位和书写风格。研究报告除了描述研究内容、过程和结果之外,还应包括研究的理论意义和现实意义的讨论、研究存在的不足之处以及下一步的研究方向。

以上环节并不是独立、依序进行的,实际操作时可能存在重叠、渗透,甚至反复,还与研究项目有关。另外,定性研究方法本身也是不断演进的,这可以通过分析其发展历程得到证实。

### (3) 社会科学定性研究的工具

社会科学定性研究的五种传统工具(Creswell, 1998)为:

- A. 传记研究。主要用于讲述对社会、经济等有重要影响的人物的生活史。
- B. 现象学。致力于理解某种社会现象的本质。
- C. 扎根理论。改进和建构理论是其着重点。
- D. 民族志研究。用于诠释特定的社会文化群体的行为。
- E. 案例研究。案例研究主要用于深入地理解某些社会问题,广泛地用于社

会科学的多个领域中。由于案例研究法(Case Study Method)在社会科学中的应用非常普遍,下面我们重点介绍这一工具。

案例法由美国哈佛大学法学院首创。1870年,时任哈佛大学法学院院长的朗德尔,针对讲授、阅读和背诵的传统教学法无法调动学生的积极性和法律文献急剧增长的压力,创立了案例教学法(case method),他认为科学的法律是由原则和原理构成的。每一个原理都是通过逐步的演化才发展完善起来的。也就是说,这是一个漫长的、由一系列的案例促进的发展道路。因此,又快又好地掌握这些原理的途径就是学习包含着这些原理的案例。朗德尔被誉为案例教学法的“先驱者”。1910年,弗莱克斯纳在美国卡内基教学促进基金会的委托下,对美国和加拿大的医学培训状况进行了详细调查,并发表了著名的《弗莱克斯纳报告》。报告强调医学科学实证的重要性及“从做中学”的理念。受弗莱克斯纳报告的影响,哈佛医学院决定引入法学院的案例教学法,为医学教育注入了新的活力。受法学院和医学院成功案例教学的激励,哈佛商学院于1921年开始推行案例教学。到了20世纪40年代中期,哈佛开始向外大力推广案例教学(杨光富和张宏菊,2008)。由于教学与科研的互动作用,案例教学的成功必然推动着案例研究的发展。

案例研究方法作为一种常用的定性研究方法,适合对某一复杂而具体的现实问题进行深入和全面的考察。案例研究通常有如下作用:可对某些现象、事物进行深入描述和探索;能建立、检验、发展或修改理论;找到解决现存问题的方法。在社会科学的管理学、社会学、心理学和法学等学科中,案例研究都有着深厚的历史传统(孙海法和朱莹楚,2004)。大部分学者认为使用多个案例更加全面,可以增强说服力。例如:Leonard-Barton(1988)研究技术垂直转移过程问题时用了10个案例来说明问题。马宇恒(2007)采用三个案例来研究国有医院的组织文化问题。

Creswell(1998)认为:定性研究还包括了行动研究、参与观察、叙述分析、政策研究构建、比较研究和Delphi方法等多种多样的研究工具。不同的研究工具有不同的特点和使用要求,同时具有各自最适用的场景。因此,要根据研究问题的需要选择合适的研究工具。

#### 4. 定性研究方法的评述

社会科学的研究工作多限于定性描述,思辨性内容居多。这主要是因为在社会经济系统的分析中,大量涉及到主体人的意识或心理活动,而借鉴在自然科学领域的数理方法来处理社会经济系统时,目前还存在许多难以克服的问题,还无法有效地处理智能主体这类难以量化的因素。

定性研究方法能够反映研究者对复杂社会现象的深刻理解,在描述系统发

生、发展的现象时,能详尽地说明其外在表现特征,但定性研究对这些现象背后隐含的深意进行说明时,缺少理论上的一致性和事实上的可检验性。不借助于量化工具,很难揭示社会经济系统宏观与微观多层次间的联系,定性研究多限于系统某一个或某几个时刻的状态,而较难研究动态变化的过程。定性研究通常要求研究者具备调查研究的基本素质,要有很强的观察力,具备熟练的与人沟通的技巧。

以案例研究法为例,案例研究通过对研究对象的考察与思考,能够建立起比较深入和周全的理解。但通常存在如下局限性(孙海法和朱莹楚,2004):(1)案例研究的归纳带有一定的随意性和主观性。(2)案例研究缺少一种标准化的数据分析方法,由于数据的筛选和整理的方法缺少规范,不同的研究者提出的证据和对数据的解释可能会不一致。研究者的偏见、经验和资历的不同都会影响分析的结果。(3)案例研究通常会耗费大量的时间和劳动力。(4)过于冗长和详尽的研究报告可能会使读者失去耐心。

案例研究方法对深入考察相对稳定的、范围较小的社区或社会,有一定优势,但难以从宏观角度去把握社会经济系统变迁的特征、趋势和原因。另外,定性研究不是采用随机抽样,也无事先设定的、可以量化的检测指标,人们往往怀疑其研究结果的可靠性、可重复性和适用性。定性研究的“真实”指的是被研究者眼中所看到的“真实”,但被研究者看事物的角度和方法会影响这种“真实”。研究者个人的经验、经历和观念也会对研究结果产生影响,即使是在相同条件下对同一问题所做的研究,不同的研究者也可能会得到不同的研究结论。定性研究使用的抽样不是随机抽样,难以像定量研究那样将样本分析的结果推广到总体(陈向明,1996)。定性研究还存在研究者与被研究者的关系问题,包括伦理道德和隐私问题等。

## 2.1.2 定量方法与评述

### 1. 社会科学定量研究的起源与发展

定量指的是以数字化符号为基础去测量。定量研究有广义和狭义之分,广义的定量研究把研究中使用了数字、数学符号和数学语言来说明问题都当作定量研究;狭义的定量研究特指研究者事先建立假设并确定具有因果或相关关系的各种变量采用概率统计的方法来收集、处理和分析数据,建立不同变量之间的相互关系,进而检验关于研究对象的某种理论假设(谢美华,2006)。

社会科学的定量研究,起源于17、18世纪。随着近代科学的兴起,经典的自然科学走向成熟,自然科学方法变得丰富并显示出越来越强大的作用。在这个过程中,一些自然主义的社会科学家开始尝试运用定量研究方法去研究社会科

学,从而打破了社会科学与自然科学在研究方法上的界限,一定程度上实现了研究方法的合流。到19世纪近代科学史的第二阶段,研究者开始用不同的方法对同一对象从不同的侧面开展研究,或者用同一种方法来研究不同的对象。在20世纪早期,美国的社会科学很快确立了量化的研究方法,最先兴起于心理学,到20世纪30年代和40年代,经济学、社会学和政治学中开始盛行量化研究方法。在第二次世界大战后,社会科学中的许多学科,如经济学、管理学、决策学、预测学等,都开始广泛地运用数学这一量化工具(洪长安,2004)。

分析定量方法在社会科学研究中应用的现状,可以发现:随着数学方法和计算机仿真技术的发展,定量方法在社会科学研究中的应用越来越向广度和深度扩展。社会科学中应用定量分析方法最多的,大概要数经济学,而且所采用的数学工具越来越丰富。经济学的定量分析中几乎用到了离散数学、概率论与数理统计、集合论、群论、拓扑学、微分几何等现代数学工具,定量分析在经济学中取得了累累硕果。今天,经济学绝不是运用数学方法从事定量分析的唯一的社会科学领域,社会科学其他领域的研究中也普遍采用这一方法,现在越来越多的社会现象被纳入了定量分析的范围之内(洪长安,2004)。美国哈佛大学的卡尔·多伊奇等人对1900—1965年社会科学的发展情况作了全面考察,确定的62项重大研究成果中,不同程度的定量研究就占总数的 $2/3$ ,1930—1965年间的比例是 $5/6$ ,大部分成果往往是定量分析方法的革新,或是定量分析推导出来的理论(贝尔,1988)。金武刚(2002)以《中文核心期刊要目总览》中指定的核心期刊1999年所发表的3199篇研究性论文作为样本数据,经过分析发现:我国社会科学研究的方法总的来讲,仍然大量采用着定性研究方法,占总量的93.9%。而运用数据分析来说明问题的研究非常少。从学科来看,除了社会学和经济学较多地采用定量方法外(分别大约占30%和20%),其他各学科采用定量研究方法的论文均不到10%。可以说,这与定量研究占 $5/6$ 的西方现代社会科学研究存在巨大差距。

## 2. 社会科学的定量研究方法

社会科学的定量研究方法一般是从一系列假设出发,通过数学建模对复杂社会系统结构和活动进行量化分析并揭示规律,运用数学演算、定理证明等方法得到一般性结论。过去几十年来,随着数学自身的发展及数学与社会科学的相互渗透,社会科学研究的定量方法日益丰富,涉及方法类型日益多样,量表测量、问卷调查、结构式访问、结构式观察等是定量研究中常见的资料收集方法。限于篇幅,这里只以结构方程模型及多层次线性模型为例,做一概略性的介绍。

结构方程模型或结构方程建模(Structural Equation Modeling),也称为协方差结构模型(Covariance Structure Models),是一种多元统计方法,它基于变

量的协方差矩阵来分析变量之间的关系,是在心理学、教育学、社会学和行为学等社会科学的实际应用中不断发展起来的一个前沿研究方向(秦浩和陈景武,2006)。它起源于20世纪60年代,由Bock和Bargmann在心理计量学领域的研究中提出来,经过以瑞典统计学家Joreskog为代表的许多人的修改和完善,最后,发展成为了一种通用的统计模型。它弥补了传统统计方法的不足,可对潜变量之间的相关关系,甚至因果关系进行研究。在社会科学领域,隐含着像人的动机、心理、企业竞争力等这样一些无法直接测量的因素或特质,在结构方程模型中,把这种因素或特质称为“潜变量”,并分别采用多个指标来表示这些潜变量,而且研究者可以估计每个指标的测量误差,克服了传统统计方法把潜变量人为显化带来的局限。

“多层次线性模型”(Multilevel Linear Model,简称HLM)是统计学在社会科学领域应用中的另一新进展,又称为“层次线性模型”(Hierarch LinearModel)或“多层次分析”(Multilevel Analysis)。最早由Lindley和Smith在1972年,为了区分个体水平和社会背景水平的变量对个体行为的不同影响而提出这一术语,但没能在统计上得以实现。直到Dempster、Laird和Rubin等人提出了EM算法,并在1981年,将该算法用于解决HLM的参数估计问题后,多层次线性模型的应用才变得可能。1986年Goldstein又采用迭代加权广义最小二乘法来估计参数,此后,多层次线性模型统计软件HLM、Mlmodel等的出现更推动了该方法在社会科学领域中的应用。多层次线性模型用于处理具有嵌套结构的数据,而嵌套结构的数据在社会科学领域中大量存在。因此,多层次线性模型在该领域具有广阔的应用前景。国内社会科学领域对层次线型模型介绍和应用研究比结构方程模型晚,所发表的研究报告也不多(蔡永红和姜勤德,2006)。而且研究多集中在心理学和教育学方面,主要有刘红云等(2005)、李雪燕和辛涛(2006)、于海波(2007)。

### (1) 社会科学定量研究方法的主要特点

陆益龙(2008)认为:定量研究具有的主要特点如下:①问题的有解性;②结果的可证伪性。可证伪性指的是科学具有被证明为错误的可能性,也就是说,具有被推翻的可能性。采用定量研究必须明确地提出在什么情形下结果可被推翻。③对测量的依赖性。指的是测量的过程和手段对结果的好坏有重要影响。④结论的精确性。由于数学手段的采用,定量研究结果具有精确性和客观性等特点。⑤程序的可复制性。由于标准化、系统化的研究程序,定量研究方法具有可重复性的特点。

### (2) 社会科学定量研究的过程

就定量研究而言,其科学的研究的程序是:A.选定研究课题;B.提出研究假

设;C. 设计研究方案和测量工具;D. 收集资料;E. 整理和分析资料;F. 撰写研究报告。虽然这些步骤在形式上和定性研究有相似性,但其具体包含的内容、运行顺序以及所用工具都很不相同。

### 3. 社会科学中定量研究与定性研究的比较

李云娥和张庆(2007)把定性研究与定量研究的区别归纳为四点。为了更透彻地理解定量研究和定性研究两种方法,我们在借鉴已有研究成果的基础上,从八个方面对定量研究和定性研究进行比较。

(1) 表述上的不同。定量研究较多地依赖对事物的测量和计算,用数字和量度来表述;定性研究侧重于用文字来描述现象。

(2) 认识论上的差异。定量研究来自于实证主义,在范式上更接近于科学范式;定性研究则来自于解释主义,从属于人文主义的范式,强调研究在自然环境和条件中进行。

(3) 逻辑或出发点不同。定量研究与演绎过程更为接近,强调以理论为基础,从一般到特殊;定性研究本质上是一个归纳的过程,逻辑上是从特殊到一般,研究的目的是构建和发展理论。

(4) 技术路线上的差异。定量研究一般采用自上而下的技术路线,而定性研究采用自下而上的技术路线。

(5) 关注点上的差异。定量研究注意社会事实的测量,定性研究关注相关人员的判断。

(6) 价值观上的差异。定量研究的主要目标是确定变量之间的相关或因果关系,强调客观现实,要求研究者在研究中要努力做到“价值中立”;定性研究的主要目标是深入理解社会现象,强调现象与背景之间的关系,更加注意现象的变化过程以及对行为主体所具有的意义。

(7) 在理论和研究的关系上的差异。定量研究倾向于以理论为基础,常常用来进行理论检验;定性研究倾向于在研究的过程中发现和发展理论。

(8) 研究程序上的差异。定量研究更强调研究程序的标准性、系统性和可操作性,各种研究方式、资料收集方法和数据分析手段都有一套较标准规范的程序,研究的结果具有概括性、精确性;定性研究方法则往往突出研究程序、研究方式和手段上的灵活性、特殊性,研究结果具有丰富性、细致性及深入性。

尽管定性研究方法和定量研究方法存在以上差别,但二者的研究目的是一致的,都是为了揭示出各种现象背后隐含的深意。

### 4. 社会科学中的定量研究方法评述

社会科学的定量研究从基本的假设出发,通过数学建模对社会经济活动和资源配置进行量化分析并揭示其规律、原理,必要时对社会经济活动的趋势进行

预测。这种方法思路清晰,逻辑严谨,能够为复杂社会现象提供严格的解释。社会科学中采用定量研究主要有下列作用:

(1) 由于社会科学研究比自然科学研究更带有主体性,社会科学中采用定量研究可保证客观地认识对象,有利于提高社会科学研究的客观性。

(2) 社会科学越来越重视量化,重视方法、策略的可操作性,对社会经济系统中主体的行为、各种社会现象描述的精确性和预测的准确性要求也越来越高。从某种意义上说,定量研究可以较好地满足这种要求,所以该方法在社会科学的研究中越来越受到重视。

(3) 做出科学的预见,是社会科学的理论创造以及为社会经济建设服务的需要,采用定量研究方法从某些方面提高了社会科学的预见性。

但是,需要注意的是,一方面,由于社会经济系统的高度复杂性与不确定性,定量研究为保证理论的逻辑性和严密性往往采用假设与抽象,将难以解决的定量或定性问题排除。因此,如何验证假设,如何处理难以直接量化的要素,以及如何反映复杂社会经济系统多个可能的演化趋势等问题,是定量研究面临的一些难题。另一方面,比较深入的定量分析和建模研究所讨论的问题过于具体,难以提炼形成关于复杂社会经济系统的一般性规律的认识。正如王昭风(2005)所说,对于社会经济系统中像生产力与生产关系、经济基础与上层建筑这种离开了人的理性抽象、科学抽象就不能把握其本质的复杂的社会关系、结构和规律,不管采用多么先进的仪器,多么灵敏的药剂,多么现代化的研究场景,无论运用多么复杂、科学的数学模型,如何高级的计算手段,都难以全面把握与认识其本质。其实,社会经济系统中的许多现象、事件和行为,如主体的心理、情感活动和行为等,是难以量化的,也是不容许被简单量化的。

具体来说,定量方法存在如下局限:

(1) 定量方法难以处理人的认知、情感、心理和行为等难以量化的因素,比如:经济学从配第时代起,就一直追求像数学那样处理经济问题,至今也远未实现。再如:科学很容易确定水变为冰的温度,但不可能那样容易找到生产关系与生产力相适应关系转化的临界点(洪长安,2004)。正如郝宁湘(1994)所说,对于像生命、精神、意识以及人的主观体验、价值观和社会关系这样的问题,单靠理性逻辑方法是不能解决的。

(2) 任何模型都是对现实的简化,这种简化也可能歪曲现实并产生错误的结论。定量分析在解释变量因果关系时,往往只能关注其共变关系,却无法区分这种关系的真假(张学军,2007)。

(3) 研究者在使用定量研究方法时,往往将过多的精力投在数据的处理和统计方法的套用上,常常忽视数据背后所隐含的行为动机和该统计方法适用的条件。

(4) 仅仅使用定量研究方法可能无法充分、系统地认识特定社会现象背后的内部动机。比如:考察风险投资合同中可转换证券条款的使用情况,对截面数据进行计量分析,可以获得如项目质量的预期和风险投资家的监督水平这样的,影响可转换证券工具使用的因素,但并不能确定影响某一风险投资家在签订合同时的行为动机的因素(李云娥和张庆,2007)。

以结构方程模型和多层次线性模型为例:结构方程模型和多层次线性模型的应用,使得社会科学领域中探讨问题的深度、广度以及精确度得到大大提高。但是,结构方程模型和多层次线性模型在提出理论假设时,往往需要借助已有的理论和定性研究的结果,难以建构理论。结构方程和多层次分析模型有其使用的条件,如:结构方程的构建必须以正确的理论为基础,多层次分析法要求数据必须具有层次结构;两种方法的使用都要求大样本。如果不注意其条件而盲目使用很可能得到错误的结论。目前,结构方程对接受模型的标准尚未统一。如果模型没有指定所有的关键潜变量、没有正确指定潜变量间的路径,就可能因指定误差而影响结构方程解释能力,由于目前尚无指定误差的检验技术,在下结论时难免以偏概全。另外,多层次分析模型目前也无法对样本容量与估计误差和统计能力的关系做出具体说明(蔡永红和姜勤德,2006)。

### 2.1.3 实验研究方法与评述

#### 1. 实验及实验方法概述

密立根在他的获奖演说中讲到:“科学是用理论和实验这两只脚前进的,有时这只脚先迈出一步,有时是另一只脚先迈出一步,但是,前进要靠两只脚:先建立理论然后做实验,或者是先在实验中得出了新的关系,然后,再迈出理论这只脚并推动实验前进,如此不断交替进行。”(刘晓君,2006)社会经济系统的演化过程是非常复杂的,不仅自身表现出相互交织的多样性现象,而且由于开放性,同环境之间的作用也表现出复杂性,往往并不能通过仔细观察而达到对社会经济现象及其演化过程的理解。比如:要研究影响企业的生产效率的因素有哪些,仅凭单纯的观察是难以做到的。必须依靠实验,建立实验组和对照组,在控制其他因素的条件下,分别实验不同的工资报酬、福利条件、工作与休息时间的比率、照明条件、员工的士气等对生产率的影响,才可能发现真正重要的因素。

那么,什么是实验呢?实验是为了解决经济、社会和自然问题等,而在其对应的科学的研究中用来检验或验证某种新的或已经存在的假说、假设、原理、理论而进行的一种明确、具体、可操作的技术操作行为。通常实验要预先做好准备,设定实验目的、实验环境,然后,按照一定的操作规程进行实验操作,最终要撰写实验报告反映实验结果和存在的问题。一般认为实验方法是人们根据研究目

的,采取一定的手段,人为地变革、控制或模拟客观对象,在一定条件下获取科学事实的一种研究方法。实验方法通过主动干预事物或现象的进程,以便详细而精确地把握现象、事件和事物背后隐藏的深意,人们借助它,可以发现新的科学事实或科学规律,验证假说和检验科学研究成果。创立系统的实验方法是科学发展的需要(关于实验方法的详细论述,读者可参见:刘晓君,2006)。

真正系统的科学实验诞生于资本主义社会,在这之前,实验是零星的、局部的。弗兰西斯·培根首先把实验当作认识的一种方法,并使之理论化。他认为只有在实验的基础上进行归纳,才能得出贴近客观真理的结论。资本主义社会化大生产和社会分工的细化,使得实验从生产中分化出来,变成一项独立性的社会实践活动。科学实验的深度、广度以及手段、规模是随生产的发展和科学技术的进步而演进的。科学实验常常是产生科学革命的契机,光学、化学、生理学、遗传学等许多学科的发展事实充分说明了这一点。据统计,自1901年设立诺贝尔科学奖以来,约60%获奖者为从事实验性工作的科学家。

同样,社会科学领域也见证着这一事实,如心理学、经济学和管理学的发展。19世纪进化论的提出,生物科学领域的研究不断取得进展,出现了一批研究实验心理的人物,如米勒、费希纳和韦伯等。在他们研究成果的基础上,冯特潜心于试验心理方面的研究,并于1962年首次提出“实验心理学”一词,1879年,他在德国莱比锡大学建立第一个研究心理学实验室,标志着科学实验心理学的诞生(吕森林,1996)。1962年,弗农·史密斯发表了实验经济学奠基之作的论文《竞争市场行为的实验研究》。1965年,他又发表了《实验性拍卖市场与瓦尔拉斯假定》的论文。这标志着实验方法在主流经济学领域确立了自己的地位,也为史密斯奠定了实验经济学开创者的地位。2002年,史密斯摘取了诺贝尔经济学奖的桂冠,这标志着理论界已经认可实验经济学。目前,实验经济学已经成为经济学研究中的重要工具之一。

再来看看实验给管理带来了什么。直到19世纪最后数十年,“管理”一词还几乎鲜为人知。虽然管理无所不在,早就存在于企业、军队、政府、学校等各种组织中,但那时它仍然是经验性的,内涵和外延都缺乏科学研究。真正用科学管理的思想和方法去变革老式的经验管理,则是从泰罗为代表的一系列实验研究开始的。泰罗精细地研究了一个工人或一部机器用规定的材料和方法,在受控条件下完成某一生产过程、制造某一部件需要和应该用多少时间。这些实验结果为制定出一种符合实际的、相当精确和可靠的产量定额提供了科学根据。20世纪初,弗兰克·吉尔布雷斯研究了砌砖动作最简单而高效的方法,被后人称为“动作研究之父”。他的妻子莉莲·吉尔布雷斯也研究工业动作和心理学相关问题,于1912年在管理心理学方面的博士论文基础上正式出版了《管理学》,对研

究工业生产中人的因素做出了开拓性贡献,被人们尊称为“管理学的第一夫人”。20世纪20~30年代,梅奥根据霍桑实验,提出了人际关系学说。正是泰勒、吉尔布雷斯和梅奥等为代表的实验,使管理走向科学(瞿宝忠,1989)。

20世纪以来,社会科学中的实验方法层出不穷,如:戴明博士用著名的“红珠实验”使人们洞悉了质量问题的天机,他指出:大多数质量问题不是工人的责任,而是管理者的责任,因为除了管理者,可以说工人对产生问题的体制和系统是无能为力的。他提出的质量管理方法,使日本企业迅速走出“Made in Japan”为劣质产品代名词的命运。再如:美国心理学家詹巴顿的“破窗”实验以直观而形象的方式演示了社会现象的本质,进而提出了对社会现象的本质的理解和解释(刘晓君,2006)等等。

## 2. 社会科学的实验方法

### (1) 社会科学实验方法的基本思想

实验研究不仅是经典的、自然科学的基本研究方法,而且也是社会科学的重要研究方法之一。社会科学实验方法(简称社会实验)是利用实验的方法来研究社会经济系统中的问题,研究者按照一定目的合理地控制或创设一定条件,人为地变革研究对象,从而验证假设、探讨社会现象因果关系的研究方法(嘎日达,2002;孙明贺和郦全民,2006)。其基本思想是:主要运用实验解决社会、政治、经济和文化问题,关注要素间的关系及其内在作用机制;以实验室实验方法论为主,也注重通过现场(实地)研究来做实验;强调实验的可控性与真实性的有机结合。社会科学的实验方法本质上是一种经验调查的方法。

### (2) 社会科学实验方法的基本特征

A. 有理论假说。实验前一般都有一个关于解决某一社会、政治、经济、文化等问题的设想或待验证的理论。

B. 有控制。实验过程中会采用某些手段和方法,人为地控制或创设某些条件以验证假设。

C. 有变革。主动变革实验对象和参数,使研究对象接受不同的实验处理。如:詹巴顿在“破窗”实验中,主动把两辆一模一样的汽车分别停放在不同的街区。其中一辆原封不动地放在中产阶级社区,而另一辆则摘掉车牌,打开顶棚,停放在相对杂乱的街区。结果,第一辆一个星期后完好无损,而打开车棚的那一辆,不到一天就被偷走了。后来,他把完好无损的那辆汽车敲碎一块玻璃,结果,仅仅几个小时后,这辆车玻璃全被打碎了,后来,就不见了。这场实验不断更换实验对象,成为许多社会现象的缩影(刘晓君,2006)。

D. 可重复操作。社会实验在一定条件下形成的事物或结论,只有在相同条件下复现,才能认为是有效的,如“红珠实验”。

### (3) 社会科学实验方法与自然科学实验方法的比较

根据嘎日达的分析研究(2002),我们把社会科学实验方法与自然科学实验方法的异同总结如下:

A. 两者都有一脉相承的方法论前提。在研究者的逻辑思维和想象力作用下,正是依靠观察和实验,近代自然科学才逐步从哲学中分离出来,成为真正意义上的科学。在自然科学的影响和启发下,一些社会科学领域的研究者开始着手把自然科学方法应用于自身的研究领域。自然科学中实证主义的引入使得社会科学研究走向科学化。社会实验是自然科学和社会科学交叉融合的结果,是自然科学的实验方法在社会科学研究中的传承和发展,是实证主义的产物。

B. 从科学认识的角度来看,两者的基本要素、结构、内容和研究逻辑是一致的。两者都是由实验主体、实验条件和实验客体三个基本要素组合而成的。一般地讲,实验主体通过实验条件的精心设计,排除无关的干扰因素,按一定的程序对实验客体进行操作,并记录实验结果,从而验证变量间的因果或相关关系。两种实验一般都要涉及自变量与因变量、事前测验与事后测验、比较(包括纵向比较和横向比较)三项内容。两者都基本遵循理论——实验——理论的研究逻辑。

C. 两者在主客体的关系上存在差异。自然科学实验是人与物的一种单向作用,而社会实验则是人与人双向互动交流。社会实验的对象在实验时的行为和态度与平时相比,可能会有较大差异,从而对实验结果造成影响。例如:在研究工人的生产效率是否与照明条件相关的“霍桑实验”中,不仅照明度增加的“实验组”生产量提高了,而且照明度未改变的“对照组”生产量也提高了,甚至降低“对照组”的照明度,其产量仍然比平时高。经过认真的分析发现:导致实验组生产效率提高的真正原因并不是照明条件的变化,而是实验活动本身影响了员工的士气而导致的。

D. 社会实验所受的干扰因素比自然科学实验多。社会实验更易受实验人员先入为主的预期心理、各种社会因素、社会环境等的影响。

### (4) 社会科学传统实验方法的分类

社会实验可从不同角度分类,借鉴万迪昉等(2003)的对实验管理学的分类方法,我们把社会科学的传统实验方法按如下分类:

#### A. 人群实验

人群实验往往需要构建一个合适的实验环境,通过比较对照组和实验组在该环境下的行为,观察和分析其内在规律,从而发现和解决具体的社会系统问题。这种方法用来处理一些具体的社会系统问题,实验对象主要是人及具体的工作,注重采用心理学和行为科学的方法。比较典型的,如1924~1932年,以哈佛大学教授G. E. 梅奥为首的一批学者在美国芝加哥西方电气公司所属的霍桑

工厂进行的霍桑实验。

### B. 人机组合实验

人机组合实验通过准确客观地描述实验对象,构建反映社会、经济现实的模型,用数学公式来表示变量之间的关系,然后采用一定的计算机编程工具编译为软件系统。根据人在其中的参与程度分为:

a. 以机为主的模拟。这种模拟可以比较形象地展示组织运作过程中的某些环节,为决策提供借鉴,包括分析模拟和数值模拟。分析模拟主要运用运筹学和博弈论相关知识解决最大利润、最小成本等结构化问题。数值模拟把企业运作情况变成具体的模型,采用计算机技术进行仿真模拟,通过输入、改变变量和参数的初始值,分析输出结果,从而优化组织流程,为企业提供决策支持。一般说来,以计算机为主的模拟可以比较形象地展示组织运作过程中的某些环节,为决策提供借鉴。

b. 以人为主的实验。计算机被当作实验的一个辅助工具,对人和组织的行为进行研究是这种实验的核心,如营销模拟系统。这种系统一般预置了多种行业的市场和消费者数据,并形成了一个复杂的、变化的市场环境。参与实验的人员在系统中可模拟一个公司的市场营销经理、营销人员和客户。营销人员首先对复杂的环境进行调研、分析,在此基础上根据消费者的需求,研发自己的产品,然后,通过一些营销策略,把自己的产品推向市场。一般为虚拟的消费者按照自己的购买策略对系统中所有营销人员的产品进行购买。系统对最终的购买结果按期进行分析。营销人员可以根据预先选定的指标来衡量自己的营销结果,接下来,开始新一轮的营销。

### 3. 评述

社会实验方法借助一定的实验手段,可为学习和研究社会经济系统提供更加贴近现实的、多态的、深刻的理论与实践交互作用的环境,通过观察、分析实验中参与者的行为和实验的结果,为修正、完善社会科学理论的实证研究提供了一种科学手段,并为验证、发展已有理论,创建新的理论提供支持(万迪昉等,2003)。社会实验方法为社会科学各学科从经验和思辨走向科学,发挥了革命性的作用。采用实验方法来研究社会科学,其优点主要表现在:可以完全按照自己提出的假设来决定研究的变量并设计变量的状态等,通过操纵某些变量来观察系统的演化,可以通过调整变量的状态、参数的取值或实验条件观察到常规状态下很难发现的结果;社会科学研究运用实验方法,它虽然不易把实验对象从社会中完全分离出来,但是,它以一定的手段、在一定条件下,使研究对象与社会相对分离,从而达到控制研究对象的目的。虽然从现实意义上讲,历史和已经发生过的事件是难以重现的,但在人的控制下,通过一定手段同样可以达到重现研究对

象的目的,这在一定程度上提高了科学的研究的准确性。

但是,传统的社会实验方法较难处理社会经济系统宏观层面的问题,不能反映其多个可能的演化趋势。与自然科学实验相比,由于文化、道德、伦理、价值、情感和利益等等社会因素,社会实验中实验者的行为和状态通常难以控制,因此,实验结果一般不具有自然科学意义上的可重复性。另外,实验人员先入为主的预期心理也会导致实验结果发生偏差。例如:1966年,心理学家罗森塔尔在一所中学对18个班级的学生,开展了心理和智商的实验,结果表明老师的期望,以及学生本人从老师那里接受的心理暗示共同影响了实验结果。再如:在罗森塔尔的另一项名为“迷宫学习”(Maze-learning)的实验中,随意贴的标签所承载的期望影响了学生的实验观察,从而影响了实验结果(嘎日达,2002)。这些例子表明,在有人参与的实验中,实验者和被实验者的先验会影响实验结果的客观性和准确性。

另外,在社会科学中的实际实验还受到过程的不可逆、实验成本太高、实验周期太长(或太短)、实验条件不允许等因素以及道德、伦理、法律等因素的限制,无法进行具体和实质性的实验研究工作,也不大可能针对研究对象直接进行实验。针对不同类的实验方法来说,人群实验难以控制、重复,较难处理宏观层面的问题,难以连续反映研究对象的动态演化,还受道德、伦理、法律等方面限制;以机为主的传统实验对人和组织的行为,特别是微观和宏观之间的作用机制无法深入刻画;以人为主的人机实验容易忽视对实际业务流程的深入刻画,实验的结果往往受实验对象对问题的理解或操作技巧的影响,往往难以重复,被实验的人易受计算机既定程序的影响被动选择,主动性体现不够,也很难体现微观与宏观的双向反馈。

总之,目前,社会科学研究体系在方法论上主要偏重于还原论,强调分解、量变,从某几个侧面或时间断面分析事物,在相当大的程度上忽视了复杂社会经济系统的整体性和动态演化及系统不同层次之间的差别和联系。随着科学技术的整体进步,就科学的研究的方法论而言,社会科学领域中除了传统的以思辨式为基础的定性方法,以数学模型为基础的定量方法以及传统的实验方法外,以计算机技术为平台的计算研究方法也在形成中,并得到越来越多的学者的关注,并由此产生了新的研究方法——计算实验,这将在后面各章介绍,也是本书之重点。

## 2.2 社会经济系统复杂性 对研究方法论的挑战

“工欲善其事,必先利其器”说明了方法的重要性,方法论是方法的概括和总

结,是方法得以应用的理论指导。然而,在社会科学研究中,如何确定研究对象,如何确立研究关系,以及如何才能正确认识和理解研究对象等问题一直以来争论不休,社会科学尚未建立统一的方法论体系。对社会科学方法论进行探讨,一方面,要在反思之中对研究方法保持足够的警觉,避免“为方法而方法”的倾向,另一方面,必须要考虑到社会经济系统的复杂性和特殊性。

## 2.2.1 方法论概述

### 1. 方法与方法论

方法(Method)是人类认识世界和改造世界的思路、途径、方式和程序。它是实践过程中最重要、最基本的要素,是主体认识客体的桥梁和工具。人们的行动总会受到方法的支配,但不是所有的方法都是科学的,科学方法只是所有方法集的一部分。采用非科学方法,很可能事倍功半,甚至一事无成;而科学方法,往往使你的行动事半功倍,卓有成效。正如袁运开和王顺义(1997)在《世界科技英才录——科学方法卷》所提到的那样:“方法掌握着研究的命运”。

方法论(Methodology)是以方法为研究对象的科学,是关于研究方法的逻辑,是学者在进行理论创作和学术发展过程中所积累的研究哲学。它从哲学的高度总结人类创造和运用各种方法的经验,是方法的一种规律性知识。唐埃思里奇(1998)给出了方法论的一个直观定义。他认为:方法论是指对给定领域中进行探索的一般途径的研究。由此定义可看出,方法论就是认识、分析和解决一类问题所规定的思路与原则。方法论是具有某种普适意义的理论,不以适用范围内的具体事物为研究对象,不以具体事物为对象的具体科学问题为研究目标,而是对适用范围内的具体对象的研究程序提供某种理论指导。要解决具体问题,还得有具体的技术、工具和程序,也就是说,还需要方法论“规定”下的方法。方法论对人们的行动具有导航作用。恩格斯指出:一个民族想要站在科学的最高峰,就一刻也不能没有理论思维。而如果缺乏科学方法论的指导,要提高理论思维,那是难以想象的。以科学的方法论为指导,才能达到正确认识和有效改造世界的目的(关于方法与方法论的详细论述请参阅:陈寿仙,2007)。

科学方法论对科学研究起着非常重要的指导作用。研究者只有在正确的办法论指导下,才有可能有效地产生正确的研究结果,以错误的方法论指导工作很可能使研究归于失败或造成谬误。科学家牛顿因创立了牛顿力学而闻名世界,但他缺乏正确的方法论指导,企图把一切现象都归纳为机械运动。正是机械唯物论这种错误方法论的主导,使他在后半生热衷于神学,而在科学上碌碌无为。科学家在研究方法上常常有自己独特的风格、特点和习惯,每一学派在研究方法上也有自身的特色和传统,每一学科在研究方法上也有独特的个性。研究方法

论就是要从各个研究者、各个学派、各个学科的研究方法和经验中,总结出带有共同性的、规律性的东西。方法论启迪和引导着人们的思想,指导着人们根据具体情况采用具体方法,避免走或少走弯路,更好地发挥人们的创造力,高效率地完成任务(陈寿仙,2007)。

方法和方法论之间有着根本性的区别,并不是把方法论所在学科范围的各种方法的简单堆积就是方法论,它需要抽取各种具体方法的共性,进行凝练和深化,它是在一定的原理、观点指导下所形成的系统化、集成化的体系;方法是方法论研究的对象,是方法论指导下形成的某一具体事物的研究思路和研究方式。但二者之间又存在密切的联系,如果没有方法论指导,方法的选择与设计就很可能散失针对性和有效性;如果只有方法论而没有具体的行动方法,则方法论就只能停留在泛泛而谈上而缺乏实际操作的“抓手”。

## 2. 方法论的层次和要素

方法论在不同层次上有具体科学方法论、一般科学方法论和哲学方法论之分。具体科学方法论是研究某一具体学科的方法,涉及某一具体领域。一般科学方法论是研究各门具体学科的方法,带有一定普遍意义,适用于许多有关领域。哲学方法论则是人们认识世界和改造世界最一般的方法理论。三个层次上的方法论大体呈现出个别、特殊、普遍的关系。首先,比较具体的各专门学科的方法论或方法学;其次,概括自然科学一般方法的自然科学方法论、概括社会科学一般研究方法的社会科学方法论和概括人文科学研究方法的人文科学方法论;最后,从哲学认识论高度来论述的更为一般的科学方法论(陈寿仙,2007)。三者之间互相依存、互相影响、互相补充,形成纵横交错的金字塔形结构,如图2.1所示。

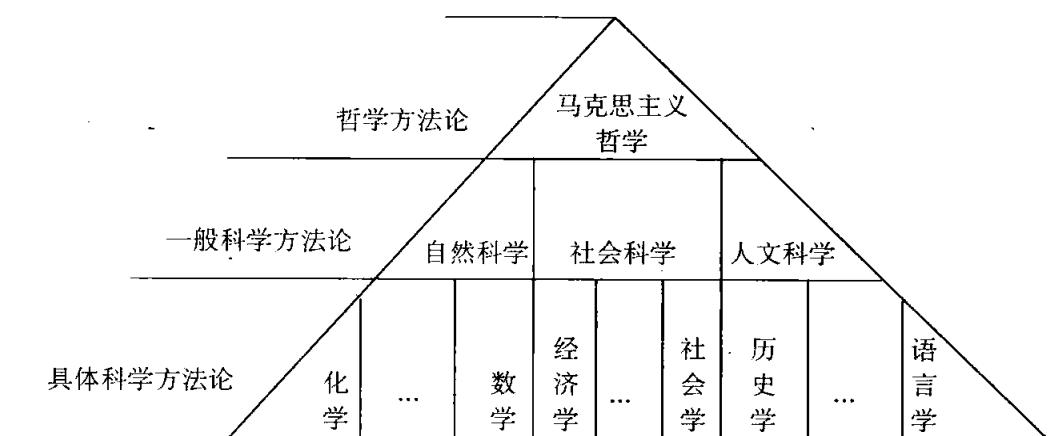


图 2.1 金字塔结构型的方法论层次结构

处于塔尖的是起决定性作用的哲学方法论——马克思主义哲学,它是各门科学方法论的概括和总结;是最一般的方法论;是人们认识和改造客观世界的武

器,对一般科学方法论、具体科学方法论有着指导作用。需要指出的是:科学方法论也是一个开放的、不断发展的,它通过具体的科学方法指导着科学的研究的全过程,并随着时代的进步、科学的发展而不断演进。另外,一般科学或具体科学在发展过程中会形成自己的研究方法体系,这一体系包括:(1)方法论;(2)研究方式,指的是研究所采取的具体形式或研究的具体类型;(3)具体方法及技术。以上各个部分之间有着紧密的内在联系。在社会科学的研究中,既要借用前人的科学方法,也要适时地创建新方法,下大力气推进方法论的创新。

方法论被理解为是关于科学认识活动的方式、形式和体系原理的学说。它要求阐明科学探索过程中各种要素及其相互关系的意义。这些要素包括(陈寿仙,2007):

- (1) 客体。它是主体认识和变革的对象,包括人、物以及精神性对象等。
- (2) 主体。是从事认识和实践活动的人,具有主体性和客观性。主体性体现主体认识、改造客观世界过程中的能动性和创造性,主体性决定了主体的多元性或多样性;客观性指主体是一切社会关系的总和,主体具有社会历史性,随着自然和社会的发展而发展。
- (3) 主体和客体的相互关系。包括改造与被改造、认识与被认识、评价与被评价的关系。人的主体性差异造成对客体的评价方式、认识方式和实践方式的差异,从而形成了不同的方法论,即科学方法论是受世界观所支配的。

### 3. 社会科学方法论

社会科学方法论是社会科学研究的方法论,它是有关社会科学研究的一般方法的理论与学说,或者说:社会科学研究方法论是人们研究社会经济系统的基本立场、基本假设和基本出发点。社会科学研究的方法论所探讨的主要问题包括:(1)社会经济系统中各种现象的性质及其理解;(2)社会科学研究的哲学基础及其假定;(3)社会科学研究过程和结果的客观性问题;(4)社会科学研究者的主观因素对社会研究的影响;(5)社会科学研究中的不同范式及其应用等等。

社会科学研究必须以一定的理论和方法为指导,但方法论并非是统一的。社会科学方法论大体上形成了实证主义和人文主义两大对立的学派。实证主义追求经验的客观证实,创始人是法国哲学家、社会学家孔德和英国经济学家、心理学家、哲学家穆勒。孔德和穆勒的实证主义,从某种意义上讲是一种社会哲学和社会科学方法论。在西方科学史上,孔德被称为“社会学之父”。孔德所说的“社会学”实际上就是包罗一切有关社会知识的社会科学。他们认为:社会科学只有运用“实证的哲学方法”,一切“以被观察到的事实为基础”,才是合乎逻辑的。从方法论意义来说,重要的是“确实的”和“精确的”,社会科学要以观察和事实为基础,把社会现象作为真正自然规律的东西来把握,这样它才能成为一门真

正的科学。社会科学在研究方法上必须依赖自然科学,把自然科学的“实证方法”作为自己的基本方法,以自然科学的实证精神作为自己的方法论基础。实证主义要求一切研究都必须应用自然科学的经验证实方法,才能做到像自然科学家绝对客观主义那样的“价值无涉”立场(黄新平,2004)。在研究方式上,定量研究是实证主义方法论的最典型特征。

人文主义的方法论则认为:研究社会经济系统中的现象和人们的行为时,需要充分考虑人的特殊性,考虑社会经济系统中的现象与纯粹的自然现象之间的差别,要充分发挥研究者在研究过程中的主观性。人文主义的创始人是狄尔泰和席美尔等人。他们认为:实证主义的主张导致了科学与人、与现实生活的疏离,主张追求哲学和社会科学的人文主义精神,从微观层次对个体进行深入的心理和意义分析,试图在经验研究的基础上建立独立的社会科学方法论体系(黄新平,2004)。在研究方式上,定性研究是人文主义方法论的典型特征。定性的研究方法似乎适合于对复杂现象作探索性研究,特别是在这些现象不太为人所知的时候,但正如我们在前面的回顾中所说,定性研究对复杂现象发生背后的原因进行说明时,缺少理论上的统一性和事实上的可检验性。

韦伯清楚地知道两种社会学方法论的局限性,企图创建一种新的方法论,能兼容并蓄两者的优势,又能克服它们的局限。韦伯把社会科学定位为“经验科学”,以区别于自然科学。他认为社会科学必须关注作为个体的人的生活现象本身,发掘这些生活现象的意义,而不是像自然科学那样去描述现象背后的一般规律和寻求因果解释。他认为:自然科学的方法难以适应社会科学研究的独特性,无法揭示行为背后隐藏的动机,也就无法解释行为背后的价值和意义。实际上,韦伯主张的是方法论的个体主义,结果是否定了社会或社会科学的客观性,进而否定社会科学预测社会未来进程的可能性(黄新平,2004)。

实证主义的和人文主义的社会科学研究方法论及其所形成的方法体系各有所长,二者交替地导引着特定历史时期的不同社会科学研究者的研究工作。虽然社会科学研究者在研究过程中有时可能没有意识到方法论的问题,但是,方法论始终影响着社会经济系统研究的整个过程。

### 2.2.2 系统复杂性需要的方法论

前文指出方法论是认识、分析和研究问题所遵循的途径和路线。方法论的革新和演进与人们认识客观世界的水平和技术有着紧密联系。随着科学技术水平的不断发展和人们认识世界的不断深入,历史上曾先后出现过不同的方法论,如:还原论和整体论等。而当人们越来越正视复杂性问题的时候,也提出了一些新的方法论。

## 1. 还原论

还原论(Reductionism)是主张把高级运动形式还原为低级运动形式的一种哲学观点。它认为现实生活中的每一个对象都可看成是更低级、更小的对象的集合体或组成物，并可以用低级运动形式的规律代替高级运动形式的规律。还原论派生出来的方法论手段就是对研究对象不断进行分解，恢复其最原始的状态，化复杂为简单(雷玉琼和许康,2002)。在还原论指导下，人们遵循着分析、分解、还原的途径，把整体分解为部分，把高层次分解为低层次，认为把一个个低层次或局部问题弄清之后，再把它们简单叠加、整合，高层次或整体问题就清楚了(于景元和周晓纪,2002)。

自从伽利略、牛顿开创了近代意义上的科学后，还原方法对科学的发展起过巨大的作用，至今仍然有着广泛运用。在相当长的时期内，还原方法作为非常有效的科学的研究方法，极大地促进了近代科学的兴起和发展，使人类对自然界的认识水平和控制能力大大提高。为了使问题的处理变得简单，还原方法通常基于如下一些基本假设(周维刚,2005)：

(1) 系统无演化性。这样的假设可以在对系统不同层次之间的还原过程中不考虑时间的演化，即不考虑时间的不可逆性。

(2) 系统具有可分解性。同类事物或非同类事物可以分解为更为基本的组分或元素，而在分解的过程中原有信息不会丢失。

(3) 系统组分间存在线性因果关系。还原方法假设还原过程中的事物间只存在线性的因果关系，一个事物的变化只引起另一个事物量方面的变化。

(4) 系统具有可叠加性。一个系统的整体功能只是其各个部分的功能的线性组合，简单叠加可以重构整体。

可以看出，在用还原方法研究客观世界时，包含了线性、静态、可分解性和可叠加性的本体论假设前提。社会科学研究中的还原论者认为：社会经济系统由可以被分解的部分所构成，而这些部分的简单组合又可以重构整体(周维刚,2005)。基于这样的假设，形成了把社会经济系统简化和分解为各个部分进行精细研究，形成越分越细的学科门类，而忽略了学科之间的联系。

新古典经济学就是建立在还原论基础上的，它基于完全理性和一致性偏好这些简单的假设，而对每个个体的需求函数和每个企业的生产函数进行叠加，得到社会总需求和总供给函数，求解一定外部环境下的最优控制或最优路径以及经济系统的均衡特征。新古典经济学忽视了所有与时间流逝有关的问题，即使讨论时间问题，也把时间看成是对称的或可逆的。

还原论方法作为社会科学研究的方法是必要且有效的，但它并不能保证我们能对社会经济系统获得充分的认识。还原方法有一定程度的适用性，不应该

把还原方法的功能无限放大。随着科学的发展和人类认识的进步,对社会经济系统中发生的种种复杂现象作出合理的解释和正确的理解变得越来越迫切和需要,但建立在还原论世界观和方法论基础上的社会科学无法满足人们的这种需求(周维刚,2005;张军,2006)。系统的整体性不完全是它各个组成部分的简单“拼盘”。还原论处理不了系统整体性问题,特别是社会经济系统的整体性问题。还原论方法把整体分解为部分,割断了部分之间的关联。这样,即使把每个部分都研究清楚了,也回答不了社会经济系统中整体性的问题(于景元和周晓纪,2005)。

## 2. 整体论

理论生物学家贝塔朗菲是对还原论方法的局限性认识得比较早的科学家。20世纪30年代,生物学研究已经到了分子层次,出现了分子生物学,但贝塔朗菲认为对生物整体的认识反而变模糊了,这使他转向整体论。经过多年研究,他提出了一般系统论方法,即整体论方法。但由于时代的限制,他没能解决整体论的具体问题,主要还是一种阐发概念居多的定性描述。仅就整体论整体,无法深入,解决不了问题。但整体论方法作为一种科学方法论,它的提出具有非常重要的意义,对推动系统科学的发展起了重要的作用(于景元和周晓纪,2002)。

整体论作为一种关于整体研究方法的方法理论,它认为:关于整体的学科、理论和定律等不能从关于部分的学科、理论和定律等中推导出来,只能从某种整体的研究方法中得到。但整体论是从整体到整体,不对整体进行分解还原。因此,整体论虽注重把握事物之间的整体关系,但由于缺乏一套具体方法体系,单就整体论整体,只能从定性到定性,不能深入把握事物本质,因而整体论在实际运用中更多的是一种理念和思维方式。

所以,对社会科学的研究,如果单纯强调整体论,缺乏对社会经济系统的各个组成部分的精细研究,只会局限于整体到整体的定性研究,而忽略部分与整体的关系,无法真正整体把握系统的整体性。

## 3. 综合集成:复杂系统方法论

从20世纪开始,人们对事物的认识开始从简单性、简单系统向复杂性、复杂系统转变,单就还原论方法或整体论方法都无法满足要求,因而需要方法论的突破和超越。20世纪70年代到80年代中期,国外出现了复杂性研究,在研究方法上确实有不少创新之处(于景元和周晓纪,2005)。例如:20世纪70年代,霍兰提出了遗传算法的基本定理“模式定理”(Schema Theorem),奠定了遗传算法(Genetic Algorithm)的理论基础。1975年,霍兰出版了描述遗传算法的名著《自然系统和人工系统的适应性》,在这一时期,还产生了Swarm软件开发平台、以Agent为基础的系统建模、用数字技术描述的人工生命(Langton, 1987)和人

工社会(Epstein and Axtell, 1996)等等。

20世纪70年代,我国科学家钱学森明确指出:“我们所提倡的系统论,既不是整体论,也非还原论,而是整体论与还原论的辩证统一。”也就是在认识复杂事物时,从系统整体出发将其进行分解,在分解后研究的基础上,再综合集成到整体,实现 $1+1>2$ 的系统涌现,最终解决问题(于景元,2006)。20世纪80年代末90年代初,钱学森又先后提出“从定性到定量综合集成方法”(钱学森等,1990)以及它的实践形式“从定性到定量综合集成研讨厅体系”,并将运用这套方法的集体称为总体部(于景元和周晓纪,2002)。钱学森的基本思想是在分析、组织和管理复杂系统(当然包括复杂社会经济系统)时,应从系统层面上研究和解决问题,为此,需要对不同领域、不同层次的信息和知识进行综合,需要采用人—机结合以人为主的研究方法,需要专家的合作和智慧的综合,需要从定性到定性定量结合再到从定性到定量的综合集成等等。

钱学森把这种“既非整体论,也非还原论,而是整体论与还原论的辩证统一”的方法论称为综合集成(钱学森,2001)。并认为综合集成是一种通过专家体系合作以及专家体系与机器体系合作的研究方式与工作方式。具体地说,是通过从定性综合集成,到定性、定量相结合综合集成,再到从定性到定量综合集成这样三个步骤来实现的。这个过程是一个循环往复、逐次逼近的过程(于景元,2006)。从这一过程可以看出:在逐次逼近过程中,综合集成方法论包含了用结构化序列逼近非结构化问题的思想。如图2.2所示(于景元,1998)。

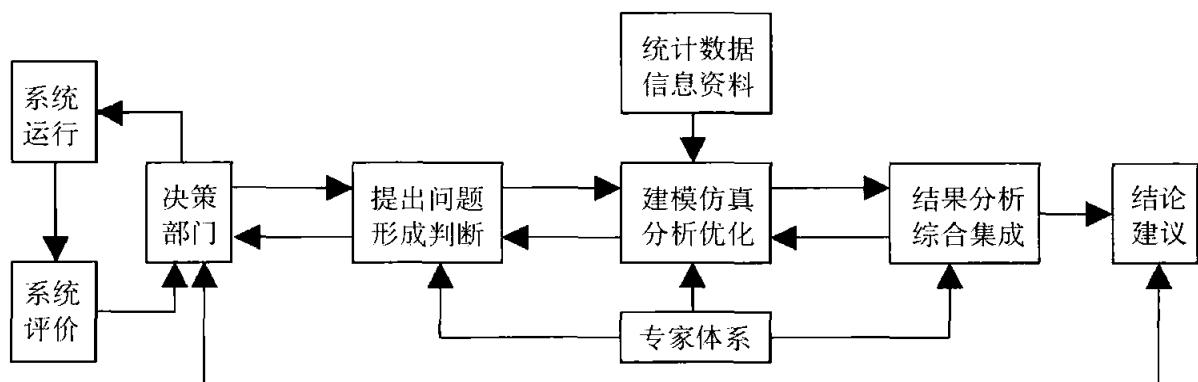


图 2.2 综合集成方法论体系图

综合集成方法论是钱学森教授在长期工程实践背景下,融合多学科、多领域的技术和方法,所提出的一种用来认识、组织、管理和驾驭复杂系统的方法论。从本质上谈,系统的复杂性主要来源于主体的认知能力、客体本身的组成和结构以及环境的开放。综合集成方法论在处置这类复杂系统时,具有如下优势:

(1) 主体可以通过集成各类资源而涌现新的能力,如集成专家的经验、知识

和智慧；

(2) 可以综合各类方法论求解问题,如定性与定量方法的结合、人机集合;宏观——微观——宏观、同步——异步——同步、分解——综合——分解等;

(3) 可以通过用一个比较无序、比较非结构、比较模糊、比较优化但不断改进、不断完善的系统序列实现对一个复杂系统的认识、组织与管理。

综上所述,综合集成方法论不仅是还原论和整体论的辩证统一,而且还融合了认识论、矛盾论和生成论的思想。在认识论上,它不仅强调客体的复杂性,而且也强调主体的认知能力的可改善性,不仅要研究认识和分析复杂事物的方法和工具,而且也要研究认识主体的能力提高的路径,如:专家的经验、知识和智慧、信息技术和人的结合、综合集成研讨厅和总体部等;在矛盾论上,它强调对立的辩证统一,专注于充满矛盾的事物,在方法和技术上强调多样性的统一,如同构与异构、分布与集中、组织与自组织、定性与定量、分析与综合、宏观与微观、有序与混沌等方面转化和融合,达到一种多力的平衡与升华;在生成论上,强调建构、反馈、迭代和优化,通过整合各类资源以至构建新的系统以适应复杂性管理的需要,并与周围环境建立一种可持续的动态平衡,在方法和技术上强调信息、资源、知识等从不充分向充分的转化,并以相对结构化的问题序列来逼近非结构化的问题。因而综合集成方法论在应对复杂系统的开放性、非线性、涌现和不可逆性等方面都具有较强的能力,如图 2.3 所示。

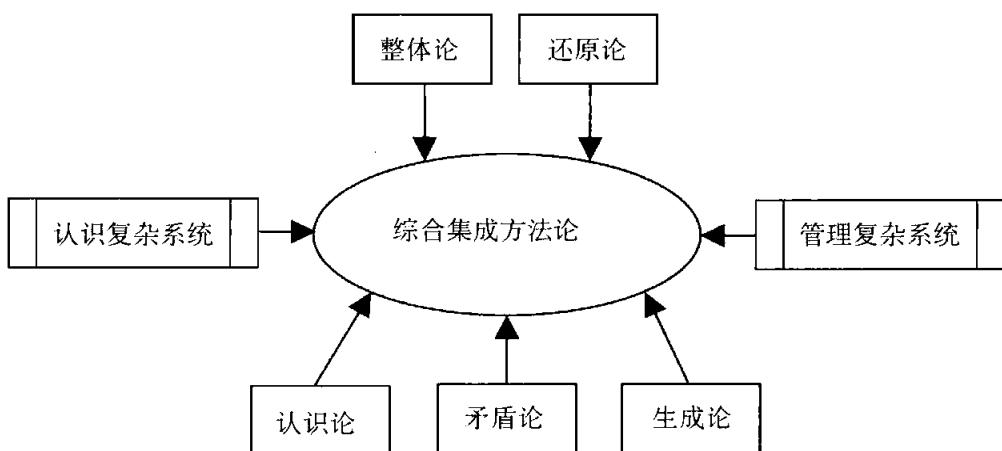


图 2.3 综合集成方法论内容图

#### 4. 综合集成与社会科学方法论

社会经济系统是一类复杂巨系统。从社会经济系统的构成要素看,存在要素多、要素的多样性和差异性等“显性”复杂性,但更多的体现在系统“隐性”复杂性上,如:社会经济系统具有动态开放环境、多元自主主体、多要素的非线性关联和初始敏感性等;从社会经济系统的管理来看,存在着多主体的利益和运作冲

突、社会资源的需求和供给之间的矛盾、信息不完备和重大决策困难、不确定性和要素紧密关联而引发的突发事件等挑战。因此,社会经济系统由于主体的适应性和智能性,系统的多层次结构性,系统与环境以及子系统之间的开放性,主体与主体、主体与系统中其他要素以及环境之间的非线性交互作用,使得它具有一系列的系统复杂性,如图 2.4 所示。

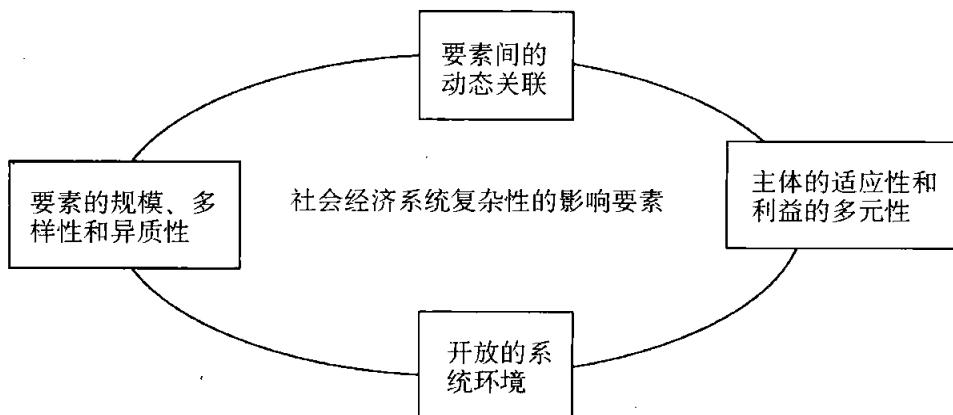


图 2.4 社会经济系统复杂性的影响因素

针对社会经济系统的系统复杂性,社会科学的研究必须做到:

- (1) 要考虑社会经济系统中人的自主性和自适应性;
- (2) 要重视社会经济系统中层级多、处于竞争和合作关系的节点多、总体结构复杂这一事实;
- (3) 要将对社会经济系统较低层次的微观机理的研究与宏观层面上的结构与整体绩效研究综合起来;
- (4) 要充分考虑动态环境,特别是非连续变化环境对社会经济系统宏观结构和微观行为演化的影响;
- (5) 要充分考虑环境等对社会经济系统研究及管理提出的新问题;
- (6) 要探讨新的研究方法论与方法,特别是由多种方法综合集成形成新的研究平台。

以上内容对研究方法提出了挑战,要求所用研究方法:

- (1) 能解决社会经济系统中非线性、多层次、多节点和异质性的问题;
- (2) 能体现社会经济系统自身的动态性、自主性、自组织和演化;
- (3) 能兼顾社会经济系统的分解与综合,实现微观和宏观的集成。

复杂社会经济系统的研究必然与人(包括研究者)的文化传统与哲学思维有着密切的关系,因此,探索并构建我们易于接受和行之有效社会科学方法论,作为解决社会经济系统中各种问题的原则,首先应在东方智慧和中国哲学思想宝库中凝练和提取。

以著名科学家钱学森教授为代表的我国系统科学家提出并不断完善的综合集成方法论对一般复杂系统,包括对社会经济系统的研究,都是具有原创性的方法论,具有重要而深刻的指导性。

下面是对这一结论的初步理解:

(1) 社会经济系统涉及经济、社会、管理及人文等各个领域。即使在一个领域内也不能指望只以一种理念、从一个角度、用一种方法、使一种工具、靠一部分人就能解决全部问题。这就需要我们在处理社会经济系统中的问题时,把自然科学、社会科学与人文科学相结合,如:在经济全球化时代,解决生态环境、能源、人口等全球性问题,必须依靠社会科学、人文科学和自然科学的通力合作。

多学科交叉融合已成为现代科学研究的大趋势。不仅有同一领域内不同学科的交叉、结合,更有不同领域之间,如:自然科学、社会科学和人文科学之间的相互结合与融合,这已成为现代科学技术发展的重要特点。当代新兴学科如计量经济学、计量地理学、管理科学、人口学、环境伦理学、非线性科学、复杂性科学等等,无不是多学科交叉融合的产物。亚当·斯密的《国富论》也是经济学和伦理学融合的产物。

复杂社会经济系统既有自然属性,又有社会属性和人文属性。在这种情况下,需要把自然科学、社会科学和人文科学综合集成起来研究社会经济系统的问题,而不是把它们分割开来,仅从自然科学角度或仅从社会科学、人文科学角度去研究,然后,再“拼装”起来。

(2) 关于“综合集成”,虽然钱学森当初重点提出了“从定性到定量”和“研讨厅”概念,但从综合集成的核心思想出发,可以认为,“综合集成”本质上是多种方法论的“综合”和“集成”。这些方法论如:

定性、定量方法的结合;  
经验、知识与智慧的融合;  
数据、信息与知识的聚集;  
人、机结合,以人为本;  
总体—局部—总体的思考;  
宏观—微观—宏观的思维;  
结构化与非结构化模型综合;  
同步—异步—同步;  
同构—异构—同构;  
分析—实践—综合—再分析……  
静态—动态—静态……  
等等。

(3) 社会经济系统的研究要处理各种意义上的多样性,协调各方面的差异和冲突,做好不同部分的耦合、不同阶段的衔接、不同行为的和谐、不同形态的平滑,以及整合系统中大量的分布式、异构体及非同步要素,这就需要运用各种方法论的“综合集成”才能满足这一要求。

(4) 社会经济系统中的问题,不能仅仅依靠定性或定量方法来解决,有效的方法是定性与定量相结合,采用人机结合以人为主的技术路线,实现对系统从定性到精确定量的分析和认识。在社会科学的研究中,我们可以根据定量分析的结果,建立各类系统模型(充分利用计算机技术),而对系统中人的认知、心理和行为等因素的刻画,必须在实践、实验和经验的基础上,充分利用专家定性的经验与知识。这一过程包括了科学和经验的知识、理性和感性的知识、定性与定量的知识的综合,实现从经验到理论、从定性到定量的发展,达到对某一问题整体的精确认识。

(5) 处理复杂社会经济系统问题需要处理大量的数据、信息与资料,在这方面,计算机拥有明显的信息处理、加工方面的优势,如信息处理的速度、信息存储的量、逻辑思维、定量处理能力方面等等都有超越人的地方。但是,处理社会经济系统问题还需要形象思维,需要定性和宏观地处理信息,更加重要的是,还需要把逻辑思维和形象思维相融合,产生创造性思维。显然,对于这一目标,单纯地依靠人或单纯地依靠计算机都有其局限性和不足。钱学森认为:“逻辑思维,微观法;形象思维,宏观法;创造思维,宏观与微观相结合。创造思维才是智慧的源泉,逻辑思维和形象思维都是手段。”计算机擅长逻辑思维,但在形象思维、创造思维方面,现在的计算机还不能给人们以任何帮助。我们目前还不能指望计算机在形象思维,特别是创造性思维方面对处理社会经济系统的复杂性问题有实质性的帮助。所以,在人机结合过程中,在许多重要的、关键的地方还得主要依靠人的知识和智慧,即还得“以人为主”。在社会科学的研究中,如果把计算机的逻辑思维和研究者擅长的形象思维、创造思维结合起来,形成人机结合、以人为主的思维方式,它的智慧和创造力比人要高,比机器更高。

(6) 综合集成对复杂社会经济系统的刻画表现为一个动态过程,这一过程充分反映了对一个复杂社会经济系统的逐步认识、对一个复杂系统(综合过程本身形成的系统)的设计、协调和组织,因此,它必然是一个实践—认识—再实践—再认识——的螺旋式逼近过程。在这一过程中,研究者逐步减少了对系统认识的模糊性与不确定性,增强了关于社会经济系统认识的知识、智慧和驾驭能力,因此,可以认为,综合集成的过程就是通过用一个比较无序、比较非结构、比较模糊、比较优化但不断改进、不断完善的过程序列实现对一个复杂社会经济系统的刻画和研究。

(7) 综合集成要能成为社会科学研究的方法论,运用到社会经济系统还需要升华和发展。综合集成方法论作为研究复杂系统或开放的复杂巨系统的方法论,毋庸置疑对社会经济系统的研究具有重要而深刻的指导性。但社会经济系统被称为开放的特殊复杂巨系统(钱学森,1982),与一般复杂系统相比,具有自身的共性和特殊性(见第一章的论述)。因此,社会经济系统应该有符合自身特性的方法论。它的上层是综合集成方法论,它的再上层是马克思主义唯物主义方法论,它的下层是各个子系统具体的方法论。综合集成方法论也是不断开放、发展的,它是随着具体的科学方法和具体复杂系统的研究发展而不断发展的。综合集成方法论对社会科学研究方法论具有直接指导作用,在社会科学方法论的探索过程中,必须在上层方法论的指导下,把综合集成方法论与社会经济系统的特殊性和社会经济系统的实际结合起来,再次进行抽象上升到具体的思维过程,发展具体的方法论、方法、技术和手段,并形成一套关于复杂社会经济系统研究的方法体系。

(8) 由上可以看出,综合集成是一种关于复杂系统的方法论,对社会经济系统的方法论具有重要的指导作用,但将综合集成思想运用到复杂经济系统中时,还要设计、创造相应的方法体系和技术,形成一套研究模式。值得指出的是,当前重要的是要鼓励应用综合集成方法论于社会科学研究之中,并在实践中积极探索和创新,要深刻掌握、凝练社会科学研究的“综合集成”思想,切忌简单化地把“综合集成”一些基本名词、概念作为“标签”。

## 2.3 社会科学研究中的人工社会方法

### 2.3.1 人工生命简介

#### 1. 人工生命的定义与基本思想

自然生命通常指的是自然繁殖、生长、进化的地球生命,如人及各种动物、植物。人工生命,即人造生命,是指具有生命特征的人造系统(涂序彦和尹怡欣,2004)。人工生命是20世纪80年代后期开始兴起的一种新的科学技术领域,也是计算机科学新的发展方向之一。1987年,在美国Los Alamos召开的第一次“人工生命”研讨会上,朗顿(Langton)高度总结和提炼了人们关于人工生命的各种见解,描述性地给出了人工生命学科的定义,对于推广和深化人工生命的研究起到了积极作用。他认为,人工生命是关于显示自然生命系统行为特征的人造系统的学科,并试图以综合方法在计算机和其他人工媒体内的类似生命行为来

补充有关有机体分析(黄欣荣,2007)。涂序彦和尹怡欣(2004)指出:人工生命是研究怎样通过抽取生物现象中的基本动态规律来理解生命,并且在如计算机这样的物理媒体上,重建这些现象,并操纵这些现象。

李建会(2002)把人工生命的主要思想归结为:

(1) 人工生命所用的研究方法是集成的方法。人工生命不是用解剖分析的方法来理解生命,而是在人工系统中合成似生命的过程和行为来研究生命,是采用综合集成的方法。

(2) 人工生命是关于一切可能生命形式的生物学。地球上的特殊的以水和碳为基础的这种我们所知的生命并不是人工生命的主题。人工生命研究的是“生命的本来面目”。由于传统生物学仅仅是建立在地球上的生命这样一种实例的基础上,导致它在经验上太受限制而不能创立更为一般的理论。人工生命提供了一种新的思路,它认为,进化可能建立在更普遍的规律之上,只有在更为广泛的意义上考察“我们所知的生命”,才会真正理解生物的本质。

(3) 生命的本质在于形式而不在于具体的物质。生命虽离不开物质,但是生命不由构成它们的具体物质决定。生命的本质在于形式,是一个过程而不是具体的物质。人们因此可以忽略物质,抽象出控制生命的逻辑。如果我们能够在其他物质中获得相同的逻辑,我们就可以创造出不同材料的另一种形式的生命。

(4) 人工生命中的“人工”是指它的组成部分。人工生命的计算载体、计算规则等是人工的,但它们的行为并不是人工的,人工生命展示的行为则是人工生命自己产生的。人工生命与真正的地球生命相比,只是物质载体的不同。

(5) 自下而上的建构。人工生命的合成的实现是以计算机为基础的,按照“自下而上编程”的信息处理原则来进行。人工生命中的自下而上的方法模仿或模拟自然中自组织的过程,从简单的局部交互和控制出发,让行为从底层涌现出来。

(6) 并行处理。人工生命采用并行处理的方式来构建生命信息,处理原则是基于发生在实际生命中的大量并行处理过程。

(7) 涌现是人工生命的突出特征。“涌现”一词用来指称在复杂的、非线性的形态中许多相对简单的单元彼此相互作用时产生出来的引人注目的整体特性。人工生命允许在较高层次突显出新的不可预言的形状和现象,这对研究实际生命系统来说是很关键的。

(8) 真正“活的”人工生命总有一天会诞生。从某种意义上说,如果生命可以抽象为只是组织问题,那么一个组织完善的实体,无论它是由什么介质构成的,都应当是活的。因此,朗顿确信,“真正的”人工生命总有一天会诞生,而且会

很快诞生。

## 2. 人工生命的发展历程

人工生命源于人工智能,其早期历史可以说是并行的。早在 20 世纪 40 年代,约翰·冯·诺依曼就开始对机器是否能自我复制这个问题非常感兴趣。50 年代,Penrose 曾讨论用机械的方法制造可以自繁殖的机器。这些开拓者们认为蛋白质仅仅是生命的一种载体,完全可以采用其他物质作为生命的载体。他们试图建构的一些生命形式中,一部分表现出有新陈代谢、遗传、变异、适应性、生存竞争等生命现象,如进化论学者 T. Ray 提出的数字生命(Tierra);另一部分表现为有类似于生命特征的复杂的信息处理系统,如“人工脑”和“进化机器人”(张永光,2000)。20 世纪 70 年代,康韦(Conway)生命游戏将人们带进一个全新的世界。揭开元胞自动机研究序幕的是物理学家沃弗拉姆(Wolfram),他研究了简单一维的元胞自动机的所有规则,发现了著名的 4 个等级(闫广武,2003)。

在康韦、沃弗拉姆等人有关“生命游戏”研究的基础上,圣塔菲研究所的朗顿博士发现,处于“混沌边缘”的元胞自动机,具有类似于生命和智能的特征。朗顿认为生命可能起源于“混沌的边缘”。在法默(Farmer)和圣塔菲研究所的支持下,朗顿于 1987 年筹备和主持了第一次“人工生命”国际会议,与会一百六十多名科学家展示了多种可以在电脑上演示的、具有生命特征的系统,以及他们对人工生命的理解。提交的论文以《人工生命》为题出版(Langton, 1989)。这次会议的成功标志着人工生命这一崭新的研究领域正式诞生,并推动了人工生命研究和开发的热潮(黄欣荣,2007)。

近十几年来,关注这个领域的专家学者越来越多,既有来自于系统科学、计算机科学、人工智能、控制科学、生物科学等领域的,也有来自于部分社会科学领域的。如今,在美国、欧洲及日本这方面的研究极其活跃。当前,国际上主要有三个专门的系列学术研讨会。一个是美国的 ALIFE(Artificial Life),主办了多次国际研讨会,另一个是欧洲的 ECAL(European Conference on Artificial Life),也多次主办人工生命的研讨会来响应这个新领域的挑战,还有一个是日本的 AROB(Artificial Life and Robotics),人工生命的研究紧密地和进化机器人的研究结合在一起,并召开了以此为主题的系列研讨会。除此以外,IEEE 也曾召开相关内容的国际会议,如 Evolutionary Computation 及 Simulation and Adaptive Action Conference。1997 年 9 月在北京举行的“人工生命与进化机器人研讨班”是在我国开展的第一次相关学术活动(张永光,2000)。

## 3. 人工生命的应用领域

人工生命作为一门涉及生物学、计算机科学、认知科学等多个学科的交叉学科,20 世纪 90 年代以来,许多不同研究背景的研究者从事人工生命的研究并在

各自的领域取得了显著的成果(关于人工生命的应用领域请参见:张永光,2000;欧阳红晋,2004)。

### (1) 数字生命研究

所谓数字生命专指那些以计算机为工具和媒体、计算机程序为生命个体的人工生命的研究。这方面以汤姆斯·雷的数字生命世界 Tierra 为典型代表。汤姆斯·雷把生物学上有关机体进化的概念引进计算机领域,用数字计算机为他的数字生命提供一个数字生存环境。他设计的数字生命以数字为载体,探索进化过程中所出现的各种现象、规律以及复杂系统的突现行为。数字生命被设计为适合在这样的环境中生存的某种数字代码程序。这个程序能够自我复制,并且被执行。通过对资源的占有来体现它在进化过程中的优势地位(Warren, 1990)。在 Tierra 的运行中,随着世代的推移,生命体呈现出复杂的现象,种类日趋增多,同时“单细胞”往“多细胞”方式进化,形成自己的生态环境。它遵循着遗传和进化的规律,为考查生物的进化现象和为复杂系统的研究提供了一个实验手段。

### (2) 数字生态环境

挪威的基思·唐宁(Keith Downing)提出了名为“欣快区”EUZONE(Euphotic Zone)的可进化的数字生态环境。它利用具体的物理和化学模型,结合进化规则,利用计算机建构以碳元素为基础的数字水中生态环境,以观察生态系统是如何从原始状态进化,低等动物的形体的进化及生存的竞争,以及复杂生态系统的涌现行为。数字“欣快区”具有两个基本的计算过程:反映真实世界的物理、化学以及生物之间的相互作用的环境模拟和由遗传算法等方法来实现的生物进化模拟。

### (3) 人工脑

日本 ATR 的进化系统部(Evolutionary Systems Department)致力于开发具有自治能力和创造性信息处理系统,这种新系统被称为“人工脑”(Artificial Brain)。人工脑被设计成能够自发地形成新的功能,也能够自主地形成自身的结构。“人工脑”的研制者并不是单纯地再现生物大脑的功能和结构,而是期望通过自治和创造得到在某些方面优于生物大脑的信息处理系统。人工脑的研究采取了两条技术路线:类似生命的模型(Life-like Modeling)和社会模型(Social Modeling)。在类似生命的模型中,系统有一个类似于生命系统中胚胎发育的功能,让系统的结构和组成单元能够发生变化。在社会模型中,系统被视为是一个动态过程,局部的各个单元之间的连接使得整体的、全局的功能发生突现。另一方面,各个单元也受到全局状态的影响,因此,从宏观到微观和从微观到宏观的两个方向共同影响着系统变化。

#### (4) 进化机器人

罗德尼·布鲁克斯提出了基于行为的机器人设计理念,设计出了比传统设计方法优越,行动更快和更灵活的进化机器人(Evolutionary Robotics)。进化机器人的操作方式是自律型的,其“智能”由各个并行执行的、分散在整个系统中的小过程自组织涌现形成。对于同一任务,其编码的长度可以是传统设计方法的千分之一。进化机器人具有比传统机器人更快的速度和更好的灵活性和稳定性,进化算法可以比较容易地植入到这样的系统中。

Floreano 和 Mondada 成功地用 Khepera 机器人实现了一个进化系统。1990 年, Pattie Maes 用强化学习策略(Reinforcement Learning)实现六足 Genghis 机器人的步调协调,Takashi Gomi 用进化的方法在八足 OCT-lb 机器人上实现步调协调。进化机器人是机器人设计的一个新的方向,它把人工生命的概念和思路引入到这个领域。

#### (5) 虚拟生物

人工生命原理以及高级计算机技术的出现使得人们从 20 世纪 90 年代早期开始研究视觉创造过程(Visual creation process)。在 1993—1994 年,Christa Sommereer 和 Laurent Mignonneau 介绍了他们的第一个交互式计算机装置(Interactive computer installations)“A-Volve”,访问者可以自己创造人工生物,与它们交互作用且看着它们进化。在实时交互式环境“A-Volve”中,访问者可以与在一个充满水的玻璃缸中活动的虚拟生物进行交互作用。进化规则以及人的控制影响着这些虚拟生物的形成。人们可以按照自己的想法通过手指在接触屏上设计图形来产生三维的虚拟生物,设计的生物自动“成活”并且在水中游动。1995 年,他们又发展出另一个系统“Phototropy”,访问者可以通过饲养并使它们繁殖,实现与虚拟昆虫的交互作用。1996 年,他们开始研究虚拟生物的建构模块,考虑简单结构是如何通过遗传操作形成复杂形态的,并给出了“遗传操纵器”。在这个系统中,可以使人们从微观层次操纵虚拟生物的形成,允许人们可以实时地操纵虚拟基因,可以设计、操纵和探索人工昆虫的设计和形状。

#### (6) 数字社会和人工社会智能

数字社会有时也称人工社会,最初由 Epstein 和 Axtell(1996)提出。一个数字社会通常包含一群具有自治能力的行为者和一个独立的环境;管理者与行为者之间、行为者与环境之间,以及环境与多个不同要素之间相互作用的规则。人工社会智能是 90 年代计算机科学中人工智能(AI)中出现的一个重要分支,主要研究在有限制和不确定情况下,以及相互绑定的资源组成的实际环境中,如何通过推理和动作,使系统在开放的不确定世界中与其他系统实现合作或竞争。

目前,人工社会和人工社会智能吸引了自然科学和社会科学各个相关领域

众多的专家学者。人工生命方法用于研究生命或生态系统的组织结构、功能及其行为特征,为研究复杂系统的演化过程提供了一个非常有用的工具。我们将在后面详细阐述这一研究领域。

### 2.3.2 人工社会方法与评述

#### 1. 人工社会方法

在计算机中构造的人工生命可以代表鸟、鱼、蜜蜂、蚂蚁等动物,同样它也能够代表人。人工社会正是建立在这个基本出发点上,其基本思路是:由于社会经济系统是由大量的个体构成的复杂系统,因而可以在计算机中为每个个体建立模型,这样的描述个体的数字化模型被称为 Agent;然后让这些 Agent 在一定的简单规则下相互作用;最后通过观察这群 Agent 整体作用的涌现性探寻人工社会的演化规律,并用这些规律诠释现实社会中的宏观现象。由此看出,人工社会是一门集成了计算机科学、社会科学和系统科学等的交叉学科。人工社会开辟了一条认识和理解社会经济系统的新路(张江和李学伟,2005)。

人工社会系统在虚拟的环境中引入社会化功能,它允许 Agents 在一个共享的环境中共存,并且在与其他 Agents 交互的情况下达到自己的目标。人工社会系统构建了一个能让 Agents 通过计划、学习和行动来到达其目标的体系结构。人工社会智能领域的基本问题是如何来设计人工 Agents 和环境,通常需要处理以下几个问题(欧阳红晋,2004):

- (1) 人工 Agents 之间如何交流?
- (2) 人工 Agents 之间如何传输信息?
- (3) 如何评价解决冲突方法对人工 Agents 的适合性?
- (4) 对于影响 Agents 结构的问题如何处理?

针对以上问题,在设计人工 Agents 及其环境时大致有以下三条处理的原则:

- (1) 以个体的社会动作和思想为基础刻画社会性合作、竞争。
- (2) 在构建模型和增加合作时,除了考虑认知、通信和赞同外,还需考虑认知前的突现行为和合作的突现形式。
- (3) 将人工智能、认知科学、控制科学和生物科学等学科集成创新性地解决问题。

#### 2. 人工社会方法在社会科学研究中的进展

Axelrod(1984)在计算机的虚拟环境中举行了一场囚徒困境竞赛实验,展示了在一个竞争环境中如何自发涌现出“合作”现象,还说明了在复杂多变的环境中,“针锋相对”这个简单的决策能取得很好表现,从而揭示了一个深刻的社会学

道理。这个实验首开了人工社会应用的先河。

1987年,Arthur和Holland合作构建了基于不完全信息、有限理性下的人工股市模型(Artificial Stock Model)。模型中的Agent可以通过不断地学习历史信息,修改自己对股价走势的预期,该模型真实地模拟了现实股市,得到了比传统数理模型更加丰富的结论(Arthur et al., 1996)。

Gilbert和Conte(1995)收集整理Agent技术用于社会科学各个领域的论文,出版了《Artificial societies – The computer simulation of social life》一书,标志着人工社会被正式提出并变成了一个相对独立的社会科学领域。

Epstein和Axtell(1996)两人合作完成了一个典型的人工社会模型——糖域(Sugarscape)。通过Agent不断地自主变换决策规则,观察各种各样的社会现象。该模型验证了传统经济学预言的市场均衡条件难以满足,揭示了传统经济学的局限性。

近年来,人工社会已经成为国外众多学者感兴趣的前沿研究领域,主要有:研究环境变迁、遗传继承、贸易往来以及市场机制等社会现象的糖域(Sugarscape)模型(李建会和张江,2006);研究巴基斯坦从军政府向民主政府演变过程的巴基斯坦像素模型(董晔弘,2004);以及研究城市道路交通问题的TRAMSINS模型(卡斯蒂,1998);研究宏观经济,如贷款利率、家庭购买力、GDP等走势的ASPEN模型(Springer et al., 2004);研究天花感染传播的EpiSims模型(Barrett et al., 2005);基于多Agent的供应链模型(Chan and Chan, 2005; Jiao et al., 2006; Wang et al., 2006; Kwon et al., 2007);组织理论(如组织学习、组织结构、组织成长等)(Barr et al., 2006; Barr and Saraceno, 2005; Chang and Harrington, 2003; Epstein, 2005; Scheurer, 2007; Wang et al., 2007)等等。

目前,我国的社会科学工作者对这个领域做了一些介绍和探索性的研究,对这个领域的兴趣变得越来越浓厚。

韩筱璞等(2004)用元胞自动机构建了研究国家领土面积和整体实力分布的国家演化模型。

王飞跃和史帝夫·兰森(2004)介绍了人工社会研究工作的内容、方法及其思想基础,并对其应用和未来趋势进行了展望;王飞跃(2004,2005)利用大型计算将计算机作为社会经济系统的实验室,通过整合人工社会,计算实验和平行系统等方法,形成复杂社会经济问题的计算研究理论和方法体系,并结合复杂系统的理论和方法,建立人工人口系统,研究人口政策的评估以及人口的控制与管理。

张江和李学伟(2005)介绍了人工社会及其在社会学领域中的应用,然后就人工社会建模方法、步骤、特点以及与传统社会科学研究方法的对比进行了

评论。

2005年11月,在北京召开了香山科学会议第269次学术讨论会。与会专家认为:人工社会与社会计算很有发展前途,值得研究,并提出了基于Agent人工社会建模的建议。

罗批等(2006)基于人工生命的思想,对战争系统构建人工社会,旨在通过建立人工社会对某些战争复杂问题进行研究,为决策分析提供辅助。

崔霞和戴汝为(2006a; 2006b)阐述以人为中心的综合集成研讨厅人工社会的基本理论,讨论了基于Agent的人机结合综合集成厅人工社会的设计重点,包括以人为主的社会基元,知识生产和智慧涌现,以人为中心的数据制成体系,有效交互和组织,以及面向组织的多智慧体社会逻辑设计。

顾佳和贺仲雄(2006)讨论了由人工生命Agent组成的人工社会,利用人工涌现实现虚拟人工社会的和谐仿真,并利用集对分析中的集对方法SPM及其合成达到Agent与事、物之间的和谐。

李刚和邢书宝(2007)基于多Agent人工社会建模,在遗产继承和子辈发展方面对原始Sugarscape模型做了改进,借助REPAST软件平台,仿真研究固定资源下对不同数量人口的支撑作用,展示了社会财富、个体生活水平以及社会福利随人口变化的关系。

卢良进等(2007)提出了一种跨节目的协助媒体分发模型。该模型通过人工社会网络把合作节点的范围从单个节目扩展到全局覆盖网络,在节点间建立持久的信任与合作关系,充分利用空闲带宽,以主动和被动两种协助方式提高播放流畅度,并引入针锋相对机制激励节点参与协助,实验结果表明该模型能进一步提高服务质量。

南京大学工程管理学院于2002年建立演化经济理论与应用计算实验室。以盛昭瀚为核心的研究团队近年来致力于学科的互动与整合,在人工社会方法的基础上,以综合集成方法论为指导,开展了计算实验的体系、功能和框架的研究和设计,并将其应用于社会经济系统问题的研究,取得了一定的进展,建立了南京大学社会科学计算实验中心。目前已在管理学、经济学、社会学、组织行为学等领域开展了研究。

### 3. 评述

人工社会方法采用复杂系统中的自下而上的建模方法,结合人工智能、Agent技术、计算机仿真等来研究社会经济系统中的问题。目前,虽然人工社会还没有形成一个完善的理论体系,然而它已经深深地渗透到了经济学、管理学、社会学、组织理论、传播学、公共政策等社会科学领域,并成为社会科学研究的一种重要方法。

人工社会方法通过对社会经济系统进行抽象并建立起计算机中的模拟社会。张江和李学伟(2005)认为:一般人工社会模型对于 Agent 的抽象规则往往是非线性的、复杂的,这与复杂社会经济系统主体之间的非线性交互作用是一致的;人工社会方法利用计算机这个天然的分析复杂的非线性作用的有力工具,克服了数理模型推理、证明存在的局限,即数学推理论证由于依靠的是人的脑力而不太可能理清多个变量、错综复杂的非线性相互作用规律;Agent 之间通过简单的规则不停交互的结果能够涌现出比数理方法预言更多的结论,能够提供对社会系统本质的洞察和理解;人工社会方法为社会经济系统中各种问题的观点提供了实验的平台,人们完全可以放弃无谓的词语上的争论,而运用计算机模拟方法达成共识。

建立好人工社会模型后,人们通过不断地变换 Agent 遵循的规则来方便地进行各种各样在真实世界中无法完成的社会科学实验。人们以前无法观察到的像原始经济的起源这样的社会经济系统现象,都可以用人工社会模拟来观察其诞生和演化过程,从而帮助人们更加深刻地理解这些现象。但总的说来,目前人工社会这一研究方法还没有针对社会经济系统这一特殊的开放复杂巨系统的特点提升出相应的方法论,即缺乏针对性强的方法论的指导。另外,人工社会方法及其应用尚存在如下局限:

- (1) 人工社会方法一般难以对真实系统准确预言;
- (2) 偏重于理论研究,离实际应用还有较大距离,所以在方法上还应注重虚实结合;
- (3) 在研究中,许多学者还处于把它作为一种自然科学方法简单套用到社会科学研究中的阶段,还没有做到把它当成一种工具来使用,忽视了社会经济系统中问题的背景和变量的经济含义,这样做的结果难免牵强附会,难以取信;
- (4) 人工社会中的计算模型大多忽略了与现实的联系。比如模拟退火算法和遗传算法等计算模拟算法最初是为了不同的目的发展起来的,研究者在用来研究社会经济系统中的问题时,往往没有充分解释与实际组织和过程如何联系。再如,采用人工社会方法来研究组织问题时往往脱离实际,如 Epstein(2005)采用自下而上的人工社会方法来研究组织规模的演化,涌现出了不同的组织结构,但是其产生新管理层的方式与实际是不相符合的;
- (5) 采用人工社会方法来研究社会科学问题,目前还很难做到像数理方法那样有迹可寻。这也是许多主流学者对这一研究方法,甚至对于整个基于计算机仿真模拟的方式表示怀疑的原因;
- (6) 人工社会方法中规则的设定是否科学合理,对研究结果信度造成较大影响,某种程度上难以避免研究者的观点反映在其研究方法甚至结果之中,因为

规则通常是由研究者设定的。

## 参 考 文 献

- Adami, C., Introduction to artificial life. Springer Verlag, 1998.
- Arthur, W. B., Holland, J. H., LeBaron, B., Palmer, R., Tayler, P., Asset pricing under endogenous expectations. Santa Fe Institute, 1996.
- Axelrod, R., The evolution of cooperation. New York: Basic Books, 1984.
- Barr, J., Hanaki, N., Tassier, T., Firm organization in complex and uncertain environments. The Third International Meeting “Complex Behavior in Economics: Modeling, Computing and Mastering Complexity” COMPLEXITY 2006, Aix en Provence, France, 17~21 May 2006.
- Barr, J., Saraceno, F., Cournot competition, organization and learning. Journal of Economic Dynamics and Control, 2005, 29:277~295.
- Barrett, C. L., Eubank, S. G., Smith, J. P., If Smallpox strikes portland. Scientific American, 2005, 292(3):42~49.
- Chan, H. K., Chan, F. T. S., Comparative analysis of negotiation based information sharing in agent-based supply chains. 2005 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2005, 813~818.
- Chang, M. H., Harrington Jr., J. E., Multi-market competition, consumer search, and the organizational structure of multi-unit firms. Management Science, 2003, 49:541~552.
- Creswell, J. W., Qualitative inquiry and research design: Choosing among five traditions. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, Inc., 1998.
- Denzin, N. K., The research act. New York: McGraw Hill, 1978.
- Denzin, N. K., Lincoln, Y. S., Handbook of Qualitative Research. Thousand Oaks, CA: Sage, 1994.
- Epstein, J. M., Axtell, R. L., Growing artificial societies: Social science from the bottom up. New York: The Brooking Institute Press and the MIT Press, 1996.
- Epstein, J. M., Generative social science: Studies in agent-based computational modeling. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2005.
- Forbes, N., Life as it could be: A life attempts to simulate evolution. IEEE Intelligent Systems, 2000, 15(6):1~6.
- Gabrielian, V., Qualitative research methods: An overview. In Miller, G. J. and Whicker, M. L. Edited. Handbook of Research Methods in Public Administration. Marcel Dekker Inc. New York, 1999.
- Gilbert, N., Conte, R., Artificial societies, the computer simulation of social life. University College London Press, 1995.
- Glaser, B., Strauss, A., Discovery of Grounded theory. Chicago: Aldine, 1967.
- Holland, J. H., Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press, 1975.

- Jiao, J. X., You, X., Kumar, A., An agent-based framework for collaborative negotiation in the global manufacturing supply chain network. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2006, 22: 239~255.
- Kazerooni, H., Compliance control and unstructured modeling of cooperation robots. Proc. 1998 IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, Philadelphia, 1998: 38~56.
- Kwon, O., Im, G. P., Lee, K. C., MACE - SCM: A multi-agent and case-based reasoning collaboration mechanism for supply chain management under supply and demand uncertainties. *Expert Systems with Applications*, 2007, 33(3): 690~705.
- Langton, C. G., Artificial life. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1989.
- Langton, C. G., Studying artificial life with cellular automata, evolution, games, and learning: Models for adaptation in machines and nature. Edited by Farmer D. et al. Elsevier Science, Amsterdam, Holland, 1987.
- Leonard-Barton, D., Implementation as mutual adoption of technology and organization. *Research Policy*, 1988, 17: 251~267.
- Marshall, C., Rossman, G. B., Designing qualitative research. Thousand Oaks, CA: Sage, 1995, 2nd edition.
- Patton, M. Q., Qualitative evaluation and research Methods. Newbury Park: Sage publications, USA, 1990, 2nd ed.
- Watson, R. A., Pollack, J. A., Modular interdependency in complex dynamical systems. *Artificial Life*, 2005, 11(4): 445~457.
- Scheurer, F., Getting complexity organized using self-organization in architectural construction. *Automation in Construction*, 2007, 16: 78~85.
- Sprigg Jr., J. A., Jorgensen, C. R., Pryor, R. J., Approach and development strategy for an agent-based model of economic confidence. Sandia Report, Sand 2004 - 4218, 2004. 08.
- Sprigg Jr., J. A., Ehlen, M. A., Full employment and competition in the Aspen economic model: Implications for modeling Acts of Terrorism. Sandia Report, Sand 2004 - 5500, 2004. 12.
- Vacherand, F., Fast local path planning in certainty grid. Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1994: 2132~2137.
- Wang, D. S., Nagalingam, S. V., Lin, G. C. I., Development of an agent-based virtual CIM architecture for small to medium manufactures. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23, 1~16.
- Wang, G. H., Jiang, X. Y., Yu, T. B., Gong, Y. D., Wang, W. S., Research on supply chain negotiation under networked manufacturing environment. Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA'06).
- Warren, C. W., Multiple robots path coordination using artificial potential fields. Proc. Of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1990: 500~505.
- Zanichelli, F., Caselli, S., Natali, A., Omicini, A., A multi-agent framework and programming environment for autonomous robotics. IEEE Conf. Robotics and Automation, 1994: 3501~3507.
- 贝尔.D.当代西方社会科学.北京:社会科学文献出版社,1988.

- 蔡永红,姜勤德.统计在社会科学领域应用的新进展及反思.统计研究,2006(2):66~69.
- 曹志强,张斌,谭民.基于行为的多移动机器人实时队形保持.高技术通讯,2001,18(10):74~77.
- 常文君,由光鑫,庞永杰.基于混合体系结构的多水下机器人协调控制体系.中国海洋平台,2002,17(3):12~16.
- 陈明亮.生命周期不同阶段客户重复购买意向决定因素的实证研究.管理世界,2002(11):93~99.
- 陈寿仙.方法论导论.大连:东北财经大学出版社,2007.
- 陈卫东,董胜龙,席裕庚.多移动机器人编队的分布式控制系统.机器人,2000(6):433~438.
- 陈向明.社会科学中的定性研究方法.中国社会科学,1996(6):93~102.
- 陈向明.质的研究方法与社会科学研究.北京:教育科学出版社,2000.
- 崔霞,戴汝为.以人为中心的综合集成研讨厅体系——人工社会(二).复杂系统与复杂性科学,2006a,3(2):9~20.
- 崔霞,戴汝为.以人为中心的综合集成研讨厅体系——人工社会(一).复杂系统与复杂性科学,2006b,3(2):1~8.
- 董晔弘.用电脑预测恐怖.科技新时代,2004(5):48~57.
- 嘎日达.社会实验与自然科学实验的方法论比较.北京行政学院学报,2002(2):80~83.
- 顾佳,贺仲雄.人工生命、人工社会、人工涌现的和谐仿真.2006 系统仿真技术及其应用学术交流会论文集:335~338.
- 哈拉兰德斯.社会学基础.上海:上海科学技术出版社,1986.
- 韩筱璞,周涛,汪秉宏.基于元胞自动机的国家演化模型研究.复杂系统与复杂性科学,2004,1(4):74~78.
- 郝宁湘.科学方法有效性质疑.晋阳学刊,1994(3):30~34.
- 洪长安.论自然科学方法在社会科学研究中的应用.广西大学硕士学位论文,2004.
- 黄欣荣.复杂性科学与哲学.北京:中央编译出版社,2007.
- 黄新平.马克斯·韦伯社会科学方法论反思.陕西师范大学硕士学位论文,2004.
- 金武刚.定量研究中国社会科学:一项来自 3199 篇论文的内容分析.情报资料工作,2002(4):52~57.
- 瞿宝忠.管理实验启示录.上海:上海科学技术出版社,1989.
- 肯尼斯·贝利.现代社会研究方法.许真译.上海:上海人民出版社,1986.
- 雷玉琼,许康.科学主义心理学理论的哲学反思.湖南大学学报(社会科学版),2002,16(6):137~138,154.
- 李承贵.20世纪中国人文社会科学研究方法回眸与检讨.南昌大学学报(人社版),1999,30(4):135~140.
- 李承贵.社会科学研究方法的复归和创新——20世纪后 20 年学术现象回顾.佛山科学技术学院学报(社会科学版),2002,20(3):38~42.
- 李刚,邢书宝.资源承载力人工社会模型研究.计算机技术与发展,2007,17(9):217~219.
- 李建会,张江.数字创世纪人工生命的新科学.北京:科学出版社,2006.
- 李建会.生命和计算:人工生命的理论研究.北京大学哲学博士学位论文,2002.
- 李雪燕,辛涛.二分数据的多层次线性模型:原理与应用.心理发展与教育,2006,22(4):97~102.
- 李云娥,张庆.社会科学研究方法及其在经济学中的应用.黑龙江社会科学,2007(4):61~63.

- 梁丽萍.量化研究与质化研究——社会科学研究方法的歧义与整合.山西高等学校社会科学学报,2004,16(1):25~28.
- 刘红云,孟庆茂,张雷.班主任教师班级管理效能感对学生学习态度及其与学业效能间关系的影响.心理发展与教育,2005,21(2):62~67.
- 刘金伟.推进社会科学研究方法创新的新视角——基于复杂性研究的思考.社会科学家,2004(3):64~66.
- 刘晓君.走进实验的殿堂——实验方法谈.上海:上海交通大学出版社,2006.
- 刘延年.关于社会科学研究方法问题.西安财经学院学报,2003,16(3):5~9.
- 卢良进,万健,徐向华.基于人工社会网络的P2P实时流媒体协助分发模型.计算机应用,2007,27(11):2680~2682,2693.
- 陆益龙.转型社会研究中的定性与定量方法.教学与研究,2008(6):27~29.
- 吕森林.论心理学史上的一次革命——实验心理学的诞生及其意义.辽宁师范大学学报(社会科学版),1996(6):25~28.
- 罗批,胡晓峰,司光亚,张忠海.战争系统人工社会的研究实践与几点思考.系统仿真学报,2006,18(12):3589~3592.
- 马颖,蒲十周.论自然科学与人文社会科学研究方法的异同.福建论坛(人文社会科学版),2005(4):94~98.
- 马宇恒.国有医院组织文化评估维度的案例研究.电子科技大学学报,2007.
- 牟岱.哲学社会科学研究方法国际标准化及其意义.开发研究,2006(4):73~76.
- 牛美丽.公共行政学观照下的定性研究方法.中山大学学报(社会科学版),2006(3):76~79.
- 欧阳红晋.基于人工生命理论的机器人群体智能行为研究.哈尔滨工程大学硕士学位论文,2004.
- 钱学森,于景元,戴汝为.一个科学新领域——开放复杂巨系统及其方法论.自然杂志,1990,13(1):3~10.
- 钱学森.创建系统学.太原:山西科技出版社,2001.
- 钱学森等.论系统工程.长沙:湖南科学技术出版社,1982.
- 秦浩,陈景武.结构方程模型原理及其应用注意事项.中国卫生统计,2006,23(4):367~369.
- 宋志明.谈社会科学研究方法的特殊性.浙江社会科学,2007(4):12~13.
- 孙海法,朱莹楚.案例研究法的理论与应用.科学管理研究,2004,22(1):116~120.
- 孙明贺,郦全民.论社会科学研究的计算机实验方法.东华大学学报(社会科学版),2006,6(2):20~24.
- 唐·埃思里奇.应用经济学研究方法论,朱刚译.北京:经济科学出版社,1998.
- 涂序彦,尹怡欣.人工生命及应用.北京:北京邮电大学出版社,2004.
- 屠春友.试论社会科学研究方法多元化原则.学术研究,2000(5):30~34.
- 万迪昉,谢刚,乔志林.管理学新视角:实验管理学.科学学研究,2003,21(2):131~137.
- 王飞跃,蒋正华,戴汝为.人口问题与人工社会方法:人工人口系统的设想与应用.复杂系统与复杂性科学,2005,2(1):1~9.
- 王飞跃,史帝夫·兰森.从人工生命到人工社会——复杂社会系统研究的现状和展望.复杂系统与复杂性科学,2004,1(1):33~41.
- 王飞跃.人工社会、计算实验、平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究的讨论.复杂系统与复杂性科学,2004,1(4):25~35.

- 王昭凤.从社会历史存在物维度看社会科学研究方法的特殊性.聊城大学学报(哲学社会科学版),2005(2):66~69.
- 谢美华.浅评定量研究方法及其在我国教育研究中的应用.江西师范大学硕士学位论文,2005.
- 谢雁鸣,廖星.定性研究现状分析.北京中医药大学学报,2008,31(4):232~236.
- 闫广武.元胞自动机与人工生命研究进展.吉林大学学报(理学版),2003,41(1):40~44.
- 杨光富,张宏菊.案例教学:从哈佛走向世界——案例教学发展历史研究.外国中小学教育,2008(6):1~5.
- 杨智,刘新燕.市场导向与企业绩效:一个基于中介效应的整合模型——以中东部五省市企业为实证样本.中国软科学,2006(11):88~100.
- 伊恩·罗伯逊.社会学.黄育馥译.北京:商务印书馆,1994.
- 于海波,方俐洛,凌文辁,郑晓明.组织信任对员工态度和离职意向、组织财务绩效的影响.心理学报,2007,39(2):311~320.
- 于海波,方俐洛,凌文辁.组织学习及其作用机制的实证研究.管理科学学报,2007,10(5):48~61.
- 于景元,刘毅.复杂性研究与系统科学.科学学研究,2002,20(5):449~553.
- 于景元,周晓纪.从定性到定量综合集成方法的实现和应用.系统工程理论与实践,2002(10):26~32.
- 于景元,周晓纪.从综合集成思想到综合集成实践——方法、理论、技术、工程.管理学报,2005,2(1):4~10.
- 于景元.从定性到定量综合集成方法及其应用.中国软科学,1993,5:31~35.
- 于景元.面对复杂的现实——系统工程的应用和发展.科学决策,1998(2):29~33.
- 于景元.钱学森的综合集成思想与体系.文汇报,20050529.
- 于景元.钱学森综合集成体系.西安交通大学学报(社会科学版),2006,26(6):40~47.
- 袁运开,王顺义.世界科技英才录——科学方法卷.上海:上海科技教育出版社,1997.
- 约翰·L·卡斯蒂.虚实世界.王千祥等译.上海:上海科技教育出版社,1998.
- 约翰·克莱斯韦尔.定性的探索和研究设计:五个传统的选择.美国:赛兹出版公司,1998.
- 张江,李学伟.人工社会——基于 A gent 的社会学仿真.系统工程,2005,23(1):13~20.
- 张军.计算管理研究方法及其实现.南京大学博士学位论文,2006.
- 张梦中,马克·霍哲.定性研究方法总论.中国行政管理,2001(11):39~42.
- 张学军.结构方程建模应用中的十大问题.统计与决策,2007(9):130~132.
- 张永光.“人工生命”研究进展.中国科学院院刊,2000(3):169~173.
- 周维刚.论还原方法与还原论.系统辩证学学报,2005,13(1):48~51,59.
- 朱森良,吴春明,张友军,金毅,李捷.基于多智能体的实时并发式智能机器人结构.高技术通讯,1995,5(10):20~24.

# 社会科学研究中的计算实验方法

当前多学科的交叉与融合极大地推动了社会科学研究方法的发展,其中有两个趋势值得关注。其一,借鉴复杂系统和复杂性科学的研究方法和理论,从整体性、动态性、适应性、层次性、相关性、随机性、非线性等方面展开研究;其二,把计算技术与社会科学研究相结合,实现研究方法的创新。随着复杂系统与复杂性科学的研究深入,以及包括计算机技术在内的科学技术整体的迅速发展,为社会科学研究的计算实验方法提供了基础和可能。在以上两大研究趋势的影响下,计算实验方法体系应运而生并成为许多研究人员关注的热点。对于如何将计算实验的思想应用到社会科学研究领域当中,目前尚处于探索阶段。本章针对社会科学计算实验研究的基本概念、模型结构与框架、研究范式、技术路线等备受关注的问题,在以往研究经验的基础上,给出了相对具体的阐释。

## 3.1 社会科学研究中的计算实验

### 3.1.1 社会科学研究中的难点

根据第1、2章的基本内容,可以看出社会科学研究的难点主要表现在以下几个方面:研究对象的复杂性、系统演化的不确定性与实验的困难性。

#### 1. 社会科学研究对象的复杂性

社会科学以人类社会现象作为研究对象,其任务是描述并揭示各种社会现象及其发展规律(孙明贺和酈全民,2006;蓝仁哲等,1998)。这就决定了作为社会科学研究的方法论,不能不考虑社会活动主体的能动性、选择性以及价值判

断、价值取向等因素。与自然现象相比,人类社会现象不但更为复杂,影响和制约的因素更多,而且带有很大的不确定性,这使得社会系统相比其他类型的复杂系统更为复杂(于景元和周晓纪,2005)。

社会系统中人是最复杂的要素,因为人的参与而使得社会系统的复杂程度较其他复杂系统更为突出,这是我们迄今为止所认识的最复杂的系统(成思危,2004)。人是有很高智能的行为主体,其对客观世界的认知、判断以及决策是一个非常复杂的过程。在不同时间,不同客观条件下,人的生理和心理需求是不同的,这种动态性就造成了人的行为具有较高程度的不确定性。同样,由于受到性别、年龄、性格特征、教育程度、社会文化氛围等先天或后天因素的影响,在同一环境下,不同人的行为也会有很大差异。因此,在社会科学研究中,如果将人视为“同质”的,将可能使最终的研究结果与现实情况产生非常大的偏差。这也决定了在社会科学研究中不能像自然科学那样将所研究的对象视为同质的系统单元。

系统各要素(特别是人的心理与行为)之间相互作用,以及环境的限制和变化等一系列复杂性具有明显的非线性和动态性。这就决定了由其组成的社会系统是一个具有多重内部反馈、多层交互关系的复杂系统,典型的如区域经济系统、金融系统、组织等社会系统。社会系统中微观个体在决策行动中不断受到动态变化的宏观环境的影响,同时这些个体之间又在不断的交互作用下产生宏观的系统表现,并形成一定的演化规律,这种宏观和微观之间的双向反馈所引起的复杂问题是传统的研究方法和工具所无法解决的。另外,人类社会的历史演化进程就整体而言具有路径依赖性和不可重复性,这也从另一个方面导致了社会科学研究的复杂性。本书后面提出计算实验的三层结构,就是为了架设微观与宏观之间的桥梁;为解决社会科学研究中的复杂问题提供一种解决思路和方法。

## 2. 社会系统演化的不确定性

社会科学的研究对象就是由人组成的社会系统,而社会系统演化具有很高的不确定性,这就使我们在认识社会系统的演化规律时尤为困难。在香港科学会议多次学术讨论会上,与会专家们谈到:人的行为是由他的追求和自身现状等因素共同决定的,作为社会主体的人可以依据自己的理想、愿望、目的等价值追求作出判断和选择并据此行动,而人的这种选择和行动在很大程度上影响和改变着社会系统的运行。人的不确定性活动构成的社会系统就在本质上成为一种永远演进的动态开放系统,历史便是社会系统在人类的各种活动中不断演化的过程。而具体的历史现象是多样的和复杂的,在这种多样性和复杂性之中,处处透露着规律性(赵俪生,2002)。这就阐释了

社会系统在发展过程中,存在着路径选择的多样性和系统演化的复杂性,整个社会系统的演化在路径选择多样性导致的不确定性中发展,并遵循一定的社会演化规律。

社会系统发展的多样性,决定了社会系统具有多种演化的可能性,而任何一种可能性都可以现实化,也就是说已经现实化的历史演化路径,只是这多条可能路径中的一条。因此研究社会系统的演化过程包括了两个方面:一是已经现实化的社会系统,不仅要研究和揭示其演化路径,还要研究它所反映的社会系统演化的规律;二是可能现实化的社会系统,不仅要研究其演化路径和它所反映的社会系统演化规律,还要勾勒出它的可能演化趋势。

历史反映了社会系统的已生成演化路径,是多因素综合作用的复杂过程,由于社会系统演化的不确定性作用,社会系统未来的发展同样受到多因素的综合作用,难以预测。在研究社会系统时,如果我们只是从当前的现状来逆向还原,就不可能把握社会系统的产生和演化规律,无法达到研究社会系统的目的,因此需要提出新的研究方法论作为指导。计算实验的三层结构可以突破还原论的局限,满足社会系统演化的不确定性要求,为社会科学的研究提供了一种可行的研究思路和方法。

### 3. 社会科学研究实验的困难性

实验研究是一种受控的研究方法,通过实验的方式,控制一个或多个变量的变化来评估它对一个或多个变量产生的效应,进而揭示事物或现象的本质规律(万迪昉,2005)。在自然科学研究中,实验研究最重要的一个特性就是可以重复进行,只要按照给定的条件进行实验必然可以得到相同的结果。对于社会科学研究中的实验来说,其研究对象为由“人”组成的系统,且实验过程难以控制,很难用连续实验来研究对象的动态演化;其次,对于一些实验,其结果往往受到实验对象的复杂性而难以重现或重复,也就是说同样的实验两次可能得到的结果不同,或者实验本身就是不可重复的;最后,社会科学的研究还受到人的心理、文化、道德、法律等不同条件的约束,而这些约束对于实验的结果同样是至关重要的。

社会科学研究中很少采用实验的方法来研究问题,这是因为社会科学问题与自然科学不同,受到很多条件约束,这包括实验对象的复杂性、其主要组成要素“人”的异质性和不可分离性、实验过程的不可逆性、实验的不可测量性、实验条件难以达到等。例如对于实验对象组成要素的不可分离性而言,如果将研究对象的组成要素“人”与所处的环境分离并将其抽象为一个独立的系统进行研究,那么得到的研究结果将会与现实结果大相径庭。这是因为在社会系统中,社会行为及事件的发生往往在一定的时间和空间

内,是系统内诸随机变量、因素与环境系统相互作用的结果,即特定约束条件下各种因素相互影响、相互渗透、相互作用的结果(彼得·圣吉,1998;贺宇江,2003)。又例如对于实验过程的不可逆性而言,其原因主要在于环境的不可精确重复和人的行为的不确定性,这些导致在社会系统演化中,社会历史事件和现象的出现是高度不可逆的,历史事件永远不会重复出现两次(盛昭瀚和蒋德鹏,2002)。而这些约束条件之间又存在着某些影响关系,例如正是由于实验过程的不可逆,使得通过分离实验研究得到的社会科学的研究成果,不一定具有时间平移和空间平移下的不变性,这也是社会科学研究中很难采用实验方法来研究问题的一个重要原因。

相对于自然科学研究,社会科学研究工作所取得的进展却不能令人满意,由上文分析可知,其原因除了社会科学所研究的系统比自然科学所研究的系统复杂之外,研究过程中采用的方法、工具和手段不能满足研究需要也是原因之一。目前社会科学使用的各种研究方法普遍存在宏观和微观的割裂,状态和过程的割裂,难以描述和反映系统非线性的演化过程,忽视个体或元素的主动性与交互作用等问题(于景元和周晓纪,2005;成思危,2004;克劳斯,2000;宋学峰,2005)。其研究工作多限于定性描述,思辨性内容居多,主要实验途径就是案例分析和问卷调查,但是由于社会科学的研究对象涉及人类心理和行为,量化描述相对困难,因此需要新的研究工具和研究方法。在自然科学研究中常通过人造环境或人造系统来完成一些实际中不可能进行的实验,例如风洞实验、高温高压下的一些化学反应、失重条件下的实验等,还有一些实验是在已有理论的基础上用计算机来实现的,例如计算化学实验、蛋白质折叠计算实验、核试验,以及药物配方和机理计算实验等,这些研究方法为社会科学实验研究提供了一个非常好的研究思路。

### 3.1.2 计算实验方法概述

计算实验是利用计算技术,借助计算机构造实验对象、实验环境和实验平台,模拟现实世界物质运动的动力学规律,对科学问题进行实验研究的一种方法。因此,计算实验就是通过基于计算技术的可控制可复现的实验,来研究系统要素之间的相互作用及其整体涌现现象的演化过程,通过抽取和分析研究者感兴趣的参数,来研究其变化对整体系统演化的影响,以期更深入地观察和理解现实世界。

在复杂系统中,动态关联网络中各个要素的适应性过程以及系统演化过程中的随机因素决定了在计算实验中所建立的模型的结构可能是不确定的,微观层面导致宏观层面上的涌现现象虽有规律但却是不确定的。一方面,对于复杂

系统各个子系统或系统要素来说,其输入/输出的动力学行为特征和一系列形式化的“条件/行为”计算机语句提供的因果性解释是否完全,取决于我们对复杂系统的认知程度和实际可处理的技术条件;另一方面,提供的因果性解释可能是完全的,但是由于随机因素、非线性作用、自组织和自适应机制等因素的影响而导致计算结果是不确定的,这正为研究复杂社会系统的涌现现象提供了契机(周昌乐,2005)。

以计算化学为例,在几个基本定理约束下,利用计算机技术模拟化学元素的运动规律,进行计算化学实验,在大量的组合中寻找可能的化合物组合方式,依据计算实验的结果,再进行实际的化学实验。类似的,生物学领域中寻找药物配方的计算实验,也是采用类似的处理模式,还有典型的蛋白质折叠计算实验等,利用全球接入互联网的几十万台计算机,对各种可能的情况进行计算实验和分析。

目前计算机技术的应用正逐步向社会科学领域拓展。社会系统是一个复杂系统,社会群体行为演化具有动态性和非线性等复杂特性。因此,社会系统的演化问题对传统理论(例如还原论,自上而下的计算仿真方法)提出了挑战。这就需要新的方法和技术,综合集成地解决这类复杂系统研究中的问题,计算实验为这类问题的解决提供了一种可行的方法。随着计算机理论、方法和技术的发展,计算机的处理能力不断提高,使得计算实验方法在社会系统中的应用不断扩大。另外,借鉴自然科学研究方法,把计算机技术与社会科学领域研究方法相结合,也极大地促进了社会科学各学科研究方法的创新。

### 3.1.3 基于系统科学思想的社会科学计算实验

社会科学研究的计算实验是以系统科学思想为指导,以数学、心理学和计算机科学等学科的理论、知识为基础,以社会系统为实验对象,从系统演化的角度,利用计算技术研究社会系统演化规律、社会系统与环境的交互原理以及系统中要素的动力学行为特征。通过对系统要素行为及其相互作用和影响的微观层面分析,揭示系统整体状态变化的演化过程,进一步揭示社会系统演化的一般原理,探索潜在的管理模式和方法,从而更好地服务于社会实践。

研究者在研究复杂的社会现象时,由于社会系统的各种复杂因素和人的不可控因素,常常无法进行各种真实的实验。社会科学的计算实验是综合集成计算技术、复杂系统理论和演化理论等,通过计算机“构造”出现实系统的“替身”(这里所指的替身可以根据研究问题需要而实现现实系统的部分功能,而不是全部对应,例如系统的结构、功能、行为等,下文将统一简称为“替身”),

并在此基础上进行社会系统复杂行为分析,探索社会系统演化规律的一种科学的研究方法。通过计算实验可以模拟社会主体之间的相互作用、整体涌现及演化过程、社会系统微观行为和宏观表现之间的关联,进而研究社会科学中的问题,最终达到揭示社会科学基本原理、基本规律的目的,并为建构和检验社会科学相关领域的理论提供一定的实验基础。除此之外,在计算机上运行的实验模型对社会现象和演化过程具有解释功能和预测功能。由于社会系统的计算实验模型在设定的条件下,从某一方面反映了社会的真实情况及其内在规律,所以能够解释许多复杂的社会现象,并揭示各种可能的演化趋势。计算实验把可重复的受控实验与假设演绎法有机地结合起来,通过数字化编码的社会模拟构造计算实验平台,可以使社会系统中复杂问题更清晰,使隐含的结构更直观(周昌乐,2005)。

基于复杂系统理论的计算实验是社会科学研究中的另一种计算研究途径,它把社会系统模型化成在特定关联网络结构下相互作用的智能主体构成的演化系统,利用计算机技术构造一个“人工社会”,它是与实体系统对应的抽象(概念)系统,并把它看作是复杂社会系统的体现。人工社会中的各种“人工个体”在计算机构造的虚拟环境下学习、适应、相互作用并演化,通过个体微观变化的累积,使整体系统的复杂性行为自下而上的“涌现”出来,它不单是静态地分析复杂系统的结构,而且包括动态地分析复杂系统的演化。计算实验与系统仿真不完全相同,系统仿真一般以逼近现实为出发点,把实际系统作为检验仿真结果的唯一参照和标准,追求“真实”。计算实验则认为计算实验模拟的结果是系统的一种可能实现方式,现实系统只是计算实验模拟的一种可能的结果。在“人工社会”中的计算实验可以突破在现实世界中实验的局限性,它并不局限于所研究的具体问题,而是寻求一种求解复杂社会问题的研究方法。利用计算实验方法设计不同的实验方案,并在必要时进行大量的重复,就有可能更全面、准确、及时、量化地对各种复杂社会系统解决方案按不同指标体系进行分析评估。

计算实验把“科学实验”引入社会科学研究中,开辟了一条认识和理解现实社会科学问题的新思路,利用计算实验方法进行各种各样的现实社会实验,或研究各种可能的社会系统演化路径。计算实验使得研究工作已不再局限于演绎推理、数理分析和计量检验,而是拓展到计算机模拟,通过对社会模型的计算实验,探索社会演化的规律和解决问题的方法(孙明贺和郦全民;2006)。通过计算实验在现实系统的“替身”上进行可控、可重复实验,可以验证已有的假设或理论,可以发现和提出新的假设或理论并给予检验,可以事前演算并了解可能遇到的困难并给出解决方案。做任何管理研究和决策,原则上都可以先在计算实验平

台上做一系列实验,然后再采纳成功实验集合建议的策略去指导解决实际问题。在构造复杂系统综合集成研究体系中,建立计算实验平台,整合演绎推理、数理分析和计量检验等有效的研究方法,把解决实际问题的过程信息反馈到计算实验平台,实现人机交互研究,可以引导我们更精细地回答一些问题,进而促使研究者去创建更为精确、清晰的理论。

社会科学计算实验研究方法的研究体系是以复杂系统和复杂性科学理论作为研究的指导思想,是以系统动力学、自组织理论等系统科学的基本理论和研究方法为基础。另外,计算实验研究方法还借鉴其他学科的基础理论和思想方法,其中包括博弈论、描述系统结构和统计分析的多种数学方法、人工社会、元胞自动机和多主体系统等计算机科学的理论和方法,遗传、突变和选择构成的进化等生物(态)学理论,文化基因、需求理论和社会心理等心理学理论和研究方法,以及计算物理与计算化学等学科的研究方法。其中特别是自组织理论和进化理论等研究复杂系统多层次、非线性、动态演化的理论和方法,构成计算实验研究方法的基本研究基础。计算实验研究方法之所以借鉴其他学科的理论和方法跨学科研究,是由于从复杂系统与复杂性科学角度看,社会系统与其他可借鉴的系统之间存在相同或相似的抽象结构及动力机制。

### 3.1.4 社会系统的可计算性

在社会科学研究中,研究者需要以某种符号系统作为媒介来对社会系统进行描述,并对社会系统未来的发展做出预测。1988年,Ostrom提出了可供社会科学家使用的三个“符号系统”,他指出:除了我们比较熟悉的用自然语言进行论证的定性方法和用数学语言描述的定量方法以外,还有第三种研究方法:计算机的程序化语言。社会科学的研究者可以用计算机的标准化程序语言来描述自己的思想,并且通过计算机的辅助来讨论过去、分析现状和预测社会系统的未来。

复杂社会系统要素相互之间的非线性关系通常是不可预测的,其演化趋势具有多种可能性。从目前计算机科学的研究进展和实际应用的情况分析,第三个符号系统不仅可以表示所有可以用前两个符号系统表达的理论,还可以表示相当一部分不能由前两个符号系统表达的理论。计算机程序化的语言为社会学家在建立关于复杂的社会现象的规范性理论的研究中提供了一个切实有效的研究途径。

数学模型是采用形式化的数学语言来描述某个特定对象或问题的特征及数量依赖关系的一组数学关系式或一个具体的数学算法,以此来表达事物的状态、

关系和过程。经过对数学模型的推导、演算和分析,可以形成对所研究系统现象的解释、判断和预言。数学模型具有高度的抽象性,严密的逻辑性和广泛的应用性,为科学技术研究提供了简洁精确的形式化语言、数量分析和计算的方法以及逻辑推理的工具(董荣胜等,2002)。

但是,数学模型对动态过程的描述在许多情况下是非直观的。对于现实社会系统中的演化问题,有一些可以用数学的方法描述,但某些问题我们只知道其中的某些因素对社会系统的演化起作用,但是作用的程度和机理却没法用适当的数学模型来描述。还有很多社会系统的问题可以用数学模型描述,但很难甚至无法求解。例如某些非线性动力学方程可以描述但却不可求解。为了更好地对复杂社会系统进行分析,就需要将所研究问题的数学模型,转换为能输入计算机进行运算的形式,或直接建立计算机模型,在计算机上进行计算机模拟(董荣胜等,2002)。在一定假设条件下,通过计算模拟的反复迭代,找出影响系统演化的关键因素,并分析这些因素如何影响系统以及它们之间的相互关联性,这就是计算实验研究方法的雏形。

就目前科学技术的发展现状和趋势来看,从某种意义上讲,计算实验研究方法比纯粹的数学方法更适用于社会科学的研究,这主要体现在:

- (1) 计算机编程语言对复杂动态系统演化过程的表达能力很强,且方便处理一些难以直接量化的系统参数,而系统的复杂性往往难以用自然语言或数学语言来描述清楚;
- (2) 与数学方法相比,计算机程序在处理并行过程或不规则过程时有很大的优势,特别是要素的活动方式和顺序不能完全事先定义的演化过程;
- (3) 不同于数学模型中整体关联的结构,计算机程序可以设计成模块化的结构,部分模块的修改可以不影响其他模块的功能,这使得计算研究易于修改、扩充,也更方便与其他研究方法整合;
- (4) 计算研究模型是从微观层次上对复杂社会系统进行模拟,采用自下而上的方法研究系统的微观个体变化与宏观状态之间的相互作用,并且计算机模拟易于建立由异质的智能主体组成的人工系统,而建立异质要素的数学系统则很困难;
- (5) 计算机模型可以处理社会系统模型中状态、心理、行为等变化的随机性和不可预测性,而数学上的处理则要相对困难得多;
- (6) 一般来讲,现实世界的绝大部分模型都不可能给出显式解,即使能给出显式解,其中相当一部分也很难计算。计算模拟可以避免这种求解的困难,只需要给出计算的规则模型,让计算机根据规则一步一步地迭代,模拟出系统的演化过程。

我们可以从复杂系统的角度对社会系统的计算模型进行功能性的表述：一个复杂社会系统处于一个动态变化的环境中，系统包含两个以上不同质的独立决策主体和相关的有限资源，并通过一系列可重组的分工合作，形成多重相互关联的动态网络结构，趋向于一个不断修正的、系统均衡状态的有限集合。系统之所以从一种性状演化为另一种性状，是由于所有独立决策主体能不断根据变化的环境调整各自的行为以适应环境。可以看出，上述功能性表述可以等价转换为一系列形式化的“条件/行为”(IF/THEN)语句。如果我们假定人的行为能力是有限的；对系统整体的影响在单位时间内是有限的；在有限的资源、有限的环境变化范围等条件下，系统的性状集合范围是有限的，是可编码的，那么在适当的分类或划分等处理后，系统在一定技术条件下就是实际可计算的。

对于社会系统的可计算性，可以从如下几个方面理解：

(1) 可以为复杂社会系统中各个部分的活动建立有限的、离散的逻辑空间，将现实世界中各个部分的活动映射在逻辑空间上，并且可以根据空间映射关系所需要满足的精度，将逻辑空间进行适当细分。

(2) 可以为复杂社会系统中各个部分的演化和相互作用建立离散的时间序列，将现实时间映射在这个时间序列上，并且可以根据时间映射关系所需要满足的精度，将时间序列进行适当细分。

(3) 复杂系统及其各个部分在每一“时刻”的状态可以用一组有限的、无歧义的特征值描述。通过特征值的适当划分，可以对复杂系统需要满足的状态描述精度进行设定。当然，支撑计算实验的计算机软硬件条件，也在一定程度上决定了实验结果的精确程度、单位时间的计算量和数据存储量，同时也决定了在一定技术条件下，对社会系统建模的精细程度。

如果我们要理解社会中人与人之间相互作用的动力学特征，以及系统结构变化和系统的涌现特性，就必须对人的学习、交互和适应等行为决策进行细致分析。由于现实社会诸多约束条件的存在，不能直接做真实的可控实验，本书提出可以利用计算实验这一工具为现实社会提供一个“替身”，研究者可在这个“替身”上进行一系列可控实验，从而解决了对现实系统实验难以开展这一难题，同时也为社会科学研究提供了一个重要的研究途径和方法。计算实验方法的提出，是社会科学研究在内容、方法和手段上的新探索，同时也是方法论上的创新。当然，要把计算实验方法发展成为一种研究复杂社会系统的有效方法，特别是与理论研究和实际应用的综合集成，还需要进行更深入的研究。

## 3.2 社会科学计算实验的模型结构与研究框架

### 3.2.1 基于计算技术的人工社会

计算实验研究方法的关键技术之一是构造一个“人工社会”(Artificial Society)。本书所讲的人工社会不是社会学意义下的人工社会,例如学校、军队等人为构建的社会组织系统,而是指利用计算技术构造的具有人类社会系统结构、特性、功能和动力机制的人工系统。它包含一个开放的环境,一群不同质的、具备独立决策能力的人工主体(也称智能主体)和与之相关的有限资源,以及一套系统各要素间相互作用的规则。这里的人工主体可以是人或组织,其可以描述系统中的各种要素,有生命的和无生命的,有智能的和无智能的,或低智能的要素等。

人工社会的主要思路是通过提取人类社会的基本运行机制,并利用计算机技术构造具有人类社会特性和功能的人工系统,研究在系统动态发展过程中人工主体的记忆、学习、适应和相互作用以及相关资源配置的变化,观察和记录人工主体构成的系统整体在其环境中所涌现出来的宏观行为特征。

在一个由计算机所构造的动态变化的人工社会系统中,每个计算对象都具有自身的数据结构和相应的计算处理方法,并可以分别对应现实社会系统不同层次或结构的计算处理。下一层次要素的活动是上一层次要素变化的基础,上一层次要素又对下一层次要素产生影响。人工社会系统在结构和功能上的自组织、自适应,形成了整个人工社会系统的变化,构成一个完备的自演化系统,让社会系统整体的复杂行为在演化过程中自下而上地“涌现”出来。

随着计算机硬件的不断升级、运行速度的不断加快,计算机科学领域中基于代理的编程技术和网络技术的发展,以及计算机图形技术的不断成熟,利用人工社会思想研究复杂社会系统逐步从设想变成现实,并吸引了广大研究者的目光。到目前为止,人工社会的思想已经应用到了多个领域,并取得了大量的研究成果,例如战争模拟与战略决策(胡晓峰等,2005;司光亚等,2008),人工人口系统,复杂经济系统,人工交通系统(黄海军,2005),社会行为演化分析(张军,2005)等等。

### 3.2.2 社会系统的两个基本演化机制

社会系统是一个“开放的复杂巨系统”(钱学森,1990),因其各子系统之间、各系统要素之间以及各系统要素与各系统层次之间相互作用、相互影响,使系统整体呈现出动态的演化模式,并不断涌现出新的特征。社会系统持续演化的基本动力有来自系统内部的,即系统要素之间的合作、竞争、交换、学习等行为;社会系统演化的动力也来自外部环境,即环境的变化及环境与系统相互联系的作用方式的变化,都会在不同程度上导致系统内部发生变化,一般来说,系统是在内部动力和外部动力共同推动下演化的(许国志等,2000)。从复杂系统的宏观角度分析,社会系统演化过程有两个基本动力机制:主体元素主动的、在目标驱动下所形成的“自组织”机制,以及由于宏观上的某种限制(如资源的限制等)而引起的竞争从而产生的广义进化机制。

#### 1. 自组织机制

在系统科学领域,“组织”是指系统内部的有序结构或这种有序结构的形成过程。从“组织”的进化形式来看,可以把它分为两类:“他组织”和“自组织”。如果一个系统靠外部指令而形成“组织”,就是“他组织”。而“自组织”指的是不存在外部指令,系统内要素按照相互默契的某种规则,各尽其责而又协调地自动地形成有序结构,自发地形成整体运动或要素之间的分工与合作关系(吴广谋和盛昭瀚,2000)。它是系统受内在机制驱动,自行地从简单向复杂、从粗糙向细致方向发展演化,不断提高自身活动的组织性和结构的有序性,实现系统自创生、自复制、自适应、自发展的演化过程。

社会系统要素之间通过竞争与协同作用,形成一定的结构并具有相应功能的状态的演化过程,其特点是组织指令在系统自身演化过程中自动形成,来自系统内部(刘华杰,2000)。社会系统的自组织过程与一般系统自组织过程相比具有特殊性,主要表现为,系统主体元素——人的参与,这一过程往往是在人的有意识的能动作用下得以完成的。这种自主性使得系统在演化过程中要不断调整自身的结构以及与外界的关系,以更加适应环境(金建萍,2004)。因此,正是由于自组织特性的存在,社会系统本身及其子系统能够在不断波动和变化中持续发展,趋于成熟与完善。

#### 2. 广义进化机制与文化基因

广义进化理论将达尔文的自然选择和适者生存理论推广到社会现象的解释中去。系统的组成元素以某种规则进行相互作用、相互影响,从局部的相互作用扩展到全局的非线性的自组织过程本身就是一个约束的生成过程。因此,从广义进化论观点来看,自组织是系统受约束的影响,在遗传变异和优胜劣汰机制的

作用下,其组织结构和运行模式不断地自我完善,从而不断地提高其对环境的适应能力的过程。

广义进化机制中自然选择的单位,可以是任何形式的复制因子,也可以是任何形式的能够进行自我拷贝的单元。自然选择的作用不是对优胜要素的挑选,而是以淘汰无适应能力的要素这一方式实现(理查德,1998)。对于社会系统而言,这种选择是通过与生物演化的基因(Gene)相对应的人类的语言、记忆过程、学习过程、文化过程、科学规范等“文化基因”(Meme)(理查德,1998)来实现。因此,“文化基因”同样具有记忆、学习、适应、遗传、突变等特征。牛津英语词典对“meme”的解释是:“meme: An element of culture that may be considered to be passed on by non-genetic means, esp. imitation.”(Meme:文化的基本单位,通过非遗传的方式,特别是模仿而得到传递)。道金斯也曾对比了 gene 和 meme 的基本特征,他认为社会系统的“文化基因”不应该被理解为 DNA 意义上的基因,在社会文化领域,同样存在着类似 DNA 在生物进化中所起作用的对应基本因素的东西,这就是作为社会文化遗传的基本单位“meme”(李冬梅和郭德俊,2005)。社会系统的进化过程应该从“文化基因”之间互相竞争的角度来理解。苏珊·布莱克莫尔分析了 meme 在社会文化发展中的典型表现形式,并生动地总结描述为:正如基因之间相互竞争着、自私地、不顾一切地要进入到下一代的身体之中,最终决定了生物世界的格局及其结构那样,meme 之间相互竞争着、自私地、不顾一切地要进入到另一个人的大脑、另一本书、另一个对象之中,这最终决定了我们的文化以及我们的心理结构(苏珊·布莱克摩尔,2001)。

在两个基本的演化机制共同作用下,社会系统演化这一复杂过程,取决于社会系统中每个成员的心理和行为的变化,成员间的相互作用方式和程度的变化,成员间关系变化导致的社会结构的变化,以及社会系统所处环境的变化等。

相对于 meme 和 gene,还有一个在计算机科学中被广泛使用的与之对应的概念——“code”,code 一般是指计算机中软件的代码。可以设计出具有独立意义且不再可分的 code,让它在一定程度上具有自我复制和变异功能,并且可以在一定条件下动态地生成或退出,可以通过某种途径或形式传播,我们也许可以称之为软件基因。这样的 code 可以在一定结构下相互组合构成软件系统。这给我们带来非常有益的启示:如果 code 可以模拟类似 meme 和 gene 的竞争、复制、遗传、变异、组合等基本特征,我们就可以用它来模拟文化基因,从演化过程中“基因”层次基本单位之间相互作用的角度来对复杂社会系统进行计算实验。

### 3.2.3 社会科学计算实验的模型结构

用计算实验方法对社会科学领域问题进行建模时,其整体模型结构一般包括三个层次:社会系统层次、智能主体层次、智能主体基元层次,如图 3.1 所示。社会系统演化问题的研究要建立在智能主体的心理和行为演化以及相互间交互作用的基础上,而智能主体的心理和行为演化应该建立在智能主体的基元层次演化的基础上,因此,这三层模型结构就构成了一个完备的自演化系统。

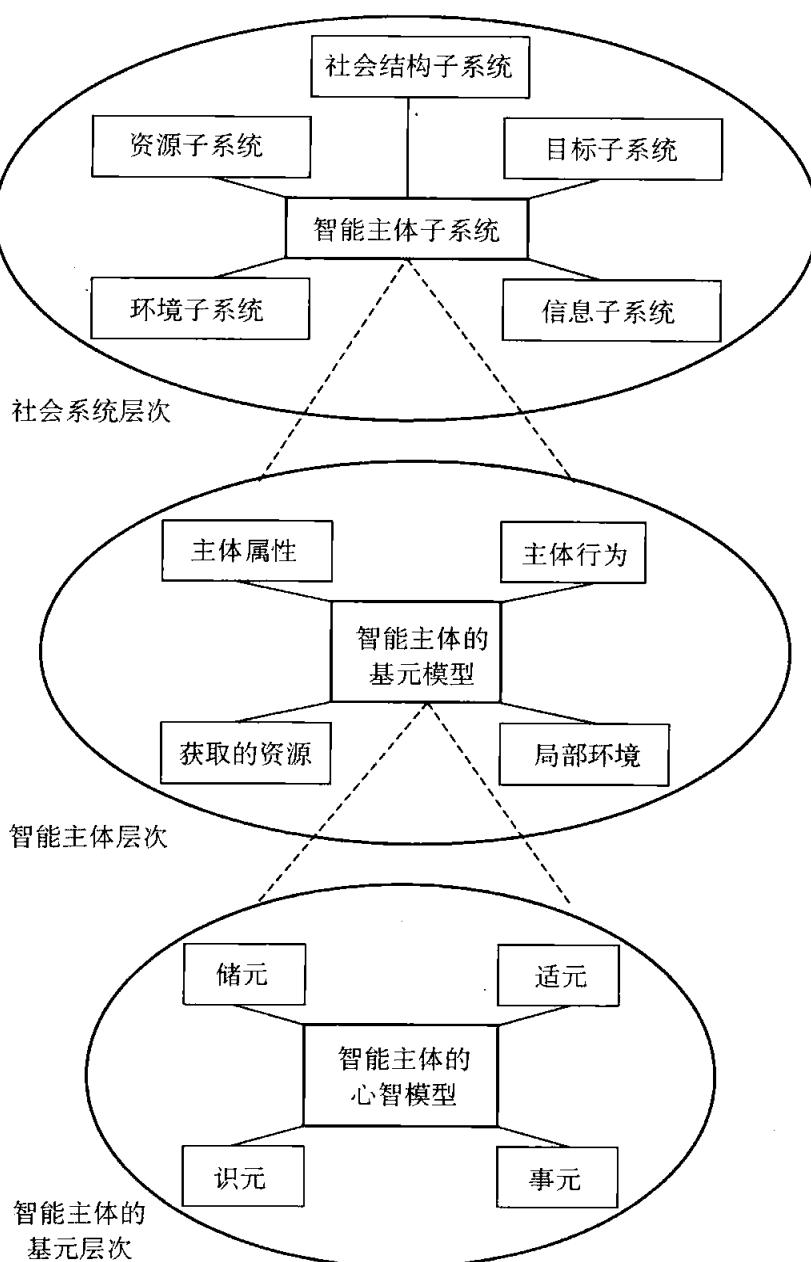


图 3.1 社会科学计算实验的三层模型框架结构

表 3.1 社会科学计算实验的三层模型框架结构

层 次	描 述
Macro-level 社会系统层次	对应于行政区域、经济系统、行业、社会组织、供应链等社会系统
Middle-level 智能主体层次	对应于企业、社会组织中的人等独立决策单位
Micro-level 智能主体基元层次	包括智能主体的记忆、认知、行为、学习、偏好等

### 1. 社会系统层次

社会系统层次属于系统的宏观层次,描述需要进行研究的某个社会系统的宏观特征。社会系统如金融证券系统、供应链系统、区域社会系统、人口系统、产业群、交通系统、社会组织或企业等。社会系统层次由一系列的子系统构成,其一般包括:

(1) 环境子系统。环境子系统用来描述某个社会系统所处的环境及其变化情况,环境子系统受到政治、经济和文化三类因素的影响。环境子系统与具体研究的问题密切相关,随着社会系统的不断发展而变化。

(2) 资源子系统。资源子系统用来描述研究社会系统时所涉及的自然资源和社会资源,如土地资源、各类能源、人力资源、财力资源、信息资源、设备资源等等。一般情况下认为资源是有限的,对社会科学领域问题的研究要考虑资源的承载能力以及系统中各种资源的配置。

(3) 社会结构子系统。社会结构子系统用来描述社会系统中各个独立决策主体通过分工、合作、竞争、交流等社会活动所形成的动态关联网络结构,每个决策主体在系统中都拥有各自的角色属性。社会结构子系统需要客观反映社会系统中各类要素之间的组织关联与层次性。

(4) 目标子系统。研究社会系统时,很多问题需要考虑系统最终要实现的目标,如工程项目管理问题、交通优化或供应链管理问题等。目标子系统主要描述系统在不同时间段的目标以及对目标的动态调整过程。

(5) 信息子系统。信息是社会系统各个要素之间沟通的桥梁,在计算实验模型中,信息子系统用以描述需要关注的公共或私有信息的表述形式、传播方式以及信息种类。

(6) 智能主体子系统。智能主体子系统对应于智能主体层次,在计算实验模型所创建的社会系统层次中一般用于描述各个智能主体的演化过程。

### 2. 智能主体层次

智能主体层次主要用来描述社会系统中智能主体的行为特征。智能主体代

表现现实社会系统中的人、企业或社会组织等。智能主体层次主要反映与智能主体活动直接相关的要素。智能主体层次通常包括：

(1) 智能主体的属性。包括描述在计算实验过程中不变的特征(如智能主体的标识)和可能变化的特征(如智能主体的行为决策)。

(2) 智能主体可获取的资源。智能主体可获取的资源,对应于实际社会系统中所能够得到的各类可能影响智能主体社会活动的资源,如人、财、物、信息、时间、空间以及机遇等。

(3) 智能主体所处局部环境。智能主体所处局部环境是指某一智能主体在一定社会系统结构中的局部环境,由上一层次环境子系统计算得到,也是下一层次(智能主体的基元层次)计算的依据。

(4) 智能主体的行为。智能主体的行为是根据下一层次智能主体基元模型的计算结果,整合智能主体的属性、可获取的资源和所处的局部环境,综合计算出的智能主体下一阶段的行为决策。

### 3. 智能主体的基元层次

智能主体的基元层次由描述智能主体心理和行为活动的基本元素构成,是构建人工社会系统和研究社会系统演化问题的最基本层次。为了达到自身目标,系统中的行为主体会根据环境的变化,不断调整自己的活动。例如以社会系统中人的行为决策为例,在大多数情况下,人们倾向于重复可以为自身带来满意效益的行为,拒绝曾经产生不良后果的行为;对于一些过去没有遇到过的情况,人们会根据已有的记忆和知识尝试去解决新问题,并将解决问题的方法记录到人的知识库中。这样的决策机制实际上包含了系统广义进化过程中的遗传、交换、突变等基本因素。智能主体自身心理和行为也形成了一套完备的自演化机制。智能主体的基元模型关注单个智能主体的心理和行为在社会系统中的动态变化过程,能够抽象反映智能主体的自演化机制。它不仅包含着智能主体的心理和行为自我形成和演化所需的内部循环全过程,而且包含着智能主体与外部环境之间的交互机制。智能主体的基元层次一般由如下几个部分组成:

(1) 储元:描述智能主体的记忆、偏好、知识、信息等一切可以用物理、化学或其他形式储存的,与智能主体心理和行为直接相关的东西。储元的抽象含义类似于人类的记忆。

(2) 识元:描述智能主体对外部输入以及内部储元的感觉、认知、判断等识别活动。识元的抽象含义对应于人类对外部信息的获取、判断和整理等认知行为。

(3) 适元:描述智能主体的适应机制,包括一切在目标驱动下对储元所做的复制、改变等活动。适元的抽象含义对应于人类的学习机制。

(4) 事元:智能主体计算单元的输出,也就是智能主体对应社会系统的综合输入产生的反应行为。事元的抽象含义对应于人类在记忆、认知、学习基础上进行决策后的实际行为。

(5) 智能主体的心智模型:智能主体的心智模型用来描述影响智能主体决策的心理和文化因素。它包括智能主体的生理、本能、心理、偏好、追求、想象、情感活动等。在计算实验方法中,智能主体的心智模型可以看作是一个开放的接口,它整合经典理论的各种研究成果,可以是建立在行为科学、社会学、心理学等研究成果或假设基础上的各种能够符号化的模型。这些可以被整合的模型既可以作为计算实验研究方法的边界条件,也可以作为计算实验研究方法验证的假设。

智能主体所表现出来的个体行为决策可以看作是智能主体在一定的边界条件下,根据环境和其他智能主体的行为对其造成的外部影响,结合自身的属性、行为偏好和记忆等信息,经过整合处理后做出的决策。这种包括输入与输出的决策内容在计算机中可以用编码形式表示,由若干个决策编码构成的集合,构成了某一时刻某一智能主体的心理和行为特征。它可以通过模仿被复制,通过学习被传播,可以通过尝试而产生突变,也可能由于种种原因而被淘汰,智能主体的基元层次就是通过这种方式反映其内在的演化过程。

### 3.2.4 社会科学计算实验的研究框架

计算实验方法采用自下而上的研究方法,通过研究微观层次的个体行为来获取宏观层次的系统整体涌现。在自下而上的研究过程中,计算实验方法以研究人员为核心,综合运用多种方法构造社会系统的综合集成研究框架;通过人机交互,观察模拟社会系统演化过程;通过运用虚实结合的方法,将模拟系统与现实系统相互比对、综合分析评价,最终总结出影响系统演化过程的关键因素与改善系统运作的关键方法。这种计算实验方法的研究框架如图 3.2 所示。

计算实验方法部分借鉴了人工社会的思想,其把社会系统抽象化为由在特定关联网络结构下相互作用的“人工主体”构成的演化系统模型。计算实验方法利用计算机技术构造一个人工社会,它是对现实系统的抽象,是现实系统特性的具体体现。计算实验方法的研究过程是一个现实系统与模拟系统不断分析验证的交互过程,也是对现实系统认识不断提高和深入的过程。因为计算实验可以突破在现实世界实验的局限性,这也使得研究工作不再局限于演绎、推理和数理分析。可通过建立合理的分析评估体系对各种方案按不同指标体系进行分析评估,获取较合理的方案作为现实系统的指导策略,提高现实系统决策的科学性,减少管理的盲目性和规避潜在的风险。

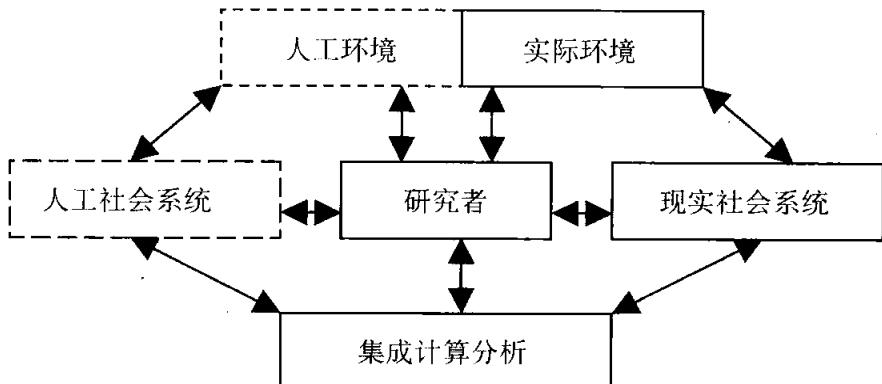


图 3.2 社会科学计算实验的研究框架

现实社会系统处在一个多维空间中,因此需要从多个角度进行研究,才能相对全面地理解社会现象。一般而言,社会科学计算实验的研究可以从空间和时间两个维度出发,针对研究的问题,构造适当的空间和时间关系以完成计算实验模型的构建。

从空间维度的角度分析,社会科学计算实验的研究方法主要是根据不同的研究问题,在特定的空间上研究某类社会活动,使研究者感兴趣的问题能够更清晰地表述出来。从空间维度看,社会科学计算实验的研究类型可以分为两大类:

### (1) 对应现实物理空间的研究

对应现实物理空间的研究指的是需要研究的社会活动与现实物理空间(如地理空间)有直接对应关系,研究的问题定位在这个空间上才能得出有实际意义的结果。如交通问题的研究、水流域生态安全问题与区域可持续发展问题研究等。这类研究的特点是在计算实验模型中,行为主体的活动空间坐标与现实物理空间坐标之间存在某种一一映射关系。一般来讲,主体在空间中的移动需要满足物理学的基本规律。

### (2) 对应抽象特征空间的研究

对应抽象特征空间的研究指的是需要研究的社会活动与现实物理空间没有直接的对应关系,需要构造描述系统某一种特征的抽象空间,使研究的问题定位在这样的空间上,才能有效地反映系统特性与运作规律。如对证券投资者的心理预期与投资行为关系的研究、系统组织行为的研究、语言演化问题的研究等。这类研究的特点是在计算实验模型中,行为主体的活动空间与抽象特征空间相对应,如描述主体行为特征的空间,或描述社会系统中主体间相互关系的网络空间。一般来讲,可以构造多个抽象的特征空间,从不同的特征层面,研究主体在多个抽象特征空间中的活动,以及由此而引起的系统宏观层次上的涌现现象,以便更全面地把握系统特性与运作规律。

从时间维度的角度分析,社会科学计算实验主要是针对某类社会活动的演化过程进行分析研究,一般这类社会活动会持续一个相对较长的时间段,研究者通过对社会系统动态演化过程进行研究,以获取影响系统演化的关键要素。从时间维度看,社会科学计算实验的研究类型可以分为三大类:

(1) 历史重构。历史重构是指通过对现实系统中已经发生事件的再次研究,以获取总结性的经验和启发。计算实验所研究问题的时间段定位在过去,如考古学领域研究的问题、文化或政治制度的历史演变问题等。通常这类问题的研究是根据一些经验数据和已获知的结论,提出一些假设或理论,用实验的方法加以验证,并通过动态的系统演化分析,研究影响社会系统演化的关键因素。在这类问题的研究中,评判实验结果的唯一依据是现实发生的事。从方法论角度看,这与自然科学领域研究采用的系统仿真有相同或相似的地方,因为有可参照的,已发生的唯一事实与实验结果进行比对。

历史重构的研究中还有一类问题,它是在对现实系统演变进程的反演中,分析决策、行为、事件等在不同的时间、地点和条件下发生对系统活动的扰动、控制和影响程度。通过分析比对和归纳总结,获取对当前的系统活动有借鉴意义的参考。如对证券市场交易历史的分析、战争与国家制度变迁问题的分析、不同公共卫生政策对控制 SARS 传播的效果分析等。与把现实结果作为检验仿真结果唯一参照标准的系统仿真不同,计算实验研究方法在这类问题的研究中,把计算实验的结果也视为一种“现实”,是现实系统的可能实现方式,现实系统只是计算实验分析的某一个可能的结果(王飞跃,2004)。

(2) 现状研究。计算实验中的现状研究一般是指在一个相对较短的时间段内对某类系统活动进行综合分析。这类计算实验分析的问题定位在所研究的问题是“正在发生的事”。通常现状研究关注于研究系统的协调或优化问题,具体体现为系统结构、系统要素与系统环境的交叉分析,多个系统参量的特征、分布与对比分析等。对这类问题的研究重点关注的是系统在某时刻(或短时期内)处于何种状态、产生这种状态的原因、影响系统状态的关键因素以及如何进行协调与优化等一系列问题。如供应链结构的动态演化分析、证券市场中的买方与卖方价格冲击指数比较分析等。对多种可能的因素组合进行可控、可重复的计算实验,可以获取更明晰的系统演化规律。

(3) 趋势推演。趋势推演是指对将要发生的事进行研究,计算实验的时间段定位在将来。这类问题关注的是系统下一步的发展方向。如对社会经济系统的风险分析、社会可持续发展问题研究等。由于受到多种因素的综合影响,系统演化的趋势具有多种可能性。这类问题的研究路线是对系统基本动力学机制的建模和模拟,关注的是在各种环境条件下,系统演化的可能趋势。考虑到系统演

化中随机因素的干扰,这类问题的研究一般采取多个实验方案同时计算、比较分析、综合评价的方法,对多个可能的决策方案做出可行性分析并给出各个方案可能的结果,从而在多个方案中筛选出合适的方案或排除不合理的方案。

### 3.2.5 计算实验的作用

计算实验研究方法利用计算技术对社会系统演化机制及其系统中要素的动力学行为进行模拟,研究社会系统中各种现象的发生过程、相互关系,对“已经发生”、“正在发生”和“将来可能发生”的社会现象进行分析,解释其形成的原因,发现其中的规律和法则,从而设计出解决实际问题的方案,为实际社会活动的管理提供客观和符合规律的正确建议和依据。

计算实验方法提供了一种新的研究方法,不仅可以对已经现实化的社会系统演化过程进行“重演”,而且更有意义的是能在可变的系统环境和整体结构下,对系统异质性的要素以及平行发生的过程进行处理,对系统多个可能的演化趋势进行预测;不仅可以反映社会系统中的微观行为与宏观现象,而且可以揭示多层次间的相互关联与作用,观察系统的涌现性质,了解社会系统动态演化,探索系统演化的过程与互动形态;不仅可以辅助我们了解系统的某一个静态平衡点或状态,而且可以揭示这一状态产生的原因,以及形成这一状态的演化路径。此外,计算实验方法还可以与既有的社会系统研究方法相辅相成,在观察、分析与解释上朝更精微细致的方向突破,揭示客观事物的存在与发展规律,同时将人们认识的结果进行系统化、理论化。简而言之,计算实验研究方法不仅关心“尘埃落在什么地方”,而且关心“尘埃为什么落下”、“尘埃是如何落定的”以及“尘埃还可能飘向何处”。

具体来讲,计算实验在社会科学研究中的作用可以归纳为:

(1) 便于我们观察世界。社会系统中某些现象发生得太快(例如突发事件引起的混乱)或是进行得太慢(例如教育投入与产出),或者某些现象只有在一定的规模和环境下才有可能发生(例如产业聚集),用传统的研究方法很难对这些现象进行观察。计算实验方法突破了现实条件的限制,可以把研究工作控制在适合观察的速度和规模上,解决了在实际系统上观察的困难。

(2) 便于实验和学习。社会系统中的实验受到诸多因素的限制,如国家法律法规、社会伦理道德、实验成本等,以及系统本身的不可逆、具有路径依赖等特点,使得实验在实现上存在一定的困难和弊端,而计算实验的方法,正是解决这些困难和弊端的“良药”。计算实验可以帮助研究者在人工系统上通过改变参数,进行反复、可控的实验,做多方案的比较,避免了在实体系统上实验的危险或是过高的成本,以及“观察者的活动可能造成的干扰”(李怀祖,2004)。

(3) 便于指导社会实践。计算实验可以帮助排除不合理的管理方案,给出恰当的管理策略以解决实际问题,从而规避实际操作中的可能出现的风险和减少管理过程中的盲目性,为社会活动的计划、组织、决策、控制与协调提供了有力支持。

(4) 便于更全面认识社会系统。计算实验研究方法可以协助我们观察社会系统中的微观行为与宏观现象,以及相同层次的要素和不同层次要素之间的关系,有助于分析系统中各个组成要素的特征和彼此间的关系。通过该方法研究人员可以更全面地研究社会系统的涌现现象。

(5) 便于了解系统演化的多种可能性。计算实验研究方法可以处理并行过程,进行多方案比较。另外,不同质微观要素在变化的环境中,由于随机因素、各自独立的行为决策及其在非线性结构中的相互作用,在宏观上表现为系统演化的不确定性,可以帮助研究者探索系统多个可能的演化趋势。

随着社会科学研究方法和工具的不断创新与完善,科学规范的研究方法在社会科学领域中的应用范围逐步拓展。广泛地借鉴其他学科提供的理论和方法来分析和解决社会科学领域的问题,可以促进社会科学研究科学化进程不断向前推进。计算实验研究方法将应用研究、理论研究和实证研究整合,为社会科学的进一步发展提供了方法论的支持。

### 3.3 社会科学计算实验的研究范式

社会科学计算实验应按照标准的研究范式进行,才能保证计算实验结果的客观性和可信度。其研究范式应包括以下五个方面:界定研究的问题与环境、给定基本假设和规则、建立可计算模型、实现计算实验和评估与比较实验结果。

#### 3.3.1 界定研究的问题与环境

##### 1. 界定研究的问题

在社会科学计算实验研究中,首先要界定所要研究的问题,它决定着研究工作的进一步开展,影响着实验的建模方法及其技术细节。具体工作包括:确定研究对象及其类型,寻找研究视角和切入层面,界定研究对象的时间和空间特性,设定实验最终的目的。具体介绍如下:

(1) 确定研究对象及其类型。首先,研究对象一般来自于社会科学各研究领域中存在的现象或问题。再者,计算实验源于复杂系统科学的方法论思想,故其研究的对象不是那些静态的问题,而是那些用“还原论”等无法解决的动态演

化问题。

研究对象可能来自于社会问题的不同层面(包括微观层面和宏观层面),在研究过程中需要关注微观和宏观多层次间的联接关系和多向反馈问题。对于最终的研究结果,需要采用不同的方式来阐释和表达,将定性描述和定量分析两种方法结合起来,才能更好地实现研究目的。

(2) 寻找研究视角和切入层面。社会科学计算实验的研究对象来自于复杂的社会现象或问题。对于同一个研究对象或问题,可以从不同的角度和层面进行分析,但并不是每一个研究角度和研究层面都是有价值或者有意义的。再者,由于研究者自身的知识背景和偏好的差异,对问题研究的视角和关注层面也不尽相同。就复杂自适应系统而言,有如下几个重要的研究角度:

A. 系统结构层面的研究。从系统结构角度来研究问题,重点关注以下几个方面:一是系统结构的状态,例如由多个处于不同地域的企业构成的供应链,各个企业的生产能力、企业间的供货量,以及运输时间和成本等;二是系统结构的特征,如供应链网络中企业结点的空间分布状态、聚集程度等;三是系统结构的演化过程,由于系统是一个动态的演化过程,且系统中的各个个体相互作用,使得整个系统结构不断的演化,如供应链网络结构和层级的动态变化。

B. 主体间的适应性与交互行为。自适应系统中的主体具有一定的学习能力,在主体之间相互交互的过程中,这种学习行为能够使主体具有更强的环境适应能力,获得更多的决策信息,促成主体之间的作用关系与作用强度的变化。倘若从系统整体层面来看,群体行为的产生便源于主体间的竞争、合作等适应性和交互行为。

C. 系统宏观与微观之间的关联。信息和物质的流动是从系统中的一个个体向另一个个体的传递过程。每一个个体由于它所处的系统层次不同,它们对这些信息的反应、对某一事物的态度都会不同。例如组织当中的信息发布者和任务执行者,面对同一个信息时,会采取不同的应对行为,同时两者之间也会发生一定的信息交互和反馈。正是微观个体之间复杂的交流和反馈作用,才形成了系统宏观的有序或无序状态,即在一定情况下系统宏观层面出现所谓的涌现现象。

(3) 界定研究对象的时间和空间特性。一方面,选定的研究对象可能是历史上已经发生的事情,也可能是正在发生的事情,或者未来可能发生的事情;另一方面,研究对象虽然来源于现实问题,但经过抽象加工之后,系统主体的活动空间未必能够和现实物理(地理)空间一一对应,主体的活动空间可能是某类具有抽象特征的空间。只有界定好了对象的时间和空间特征,才能够根据需要采用相应类型的模型。

(4) 设定实验目的。社会科学计算实验是一种科学的实验方法,通过这种方法可以达成多种实验目的:

A. 寻找现象产生背后的原因。例如供应链管理过程中的“牛鞭效应”,社会心理领域中的“邻居效应”和“从众效应”,产业集群产生过程中的“聚集效应”等等,通过对这些社会现象产生的背景进行调查分析,采用计算实验的方法进一步建模模拟,可找到产生这种现象背后的原因。

B. 验证现有观点,发现新理论。例如社会学家和经济学家可以通过各种调研和数据挖掘的方法,从社会现实中发现和总结出某些社会或经济发展理论,然而这些理论多属于定性的描述,并且具有严格的条件限制,这些理论可能只是系统发展过程中的某一个或某几个个体发展的特性,而不能作为一种普遍规律。采用计算实验的方法,可以灵活、全面地考虑问题,发现某些理论的不足之处,甚至在实验的过程中可以发现新的理论。因此,社会科学计算实验是理论创新的重要手段。

C. 分析系统的状态特征和演化趋势。系统在不同的演化阶段表现出不同的特性。例如在证券交易市场中,不同类型的投资者对于变化的宏观政策、实体经济,以及公司业绩和市场走向等信息,有不同的解释和预期,引起投资策略的变化。所有投资者的买卖行为导致市场行情的变化,形成证券交易市场的状态特征和演化趋势,也就是通常所说的“熊”市、“牛”市特征。

D. 寻找满意的控制模式。实现一个目标的途径可以有很多种,但是不同途径所耗费的时间、资金人力和物质等资源都是不一样的。通过计算实验模拟,可以在多种方案的比较中剔除那些明显不合理的方案,找到较为恰当的解决办法。

## 2. 界定研究的环境

研究对象必然不是孤立存在的,它受到周围环境变化的影响,并反过来影响着周围环境的变化。研究的环境指的是研究对象所处的研究背景,包括问题所处的自然环境、社会环境以及这些环境的变化模式。

(1) 自然环境的界定。自然环境是研究对象的直接影响因素,这里所讲的环境资源主要包括各种影响研究对象发展的原材料资源、公共基础设施资源、地理生态资源等。这些资源环境作为社会系统及其子系统的输入条件,参与系统内部的演化过程,同时受到系统输出结果的影响。因此,在社会发展的过程中,考虑到系统输入与系统输出之间的相互影响,必须高度关注可持续发展问题。例如在太湖周边经济的发展过程中,必须考虑资源消耗和废弃物排放等对环境的影响。

(2) 社会环境的界定。社会环境主要是指研究对象所处的社会制度、文化习俗等因素。其中包括社会环境中的社会法律法规、道德行为规范、文化风俗

等,这些因素都影响到社会主体之间的交互规则。例如与计划经济环境相比,市场经济环境下企业的行为决策权力要更大。

(3) 环境模式的变化。由于环境受到系统输入和输出的影响,因而环境在演化过程中处于不断变化的状态。在实际的研究过程中,有时候可根据需要将某些环境看作一种“稳态”,而在另一些研究中则根据实际情况,需要将环境看作是变化的。

研究环境的界定是一个不容忽视的问题,许多研究成果中没有给出研究对象的环境及环境的变化模式,这使得后继研究者无法重复同样的实验过程,也就得不到预期的实验结果,这正是演化理论强调时空平移性的重要原因之一。只有清晰明了地界定实验环境,才能够对计算实验进行重复,同时也才能够更好地达到虚实结合的目的,将实验结果用于实际的管理过程。

### 3.3.2 设定研究的基本假设

针对所要研究的社会问题,根据研究的对象和目的,有选择地构造对象所处的环境和行为条件等,这些就构成了模型的基本假设。它建立在社会科学研究中某些被证明或证实了的社会规律、常识、统计规律等的基础上,是计算实验研究的基础。通过假设条件的设定,才能够为计算实验的处理提供背景与依据,才能为计算过程提供初始条件和边界条件,才能够界定研究成果的适用范围。

一般情况下,对于社会科学的计算研究可以考虑如下一些基本假设:

(1) 环境资源的假设。在现实的社会问题中,研究对象的环境可能是复杂多变的,那么在具体问题的处理过程中,需要提取重要的影响变量,将资源表达为研究对象、时间变量、产出结果等因素的函数。这既反映了系统内部与外部环境的关系,又体现了资金、物质、信息等资源的自身特性。

(2) 主体基本属性的假设。对于系统中的个体来说,既有共性又有个性,差异化使得整个系统的演化结果呈现出多种不同的情况。另外,对主体基本属性的假设可以依据不同的理论,对应不同的研究领域,将系统中的独立决策主体分为社会人、经济人或自然人等。例如可以假设主体是有限理性或完全理性的,主体的目标也可以是追求最优解或者满意解,面对具体问题时,需要根据现实情况选择合适的理论依据。

(3) 主体行为偏好的假设。主体除了基本属性的假设之外,还具有行为偏好等个性特征,这是主体在决策过程中的重要影响变量。例如在决策过程中,主体可以表现为自利或利他行为,或者同一个主体可以以某一个概率表现出自利或利他行为,而这些偏好的选择是根据环境的界定设计的,反映了现实世界的状况,是社会群体特征的细化。在某种程度上,个体的行为偏好及其分布,影响着

系统演化的结果和由此形成的系统结构,反过来,一个系统的总体特征或结构也影响着每一个个体的行为偏好,演化进程中的个体就是在这种制约下,通过一代代的遗传和变异,形成不同的演化路径,并将演化进程传递下去。

(4) 主体信息感知的假设。在现实社会中,信息的不完全或不对称现象是普遍存在的,由于人们的个人精力、智力与能力总是有限的,不可能在进行决策时了解所有的相关信息(王国成和黄韬,1996)。作为社会实验中的参与主体,他们处于不同的信息获取位置,对信息的感知能力也不同,这就影响到每个主体获得收益的能力,继续成长的能力等,最终影响系统的演化结果。

(5) 主体间交互作用的假设。主体在系统演化的过程中,不仅受到周围环境的影响,还受到其他个体的影响,这种影响可以是直接的也可以是间接的。例如在谣言传播的过程中,传播源头的主体通过网络结构将谣言传播给每一个可能接收信息的主体,而这些收到传播信息的主体也就受到源主体的直接影响。在市场经济竞争环境下,每一个企业主体都通过市场状况来制定自己的竞争价格,而实际上,每一个企业个体所制定的竞争价格都会通过市场间接影响到另一个企业主体的行为。因此在不同的研究对象和问题背景下,需要设定不同的交互规则。

(6) 主体行为决策的假设。行为主体在面对生存发展问题时,依据资源环境条件、自身属性限制、个体成长能力以及选择偏好等因素,依据一定的原则,做出当前最优或最满意的决策。而这些决策制定过程中所参考的原则,就是主体行为决策的假设。

(7) 主体学习能力的假设。主体在周围因素的影响下不断学习以适应环境的变化。例如假设主体决策取自有限个数的行为规则集合,在演化中由于外部选择压力而不断淘汰“获利”较小的规则,新的行为规则可通过学习或自身变异而产生,并且可以遗传。计算机的处理能力和存储能力有限,有限个数的行为规则集合决定了模型的可计算性,没有这样的假设,就无法实际建立可计算的模型。主体学习能力的假设,决定了主体具有智能性和自适应性。如果没有主体学习能力的假设,人工社会系统就不是真正意义上的三层结构,这样的系统可以研究一般性的问题,但对于复杂社会问题的研究,特别是涉及人的心理和行为演化问题的研究存在着先天的不足。

(8) 系统事件的假设。系统事件的发生可能是按照一定的周期或规律发生的,也可能是按照一定的概率随机发生。系统事件会对主体的决策行为产生影响,例如一些突发事件会在某个时刻导致主体非理性的、无法预测的行为,这种现象在社会经济演化中经常出现,这些行为在非线性的作用下,可能对系统演化产生决定性作用。在计算实验中,需要基于这样的假设,合理设置主体的行为

规则。

### 3.3.3 建立可计算模型

构造模型是研究和解释客观世界的一种手段(杨健等,2002),采用计算实验的方法来研究社会科学问题需要构造计算实验的可计算模型,这是计算实验的基础。

计算实验模型是计算机模型的一种,构造计算实验模型的关键不在于图形化人机界面,也不在于抽象的程度,而在于表达方式。计算实验模型应该能够简单而直接地表达社会系统复杂的结构和主体间的相互作用,可以使人们能在比原问题所处的条件更为有利的条件下研究该问题。

我们之所以在计算机上进行社会科学实验,是因为使用计算机来实现计算实验模型有很多潜在的优势。与现实情境中的实验观察、控制或操作相比,在计算机上实现计算实验模型可以提供许多在现实世界中难以获得的数据,可以控制计算实验过程的进展速度和次数,控制实验环境的复杂程度,或改变各种实验参数、动态重组程序的功能模块及计算流程等(张建伟,2001)。

对社会科学领域的研究者来说,在实际工作中需要根据不同的研究对象和问题,建立不同的模型。例如有些人研究系统的结构层次、有些人研究系统的资源分配、有些人偏好于研究系统的行为演化等,不同的研究内容所对应的计算实验模型也必然是不同的。但是不管研究者的需求有多大差异性,建立的模型都应该可以使人们从不同的侧面、不同的层次,通过反复、可控的实验去认识问题的原型(杨健等,2002)。

在复杂自适应系统计算实验的建模过程中,应该注意到模型的特点有:

(1) 模型的层级性:计算实验模型应该让研究者在不同的侧面、不同层次上分析社会系统的原型。

(2) 模型的扩展性:计算实验模型应该能够容纳其他任何可以符号化的模型,如数学模型等。

(3) 模型的能动性:计算实验模型应该能动地反映原型,乃至在某些特征上超越原型(杨健等,2002)。

(4) 模型的特征性:计算实验模型应该能够反映原型要素之间存在的关联特征或内在联系。

(5) 模型的演化性:计算实验模型应该可以描述系统多个层次的动态特性,包括系统层次、主体层次,以及主体的基元层次中的学习和适应特性。

(6) 模型的标准性:计算实验模型应该可以使用通用的计算技术,在通用的计算机系统上实现,便于交流。

同时,在相关的计算实验模型设计的过程中,应该认真考虑以下建模关键点:

(1) 系统环境的建模。我们已经在前面的章节中介绍了环境界定的重要性,其中不管是自然环境还是社会环境都是系统中主体的重要影响因素。因此,在建模的过程中需要将系统环境与主体之间的关系考虑进去。实际上考虑环境与主体之间的关系,就是如何建立环境模式转换的过程,例如可以将环境变量看成是时间变量、主体活动等因素的函数表达式。

(2) 主体对象的建模。将现实系统抽象为计算机模型,是计算实验方法实现的重要基础。计算实验模型不是也不可能是对社会模型的完全复制,而是有选择地提取模型特征,创造性地构造模型表达方式的过程。例如在谣言传播的过程中,对参与主体进行抽象时,并不需要将每个个体的身高、体重、皮肤颜色等无关乎问题研究的属性特征抽象出来表现在计算实验的模型中,而对于每个人面对谣言的态度这一属性特征,则需要对其进行抽象,并用恰当的方式在计算实验模型中表达。

(3) 主体演化规则的设计。主体是模型的中心,主体行为规则的设计是系统建模的关键,在模型行为规则的约束下,主体在系统环境中经过多个周期的不断迭代,也揭示了系统的演化趋势。

主体的演化规则受到多方面的影响,除了受到自身条件限制外,还会受其他行为主体的影响,甚至和其他行为主体之间有着某些制约关系。例如在产业集群的计算实验建模过程中,单个企业的演化受到自身资源的限制,不能够任意提高自身的成长速度;同时还与其他企业之间存在着竞争(合作)关系,这种竞争(合作)关系也包括了供应链上下游之间的交易过程。

在了解了主体演化规则的影响因素之后,还要注意主体演化的内容和主体的属性是否在演化过程中发生了变化。一般而言,主体演化规则关注的重点在于主体的记忆、学习、适应、决策规则、遗传和突变等特性。对于这些特性的实现和表达,可以借助于各种演化算法和学习算法,根据不同的算法特长和研究的实际问题来选择。

(4) 系统模型数据结构的设计。主体在系统内部的演化中存在着各种演进方式,其中包括主体与主体之间的数据交互、主体与环境之间的数据交互、主体自身属性的遗传变异等。这些交互或者遗传变异的过程中都伴随着系统属性数据的变化,这些系统数据的交互演变,可以看作数据结构之间的操作。通过适当的数据结构描述来表达社会系统的结构,解决计算实验“计算什么”和“如何计算”的问题。例如在谣言传播的过程中,系统主体构成了一个复杂网络,这一网络结构反映了主体之间的交互关系,可以借助数据结构设计来合理表达信息的

传递、主体属性的演进等数据处理过程。

(5) 数据分析与可视化表达。在系统的演化过程中,会产生大量的中间结果,对于这些中间结果进行分析和处理,可以得到许多有意义的启发与暗示,这就需要在模型中采用统计分析等数理方法。另外,除了中间数据的处理之外,在系统的演化的过程中,还需要将模型的具体表达用形象的方式展示在计算机上,这就需要建立模型的可视化空间,以便让人们更直观地看到系统的演化过程,更形象地揭示系统的演化规律。

### 3.3.4 实现计算实验

计算实验的实现更多地涉及计算机技术,包括设定计算实验的环境、变量、边界条件、关键算法、计算公式和实验结果的可视化等多个环节。实现计算实验需要考虑如下一些主要内容:

#### 1. 计算实验的环境

计算实验环境指的是完成计算实验所需要的计算机软、硬件环境和其他相关资源。根据研究问题的类型、规模、目的等,需要构造适当的计算实验环境,选择适当的工具、编程、调试。通常需要考虑如下一些细节:

(1) 计算实验所依托的计算机操作系统环境。考虑到可移植性,一般选用通用的操作系统(如 Windows、UNIX、Linux 等)。

(2) 构建计算实验模型使用的编程语言。计算实验模型的开发可以不借助任何类型的复杂系统建模工具或开发环境,直接使用通用的计算机编程语言。比如 Java 和 C++ 语言等目前常用的计算机编程语言,都具有强大的算法表现能力。对于具有良好计算机编程能力的研究者来说,这些可以作为计算实验首选的编程语言。

(3) 可借用的软件建模环境。适当的建模和数据处理软件,可以提高计算实验研究程序的开发效率,使研究者把精力更多地集中在问题的求解上。当前很多复杂系统建模工具都针对社会科学问题的建模提供了大量的公用程序模块,借助这些已有的模块程序,研究者可以极大地提高建模效率和增加模型的有效性。目前学术领域比较常用的相关建模工具有 SWARM、RePast 等。

(4) 计算实验运行的方式。例如单机计算、分布式计算、同步协同计算等。小规模的计算在单台个人计算机上就可以完成。对于较大规模的计算,需要多台计算机来共同完成,采用何种运行方式,需要根据实验所研究问题的类型来确定,在必要的情况下可以采用分布式计算、同步协同计算或其他计算技术。

(5) 计算实验数据存储方式。根据计算过程和结果的数据量的大小,确定选用什么样的存储体系,如本地硬盘存储或网络存储等。当多组实验数据需要交叉整合分析的时候,还需要考虑如何组织和存储多组实验的实验数据。

(6) 确定是否要求对实验的中间结果数据进行后期的离线分析。这关系到在计算实验结束后,中间结果数据是否需要长期保存,如果要求对实验的中间结果数据进行后期的离线分析,这些结果需要放置在可以长期保存的设备上。

(7) 确定计算实验程序是否需要与其他分析软件接口。其他分析软件可以是自行开发的专用软件、学术研究的开放软件或商业软件等。接口有两种主要途径:简单的接口途径是通过数据接口,即把计算实验的结果读入其他程序里处理,这需要事先规划好计算实验的输出数据形式,使之能够被其他程序解释;相对复杂的接口途径是程序接口,例如在计算实验的程序中调用其他分析软件的库函数(或子程序),这需要详细了解相关其他程序的接口规范和功能,然后在计算实验程序的适当地方定义接口。

(8) 考虑是否需要专用设备,如专用图形处理设备等。大多数简单的计算实验程序不需要额外的专用设备,如果对显示速度和精度有较高要求,例如需要与地理信息系统整合,就需要专用的图形处理设备,以高速和高质量的处理能力满足计算实验的需求。另外,在数据输入环节中,可能会用到一些专用的设备,完成大量原始数据的导入,如扫描仪和智能识别设备。

## 2. 计算实验的边界条件定义

边界条件是指计算实验过程中的限制条件和控制参数,例如规定演化迭代的计算次数;人工对象的总数是否改变等。例如,定义人工对象的总数不变,允许新的人工对象进入系统,以及改变人工对象在系统结构中的关系等。这些边界条件决定了计算实验模型的开发与控制。

## 3. 实验变量与初始数据设计

实验变量包括若干个自变量和因变量,计算实验研究中需要对变量分类,定义各个变量的属性,并对它们之间的关系进行可计算化描述,包括基于数学公式的量化描述和基于“条件/行为”(IF/THEN)的规则描述等,进而观察和评估自变量的变化对因变量产生的效应。

初始数据是计算实验开始计算的起始条件,是对系统初始状态的描述。建立初始数据一般有三类主要方法:

(1) 采用实证研究或理论研究得到的数据。采用这类数据作为计算实验的初始数据,与实际问题的结合非常紧密,使计算实验具有很强的针对性。这种方

法一般适用于研究给定条件和环境下的特定社会系统。

(2) 采用计算机辅助信息系统记录的数据。计算机辅助信息系统使用标准化的编码数据来记录该系统观测到的现实社会已经发生的信息,一般记录的基础数据是客观的、唯一的。利用适当的数据交换与变换技术,实现与计算实验的数据整合,用于研究某一时刻某一社会系统在特定初始条件下的演化过程,此方法与结果具有一定的现实意义。

(3) 采用随机生成的数据。为了更好地对社会系统建模,让计算实验模型能够更有效地反映社会系统的不确定性,在很多情况下需要使用随机的初始值。当然,这些随机的初始值需要根据实际情况限定在一定范围内。对随机初始数据的处理也需要结合智能演化算法,这样才能更好地突显系统演化的规律性。

#### 4. 关键算法与数理模型

关键算法是指针对计算实验模型各层次所设计的与现实系统演化规律相对应的算法,例如对应智能主体的基元层次的遗传算法,对应智能主体层次设计的自组织算法等。数理模型更多的是指计算实验模型中描述系统宏观、微观动力机制的数学方法,以及对系统状态进行评价的各类数理模型等。

#### 5. 计算实验的实现过程

计算实验的实现过程通常需要给出所研究问题的可计算细化模型、计算程序流程图和适当的数据结构描述、计算实验实现的具体步骤、主要的功能模块,以及数据的变化或流动过程。

#### 6. 实验结果的可视化

通过可视化计算技术可以把实验或数值计算获得的大量抽象数据转换为人的感官可直接感受的计算机图形、图像,从而便于进行数据分析和研究(李集明,2003)。这一类方法能够有效提高对计算实验模型结果的分析效率。在部分实验模型中还需要与地理信息系统整合处理,通过地理信息系统的可视化描述方式提高实验模型的效率和效果。

### 3.3.5 实验结果的评估与比较

在计算实验的研究中,实验结果的评估分析与比较是一个很重要环节,它与研究结果和结论直接相关。用计算实验方法研究社会系统的演化问题,需要建立对计算研究方案和结果的评估标准。这里有几个需要解决的问题:评估的对象、评估的内容、评估的依据、评估的方法和评估的结果。

#### 1. 评估的对象

对于社会科学计算实验而言,在确定了所研究的问题后,评估对象就是明确

的,其对应于所需要研究的社会系统所构建的计算实验模型。通过对该模型的演化状态评估,实现对现实社会系统运动规律的把握,找出研究者感兴趣的结论。

## 2. 评估的内容

由于研究领域和研究问题不同,计算实验需要评估的内容也不尽相同。通常情况下对社会系统的评估常常涉及多个因素或多个指标,这就要求根据多个因素对社会系统的研究对象从不同角度做出综合评估(西利亚斯,2005;宋健,1994)。例如对金融市场的评估,除了交易所的各种价量分析指标以外,可能还需要评估投资者的心理预期、行为偏好的变化等。由于计算实验是在人工社会系统上进行的实验,研究人员能够获取所有人工系统演化的相关数据,由此可见计算实验可以评估的内容往往比需要评估的内容范围更广。所以,在计算实验设计中,需要研究人员改变社会科学研究中传统的数据获取和评估模式,研究更有意义的评估内容,通过有效的评估来更好地设计和优化计算实验模型。

## 3. 评估的依据

就计算实验本身而言,评估的依据是计算实验过程中采集到的各种数据。计算实验中对应不同的计算方案,记录系统演化过程中的各种与研究问题相关的数据。在对这些数据综合评估的基础上,得到关于系统演化的信息,分析系统演化的趋势,找出影响演化过程的因素及其影响程度。这种研究思路与自然科学中的实验环节也相对应,比如利用各种方法采集实验数据,并对这些数据做针对性的分析和评估。如果计算实验研究与理论研究的计算数据和实证研究得到的数据相衔接,那么这些数据可以同时被当作评估的依据。

## 4. 评估的方法

选择适当的评估方法对计算实验模型的状态和演化过程进行评估对计算实验的研究来说是非常重要的。由于对社会系统的评估既需要从宏观层面进行系统分析,又需要从微观层面对其系统要素进行分析,所以对计算实验模型也应当建立有效的多层次评估体系,综合应用多个评估方法,以深入理解计算实验模型的复杂性,得出更有意义的研究成果。

## 5. 评估的结果

计算实验结果的评估与比较,是分析计算实验结果并导出研究结论的环节。评估是对实验结果进行分析和比较的过程,评估结果需要全面反映与研究问题相关的系统演化过程,形成研究的成果内容。在计算实验过程中记录各种特征值和各层次状态演化的量化特征,集成使用各种有效的数学方法,如相关性分析

等,对量化的数据进行处理以获取包含在大量数据中的有效信息,在此基础上得到有意义的研究结果。

大多数情况下,实验结果通常采用合适的可视化技术来表现,以容易理解的、相对直观的、含义明确且不具有二义性的方式展示,比如各类数理统计曲线图、各类统计表等方式。当然,必要的时候可以进行一定的加工处理,以获得更加直观的视觉效果,但任何修饰都不应该改变原始的实验结果。

### 3.4 社会科学计算实验的技术路线

社会科学计算实验的技术路线包括:社会科学计算实验的程序设计方法、计算实验模型的基本框架、数理模型、推理方法、演化和学习方法等内容。社会科学计算实验研究思路和主要技术路线的主要内容见表 3.2。

表 3.2 社会科学计算实验技术路线的主要内容

计算实验	利用计算技术对社会系统演化机制、要素与环境以及要素之间交互作用及其系统宏微观之间的动力学行为进行模拟,通过可控、可重复的实验,揭示社会系统演化的一般原理和整体规律,从而更好地指导社会实践
理论基础	基于社会学、系统科学、数学、计算机科学的理论和方法,借鉴心理学、生物学、物理、化学等自然科学多个学科的相关理论和研究方法
研究路线	定性定量、科学实验、虚实结合、综合集成
计算实验建模技术	有限状态自动机、多主体系统、元胞自动机等构造人工社会的计算机技术
实验模型结构建模方法	图论、复杂网络等描述系统结构的数学方法
智能主体的适应性及其之间交互作用的建模	各种智能演化算法、博弈论等描述系统要素间交互作用的数学方法
需要实现的基本演化机制	自组织机制、广义进化机制
演化计算结果综合分析工具	包括各种统计工具、描述系统特征的函数和描述系统结构的数理模型等
可以借用的软件系统	SWARM、RePast、MATLAB 等软件系统
可以使用的计算机编程语言	面向对象的编程语言,如 Java、C++ 语言等

### 3.4.1 社会科学计算实验的程序设计方法

#### 1. 面向对象的程序设计方法

社会科学的计算实验模型要求建模人员能够很好地描述社会主体的各种行为,但是在模型中主体的数量和属性都可能不确定。因此,使用传统的面向过程的软件开发方法可能无法保证模型的有效性,或是极大地增加了模型的开发时间。而面向对象方法则可以提高计算实验模型开发和运行的效率。

面向对象的实验系统开发方法是指通过建立一些描述抽象数据结构和对应计算过程的虚拟主体,同时通过分析这些虚拟主体之间的关系来处理建模人员需要解决的实际问题。这里的虚拟主体是指抽象代表现实世界中实际事物的软件编程实体,它可以描述一个人、一个企业或一个事件等等。在计算实验模型中所有的虚拟主体都有与它们对应的状态和行动空间,不同的状态空间数据决定了虚拟主体目前所处的状态,而虚拟主体的行为则由在它上面定义的各种方法所决定,这些方法可能会改变虚拟主体的状态或是实现不同的实验功能。虚拟社会的动态性和继承性也可以通过能够复制新主体的方法实现。通过构造新的动态对象可以更好地描述不同社会主体之间的关系,更好地体现计算实验方法的优越性。同时面向对象的程序设计方法体现的是自下而上的建模思想,这与计算实验的建模思路相符合,能够便于处理复杂系统的演化等一类探究性的问题,例如供应链的协调与优化等问题研究。

目前学术研究最常用的面向对象语言是 Java 语言,Java 语言的免费、开源和跨平台等特性都促进了其在学术领域的推广。同时其自身的封装性、继承性和多态性等面向对象的特性也使其在计算实验模型的构建过程中体现出一定的优势。当然目前国外学者也推出了一些新的面向对象的高效开发方法,这对计算实验模型的开发效率有较大的提升,这些方法在本书后面的内容中将有所涉及。

#### 2. 数值与非数值计算

在计算实验模型中计算的概念可以是数值计算,也可以是非数值计算(或称为符号计算)。数值计算处理的计算对象一般具有量的概念,也就是具有大小或方向的概念,通常这样的计算是基于数理模型的计算。非数值计算处理的计算对象一般不具有量的概念,也就是说其处理对象不具有大小或方向的概念,例如文字处理、图形处理和使用字符串的样式比较、模式匹配等。非数值计算的计算处理一般以逻辑运算为主,在计算实验模型中比较常用的是基于规则的计算。

对社会系统要素的一些动力学行为模拟,可以基于已有的数理模型,按照该

模型的计算描述编程实现。一般来讲,这样的编程工作对于有一定计算机编程经验的人来讲,没有太大困难。在社会系统演化问题的计算实验建模过程中以及问题的求解过程中存在着很多不确定性因素,对于一部分计算对象,也许不适宜采用直接量化的处理,或很难直接量化,或没有现成的数学方法表示。对于这类计算对象,可采用将其抽象为可适应性变化的规则,使用基于规则的计算。例如对于智能主体的心理、行为等计算对象,设计适当的计算流程,让每个智能主体在目标驱动下适应性调整自身的行为并改变状态,同时让它们之间在一定的环境下相互作用,通过对微观要素的动力学行为和系统演化机制模拟,实现社会系统的整体涌现过程。把定性描述的社会现象用计算机语言来描述,对应的是基本的输入输出关系,与人们的直观感知接近,便于理解和实现。

至于计算实验模型中各要素间的空间和时序结构关系可以用图论等数学工具描述,一般采用多维、带权重的动态网络模型刻画要素间可变的结构关系。实验模型中虚拟主体的行为活动空间一般定义在 N 维有限空间,根据研究问题的需要,每一维分别表示经过适当分类的主体特征行为。演化计算时间用离散的时间序列表示,所有各层次子系统和智能主体在每一个演化计算“时刻”都有一组特征值描述该层次当前的状态并将其记录下来。

### 3. 计算实验程序的一般框架结构

计算实验的实现过程一般采用自下而上的研究方法。从决定智能主体心理的基元层次出发,使智能主体根据变化的环境而不断学习,适应性调整各自的决策和行为并相互作用,最终导致系统的演化。演化计算不仅与系统的现状有关,还与其演化历史有关。计算实验程序的一般实现过程如下:

- (1) 对各子系统或要素的输入和输出进行大致分类并赋予唯一的编码。
- (2) 把每一类输入和输出与一组计算机的处理程序相对应。
- (3) 使用一组 IF/THEN 规则(转换规则集合)描述输入与输出的对应关系。
- (4) 在演化计算过程中,根据子系统或要素的输入和输出,综合计算人工社会的状态变化,形成下一步计算的输入。
- (5) 利用适当的智能演化算法动态调整系统的整体结构、要素间关系和相互作用,以及计算人工主体的学习和适应性变化。
- (6) 把每一步演化计算中的系统状态、人工主体的转换规则集合和属性等参数进行统计处理,就得到整个人工社会演化进程的量化特征。
- (7) 集成使用各种数学分析方法,对量化的数据进行处理,获取其中包含的有效信息,在此基础上对社会系统的演化问题作进一步研究。

计算实验程序的一般框架结构如图 3.3 所示。图中虚线框的部分是数据结

构,虚线描述数据流动方向。实线框部分是计算模块,实线表示计算流程。计算流程图可以在单机上实现,也可以在多机协同计算网络环境下实现。

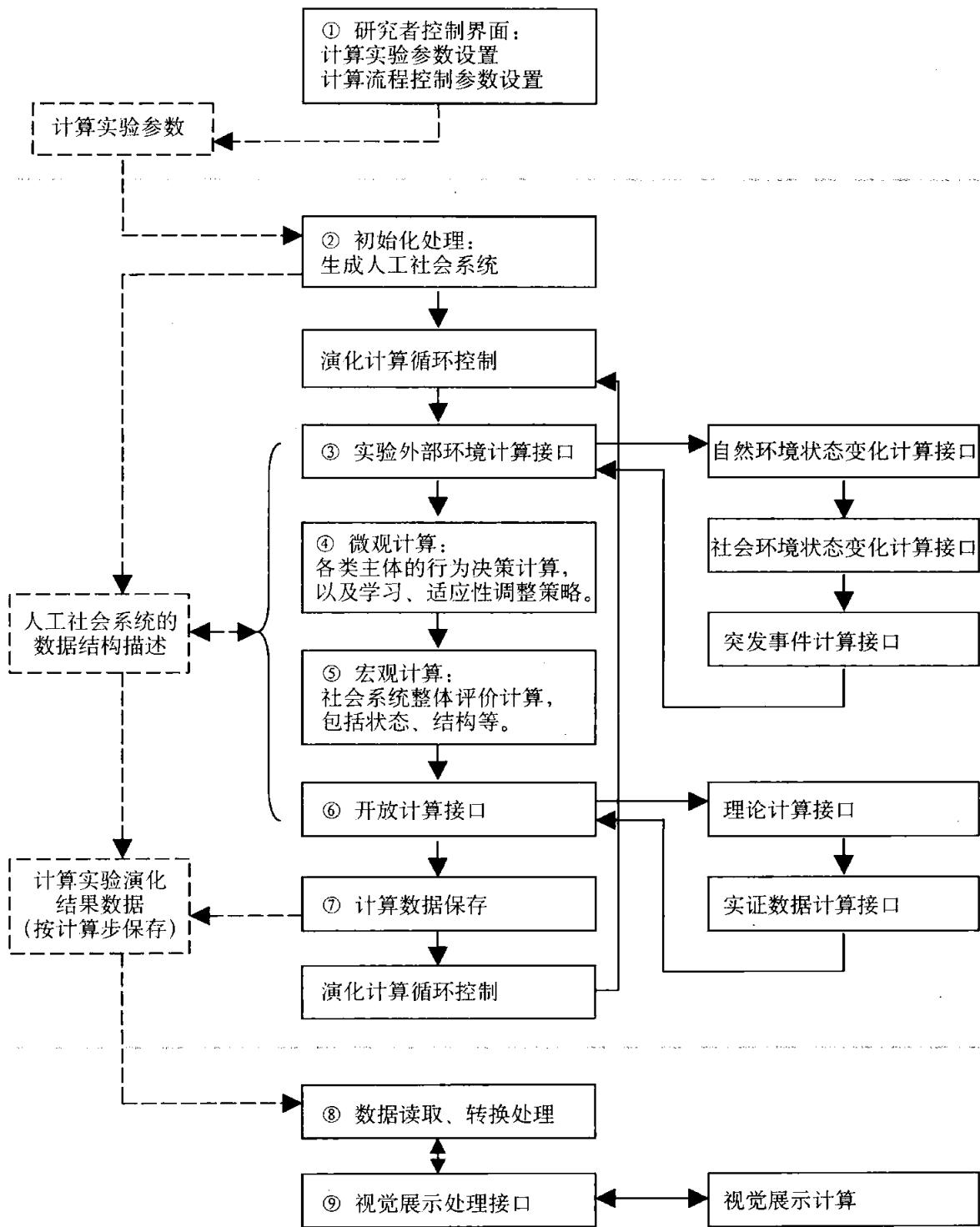


图 3.3 社会系统计算实验的一般框架结构

#### 4. 典型的智能主体决策与学习算法框架模型

典型的智能主体的决策与学习算法框架模型如图 3.4 所示。图中虚线框的

部分是数据结构,虚线描述数据流动。实线框的部分是计算模块,实线是计算流程。

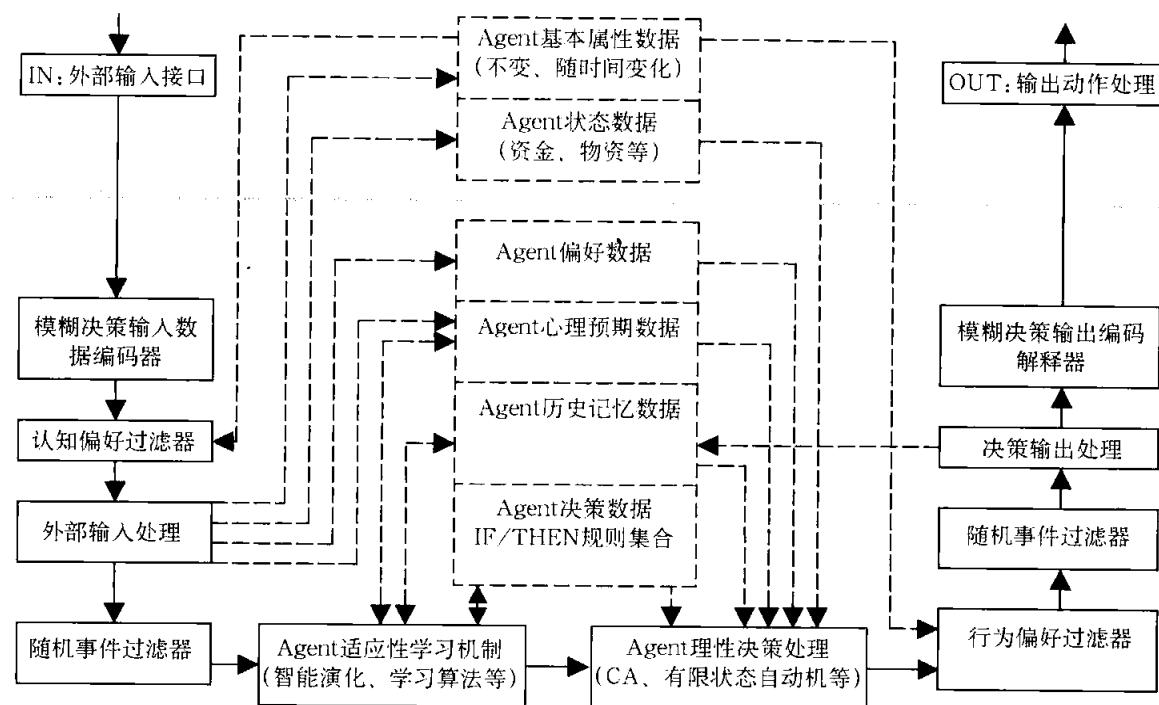


图 3.4 典型的智能主体的决策与学习算法框架模型

引进智能演化算法使得在社会系统演化计算中,个体的行为不再是事先给定的一组固定选择,而是在自组织和广义进化机制共同作用下,个体根据外部环境和自身属性适应性调整自身行为规则,并在对系统状态判断基础上作出的动态选择。这一方面把系统宏观状态和每个个体在文化基因层次的微观决策联系起来,另一方面,在演化计算中从微观层次上模拟了社会系统的动力机制。

### 5. 系统演化过程中的随机性

所谓随机性,也就是不可能由初始条件来完全决定将来的后果。从复杂性科学的观点来看,复杂系统的演化既有因果关系,又有随机性(吴彤,2005)。随机性是描述现实社会系统的一个必不可少的概念。随机性除了存在于系统的演化进程中,还大量存在于社会主体的思维过程中,比如人的思考过程等。使用计算实验方法研究复杂社会系统的演化必须考虑系统的随机性所带来的各种影响,如果实验模型都是基于确定性信息的,那么有可能得出一些完全违反社会规则的结论。例如在企业或是个人的决策过程就受到各种随机事件的影响,从而做出很多原来无法预期的决策方案。

由于系统各个环节的随机性特性,可能导致计算实验模型产生一些新的演化结果,并由此得到一些更好的结论,这也从另一个侧面体现了社会系统演化的

涌现性。

在计算实验模型的演化计算中,为了全面揭示系统演化的规律,模拟系统自组织和进化过程,虚拟主体需要结合随机性计算以更好地反映社会现实,并由此产生系统演化的多样性。

## 6. 演化计算程序设计的特点与方法

一般的计算机程序设计可以采取模块化的程序设计方法。模块化的程序设计可以使程序结构清晰,同时也便于调试。通过模块化的程序设计思路可以很好地解决一般的问题,但是复杂社会系统的演化具有多种可能的路径,任何一条可能的路径都有现实化可能,计算实验研究方法的模拟过程应该反映这样的可能性。所以,基于复杂系统科学思想的计算实验研究方法具有明显的探究特征,再加上模拟环境中需要加入的随机因素,计算程序执行的结果就是不确定的,存在多种可能性。这给程序设计带来很大的困难,由于没有已知“正确答案”的参照,面对一个计算的结果,我们无法知道其中是否包含程序设计的错误,我们是否应该相信这个结果。它可能是毫无意义的错误结果,但也可能是复杂社会系统演化的一种很有价值的新的结果,它不仅反映了系统的一种本质特征,还可以通过它了解或发现新的系统演化规律。

针对计算实验研究方法程序的探究特征,有必要在程序设计方法上进行改进,有效地减少错误的发生,通过相对的参照标准调试程序,最终保证软件系统的正确。一种可行的方法是采用“数据主导、整体同步、相对参照、由粗而细”的程序设计方法,该方法与原型法相类似,其具体实现过程如下:

第一步:在程序总体框架下,尽可能完整地设计全部数据结构,尽可能简洁地设计各个模块的执行程序部分,构造一个几乎只能反映动态运行结构、完整的简单程序。再用这个简单的程序来调试整个程序的流程。

第二步:逐步细化程序功能,同步编制所涉及的各个模块。每一步细化的程序都把上一步的程序作为相对参照,进行调试以保证程序的正确。把编制程序过程中每一步可能加入的随机处理,在下一步细化开始时先关闭。

第三步:重复第二步,直至程序调试结束。

这样处理的优点是:

(1) 由于数据部分与执行部分分离,而数据部分是基本上相对独立的,事先设计完成的,所以可把程序中可能的错误限制在执行部分。

(2) 由于主干程序的动态流程结构是在一个非常简单但完整的程序上调试,容易把握整体动态的过程和保证程序的正确。每一步细化是在主干结构框架下完成,故可以把程序中可能的错误限制在局部。

(3) 由于每一步细化的程序都把上一步的程序作为相对参照,这样进行调

试的结果基本可以保证各局部程序的正确。

(4) 对计算实验研究方法必需的随机处理作适当屏蔽,减少干扰,再加上程序编制中应有的细心和经验,就能保证所编制的程序按我们的想法运行。

(5) “数据主导、整体同步、相对参照、由粗而细”的设计过程也与我们人类对事物的认识过程相吻合,设计调试过程本身是一个人机交互的反复过程,也是我们对所要研究的问题不断认识深化的过程。一开始就对我们要研究的复杂社会问题或现象有一个非常清醒的认识,这样的情况是很少的。

当然,这样的程序设计方法也有不足,在逐步细化过程中为了保证主干结构整体的同步,会建立许多临时的“占位”程序段,这些“占位”程序段不是最后程序的组成部分,会在以后细化中被其他程序段代替。这增加了编程的工作量。但这个代价与保证程序的正确性相比是可以接受的。

### 7. 在计算研究中特别值得注意的几个问题

基于复杂系统思想的社会科学计算实验研究方法,定位在社会系统演化原理、基本规律的研究层面,聚焦于用计算技术,借助于模型,通过间接实验,研究和分析复杂社会系统问题。把社会学研究与复杂自适应系统、广义进化理论、认知科学、心理学、系统模拟、数学分析、专家系统等学科的思想方法和计算机技术结合,是社会学问题研究中计算实验的主要研究方法。它是研究社会科学相关领域理论和现实问题的一个新的方法论,为解决社会学研究的实验问题提供了一个新的有效途径。

目前,学者们一般都认同计算机技术在现实社会科学问题研究中的作用,特别是在数据分析中是必不可少的。由于计算实验在复杂社会问题研究中的应用是全新的,因此使用计算实验研究方法时有几个基本问题特别值得注意:

(1) 计算实验研究要坚持整体性和动态性。系统整体论强调系统各个要素之间的非线性关联性及其整体涌现,但并不完全否定要素的相对独立性;当然建模过程中追求系统的整体性质,但并不忽略要素的特殊性质(范冬萍,2003)。在构建计算实验模型的过程中要兼顾整体性和动态性,通过系统各个要素的微观特性演化出整个系统的宏观特征。

(2) 注意计算实验研究过程本身的复杂程度。社会系统是一个复杂系统,过分简单的计算研究过程与实际情况会存在较大差异,导致分析结果的不准确。但如果计算过程过于复杂以致我们无法理解其过程、分析其结果,研究就变得毫无意义。因而计算实验设计本身的复杂程度有一个度的概念,它与我们的对现实世界的认识和当前技术条件下的计算能力密切相关。

(3) 注意计算实验研究的客观性。受专业背景、认知偏好等因素影响,研究者有各自分析问题的视角和方法。如果计算结果在一开始就显式地定义在计算

研究的设计中,有可能产生误导,应该避免这样的情况发生。

(4) 注意计算实验模型的可理解性。计算实验模型中人工主体的行为规则、主体间的结构关系、主体间的相互作用及其由这些主体构成的系统应该构建在被大多数人接受、基本的、相对简单的假设之上。另一方面要注意,过多的假设会把计算实验模型的应用限制在较窄的范围。

(5) 社会系统问题的研究应该集成化。应该说,计算实验在社会科学相关领域的理论研究中有其独到的作用,通过综合使用多种研究方法在某种程度上比传统演绎分析模型更贴近现实,考虑的问题可以更全面,结果会更准确。同时也必须看到,计算实验本身也有一定的局限性,计算实验作为一种研究方法不可能解决所有复杂社会系统的研究问题,复杂系统的研究必须走综合的道路,而计算实验只是其中的一种工具和方法。

### 3.4.2 基本建模方法

计算实验方法采用自下而上的研究思路,综合集成多种研究方法和工具,通过对系统中行为个体建模并观察其行为决策与交互机制来研究系统整体特性的涌现。计算实验方法以计算机为基本工具,运用面向对象的编程技术将现实系统中种种要素进行抽象,在计算环境中产生需要研究的人工对象,通过人工对象之间的相互交往,来研究整个系统的动态演化过程。由于需要在计算环境中对人工对象进行建模,计算实验方法必然需要依托一个能够用计算机语言表述,适应于计算环境的基本建模方法,因此元胞自动机以及更为复杂的多 Agent 系统建模方法自然成为计算实验方法的主要研究载体。在计算环境下,以基本建模方法为载体,将学习方法、进化方法、推理方法以及博弈论、复杂网络、运筹优化、数理统计等数理方法与工具综合集成至计算实验方法体系中,对社会、经济领域的复杂问题进行深入研究的方法才能称之为比较科学与完整的计算实验方法。

#### 1. 元胞自动机

元胞自动机(Cellular Automata, CA)最初的创意来自于计算机之父冯·诺依曼(Von. Neumann)的一个研究生物体细胞自我复制的实验(Wolfram, 1982)。他尝试在一个长方形的平面上划分出若干个网格,这种网格可以用实格或虚格来表示,被称为系统基元或者叫元胞。元胞有两种状态,分别用 0 和 1 表示。在给定的运作规则下,通过网格的变化来观察元胞的演化过程,这就是元胞自动机的雏形。元胞自动机运作机理简单,但是能够很好地模拟很多复杂现象。通过简单的规则和结构,元胞之间的交互作用能够创造出大量的不可预测的行为(苏凤环,2006)。元胞自动机在社会、经济系统的诸多研究领域得到了广泛应用。

人工智能(Distributed Artificial Intelligence, DAI)的研究(范玉顺, 2002)。MIT的计算机科学家Minsky在他的“Society of Mind”一书中将社会与社会行为引入了计算系统并系统地提出了多Agent的概念(Minsky, 1986)。他将社会中的成员个体抽象至计算机系统中,并称之为Agent。Agent具有自己独特的技能,受到一系列社会行为规则的约束,由这些Agent有机组合而成的系统即为多Agent系统。Simon的有限性理论也是多Agent系统思想形成的一个重要基础(兰少华, 2002)。他认为个体工作能力的不足可以通过系统组织的分工协调来弥补。合理的安排个体分工,可以有效地提高系统组织的运作效率。从80年代中期开始,SFI研究所引领的复杂性科学的研究快速兴起,而作为其研究关键手段的多Agent技术也受到了广大学者的重视。随着信息技术与计算机技术的飞速发展,多Agent系统的研究在世界范围内得到了迅猛发展。

Agent在中文中被译为主体或代理。在多Agent系统中,Agent能够模拟人的行为,具有学习性、社会性、适应性等人的特性。一个计算系统中的模拟个体能否判定为Agent,其基本判断标准是建立的模拟个体是否具有智能,即是否拥有自己的知识库与推理规则,是否能够自主的与系统中的其他个体进行交互,个体交互过程中是否有知识的传递。通常运用多Agent技术的系统具备一个整体的演化目标,依据有限性理论,系统中的Agent并不具备实现系统整体目标的完整知识,没有控制系统全局的能力,多Agent系统可以看作是一个多智能实体构成的松散网络,系统的整体特性只有通过Agent的行为特性的集合体现出来。

由于Agent需要模拟目标系统中的个体行为,多Agent系统构建的过程涉及到计算机科学、生物学、心理学等多学科领域的知识,而多Agent系统的研究目标涉及人类社会生活的各个行业与领域。近二十年来,多Agent系统的研究在其体系结构、Agent通信、认知模型构建以及Agent协作机制研究等方面取得了一定的研究成果(兰少华, 2002)。从目前对多Agent系统中Agent的研究来看,Agent个体一般具有如下特性(兰少华, 2002; Michael, 1995):

(1) 自主性: Agent能够在没有外部因素直接干涉的情况下,根据其内部状态和对外部环境信息的感知,通过某种内在的行为机制决定和控制内部状态和自身行为。

(2) 反应性: Agent能够通过各种接口和通信机制接受外部环境的变化信息并及时作出反应。

(3) 社会性: Agent能够通过某种通讯语言与人或其他Agent进行交互和协作。

(4) 主动性: Agent能够通过内部行为机制驱动而采取主动行为,有目的地与外部环境交互。

(5) 适应性: Agent 能够在一定程度上根据自身的经验对外部环境的变化做出适应性的调整。

(6) 移动性: Agent 能够在系统环境中根据行为规则自主移动。

(7) 偏好性: Agent 能够根据其内部行为机制设定的不同而表现出诚实或无信、敏感或愚钝等特殊行为偏好。

当然,根据研究对象的不同,Agent 还可能拥有更多不同的特性。在多 Agent 系统中,基本的 Agent 都会具备前四种特性,研究人员也将具备前四种特性的 Agent 称之为弱 Agent。Agent 特性越多,所构建的多 Agent 系统越逼近现实,而系统建模过程也越复杂。因此,在明确研究目标的基础上,梳理 Agent 必须具备的特性,合理把握 Agent 建模的深度,以达到满足研究目标是运用多 Agent 系统进行研究的关键。

运用多 Agent 系统进行研究首先要将待研究的现实系统进行梳理,理清现实系统的体系结构、系统的功能、系统所处环境以及系统要实现的目标,同时区分系统内部的不同成员个体,明确 Agent 模型的构建对象;其次就是将系统的关键属性抽象出来,建立系统的 Agent 模型,设定 Agent 个体的成员特性、行为标准、交互规则以及设定 Agent 系统的演化机制和相关约束条件;最后通过多 Agent 系统的运行,来研究系统成员个体行为对系统整体特性产生的影响,在某些情况下可以将实验结果与现实结果进行比较分析评价,通过可重复的实验来推断和总结系统最终行为产生的原因。具体的研究思路如图 3.7 所示。

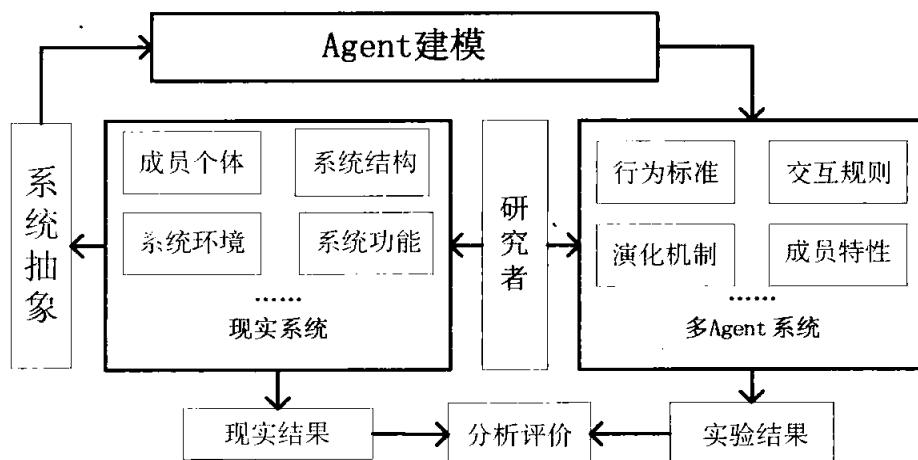


图 3.7 多 Agent 系统研究思路

Agent 具备智能性,能够很好地模拟社会系统中各种类型主体的行为,并且多 Agent 系统建模手段灵活,所建立的系统具备较强的开放性与适应性,因此多 Agent 建模方法目前是计算实验方法主要依托的建模框架。计算实验方法将学习、进化方法、推理方法以及相关数理工具融合至多 Agent 系统建模体系之中,

综合运用多种方法对社会、经济乃至自然系统的复杂问题进行研究。在本书应用篇中,关于供应链系统、金融股市、文化传播等计算实验方法应用案例都是以多Agent系统建模方法为载体进行研究的。

### 3.4.3 常用数理方法简介与应用

#### 1. 常用数理方法简介

在计算实验中常用的数学工具有系统动力学、博弈理论、复杂网络理论以及概率论与统计学方法等。下面先简要介绍这几种工具:

##### (1) 动力系统理论

动力系统理论起源于牛顿万有引力和力学定律,由动态微分方程或差分方程来表述,这些方程描述了各个变量之间随时间变化而变化且相互联系的结构。在具体问题上,微分方程用于描述以连续时间来观察的系统行为,而差分方程则用于描述以离散时间来观察的系统行为(盛昭瀚等,2003)。微分方程的概念最早由庞加莱从经典力学和常微分方程的定性理论提出,后经伯克霍夫、阿尔诺特等人的推进,在斯梅尔(Smale)的大力推动下发展起来。在社会科学中,用其可从宏观角度描述系统特征,但因忽略了系统中个体的能动性以及个体之间交互的复杂性,故单纯用动力系统理论来研究社会科学中的问题是不足的。在计算实验中,常把已有的动力系统所构造的模型用于以下两个方面:一是作为计算实验的主体或环境的规则;二是总体建模的基本框架。

##### (2) 博弈论

博弈论(Game Theory),又称对策论,是研究互动决策的理论,即研究决策主体之间的行为相互影响时,决策的选择与相互均衡问题。博弈论的正式研究起源于冯·诺依曼和摩根斯特恩在1944年出版的《博弈论与经济行为》一书。塔克(Tucker)于1950年定义了“囚徒困境”,纳什(Nash)分别在1950年和1951年发表的两篇关于非合作博弈的重要文章,提出了“纳什均衡”的概念并证明了其存在性,共同奠定了现代博弈论学科体系的基础。在此基础上,泽尔腾提出了“子博弈完美纳什均衡”和“颤抖均衡”的概念,海萨尼提出了“贝叶斯纳什均衡”的概念进一步完善了非合作博弈理论(张维迎,1999)。

演化博弈理论(Evolutionary Game Theory)是把博弈理论分析和动态演化过程分析结合起来的一种理论(盛昭瀚和蒋德鹏,2002)。Smith和Price在1973年首次提出演化稳定策略(ESS),随后Smith(1982)提出了比ESS更一般的中立稳定策略(Neutrally Stable Strategy)的概念。Schaffer(1988)提出的有限种群演化稳定策略,Foster和Yong(1990)提出的随机稳定集概念进一步完善了演化博弈理论。事实上,有大量研究将博弈论或演化博弈理论和计算实验相结合,

特别是对人类社会的研究,如对利他和利己行为,资源对人类战争的影响等计算实验方面的论文常见于 *Nature* 和 *Science*。

### (3) 复杂网络理论

网络的研究最早起源于欧拉(Euler)对著名的七桥问题的研究。随后 Erdős 和 Rényi 建立了随机图理论。但复杂网络的兴起源于 1998 年 Watts 及其导师 Strogatz 教授在 *Nature* 上提出的关于小世界的模型以及 1999 年 Barabási 与 Albert 在 *Science* 上提出的无标度网络模型(汪小帆等,2006)。

就目前而言,学术界还没有给出复杂网络精确严格的定义。一般认为真实的网络既不是随机网络也不是规则网络,而是具有与前两者皆不同的统计特征的网络,这样的一些网络被科学家们叫做复杂网络(周涛等,2005)。人们在刻画复杂网络结构的统计特征时常使用以下三个基本概念:平均路径长度(Average Path Length)、聚类系数(Clustering Coefficient)和度分布(Degree Distribution)。大量的实证表明现实世界中的许多网络具有以下三个特征:节点间平均路径长度小、聚集程度高、节点度服从分布从幂率分布(Newman, 2001)。复杂网络常用于计算实验模型的结构分析,其中复杂网络中无标度和小世界特性可作为主体间的交互规则,例如在 *Management Science* 上面就有文章研究不同的组织架构,如随机网络、小世界和无标度的组织结构对组织绩效的影响。

## 2. 数理方法在计算实验中的应用

在计算实验中,数理方法常用于以下领域:规则的设定、数据的处理、优化、结构分析等。规则的设定一般来源于直观印象或数理方法及数理方法研究的结论,其包括三个方面。一是模拟主体的规则设定;二是模拟主体的环境规则设定;三是主体与环境之间的交互规则设定。在模拟社会科学中的现象或问题时,由于主体之间以及主体和环境之间大量的交互从而产生大量的数据需要处理,这需要使用统计学的方法。一些社会问题由于参与的主体过多,导致计算量过于庞大,这就需要对其运算和决策算法进行优化处理。就总体而言,优化包括算法的优化,目标的优化。有一类问题需要对问题直接的联系进行分析,这时候可以借助图论,对其拓扑结构进行分析,当前最常用的两种拓扑结构是复杂网络中的无标度和小世界网络。下面将结合本书应用篇的一些例子重点介绍数理方法在社会科学领域应用。

### (1) 模拟主体的规则设定

模拟主体的规则设定主要有两类:一类是依据数理模型分析的结果;另一类是将数理模型直接或间接作为主体的规则。例如(详细介绍见本书第 6 章第三节)在研究供应链风险问题的时候,假设零售商和制造商采用( $s, S$ )库存策略。这种库存策略常为企业使用,在零售环境下非常有效。当库存水平低于订货点  $s$

时,就开始订货,最大库存  $S$  的水平一般采用经济订货批量模型的订货量  $Q$  再加上订货点  $s$  的值,相应的订货量是最大库存  $S$  与发出订单时的库存量之间的差值。式(3.1)是利用传统库存理论确定的订货点  $s$ 。

$$s = DL + st \quad (3.1)$$

其中  $L$  表示提前期,即从订单的发出到收到货物所需要的时间;  $D$  表示需求的平均值;  $st$  代表着安全库存量。在计算实现时,需求的平均值就是将历史时期发生的需求取算术平均值或加权平均。考虑模型运行时的初始值是采用传统数理方法计算的相关数值,先运行一定周期,从而确定平均需求等相关参数。订货点  $s$  可表示为式(3.2)。

$$s = L * AVG + st \quad (3.2)$$

同样,可以根据经济订货批量模型中的订货量  $Q$ ,给出计算实验中的订货量,如式(3.3)。

$$Q = \sqrt{2K \times AVG / h} \quad (3.3)$$

其中  $K$  表示企业在每次订货时所支付的固定订货成本;  $AVG$  表示平均需求;  $h$  表示固定的库存成本。

这就很好地将数理方法与计算实验相结合,从而最大限度解决了建模过程的随意性,提高了论证的严密性和结论的可信性。

## (2) 应用数理模型作为主体的决策规则

在基于计算实验的非典问题研究中很好地将计算实验和数理模型相结合。传统的传染病传播研究方法是用微分方程或随机过程建立相应的模型,如 Kermack 和 McKendrick 提出的 SIR 模型和 SIS 模型,并在对所建立模型分析的基础上,提出了区分疾病流行与否的“阈值定理”(王拉娣,2005)。Kermack 与 McKendrick 将种群分为三类:易感染人群、已感染人群和免疫人群。如果易感染人群感染后,恢复健康时具有免疫能力称之为 SIR 模型,反之恢复健康时没有免疫能力称之为 SIS 模型。该类方程一般用来研究传染病在不同人群之间的变动情况,并可以模拟传染病的传播。但由于对研究对象的总体进行了分类,忽视了不同群体之间的人际交往以及人际交往中所具有的小世界特征。另外,传染性疾病的流行是由于人群无数次的接触、交互作用和病毒通过其他媒介的传播,但是大多数数理模型(包括 SIR 模型)都没有考虑到传播过程中的空间性、异质性、交互性以及传播过程的局部性,从而限制了这些模型在研究公共卫生政策和传染病预防政策时的有效性。尽管如此,通过简化相关参数和变量,经严密的数学推理可得到相应的数值解和结论。黄崇源博士等人将 SIR 模型的思想引入到

计算实验中,结合了复杂网络理论,运用式(3.4)所示的群体之间的传染机制,模拟了非典的传染与控制过程,并研究了实施不同的公共政策(如戴口罩政策、减少公共接触、限制医院探视、隔离政策等)的不同效果。

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -rS(t)I(t) \\ \frac{dI}{dt} = rS(t)I(t) - \alpha I(t) \\ \frac{dR}{dt} = \alpha I(t) \\ N = S(t) + I(t) + R(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

其中,  $r = \gamma \cdot \beta \cdot \frac{I(t)}{N}$  表示传染率;  $\alpha$  表示康复率;  $N$  是人口规模;  $S$  表示易感染人群;  $I$  表示已感染人群;  $R$  表示免疫人群(包括康复者、免疫者和已死者)。

该模型借鉴了SIR模型的思想,将人群分为易感染人群、已感染人群和免疫人群。其模型上层采用多主体建模技术,下层使用一个二维的元胞自动机,通过镜像(主体活动范围的集合,是主体经常到达的地方的缩影。一个主体拥有的镜像越多,活动范围就越广,主体的影响就越大)巧妙地将复杂网络的小世界特性引入到计算实验中去,解决了元胞自动机通常不能展现现实世界具有小世界特性的问题。一个主体连接的方格越多,这个主体被感染的机会或者把疾病传染给其他主体的机会就越大。例如A主体已经被感染并且具有传染性,B主体是易受感染类型。当两个主体接触时,用传染率(由诸如免疫率这样的因素所决定的主体的属性)和一个随机数字n共同决定了B主体是否被A主体感染。如果n比传染率小,则B主体的状态变为潜伏期,即表示症状尚未显现出来且主体B无法传播此疾病。当A主体的传染状态是I并且它已经超过了传染时期,死亡率和一个随机数字d共同决定了主体是进入死亡还是康复状态。死亡率由年龄因素、主体在潜伏期和感染期是否被置于家庭隔离下、是否在医院隔离和他在生病时期的户外活动等这些因素决定。

这种用数理模型作为建模规则的方法常为计算实验研究者所采用,本书应用篇所给出的例子中有很多是采用这种方法的。

### 3.4.4 学习模型

近年来,社会系统的复杂性对传统的建模方法与工具提出了新的挑战。一方面,社会系统环境表现出非常强的动态性与不确定性(Dynamics and Uncertainty)。另一方面,传统的建模方法与工具越来越难以描述这种动态性和不确定性。社

会系统的研究需要能够动态自适应的建模方法和工具,需要在模型表述不断学习并根据其与系统目标的比较不断调整、优化系统模型。学习与进化模型为有效实现这种适应行为提供了帮助。例如,在多代理系统中,代理需要采取多种策略,不断地学习和进化,以调整自己的智能决策和适应能力,因此,学习和进化能力的提升是多代理系统被广泛应用的关键。

为了解决代理学习与进化能力的提升问题,人们提出了许多学习和进化模型,例如机器学习模型、遗传算法模型、群智能算法模型等,本节将主要介绍人工神经网络和机器学习模型。在下一节(节 3.4.5)中将主要介绍进化模型。

## 1. 人工神经网络

### (1) 人工神经网络模型概述

人工神经网络(ANN, Artificial Neural Networks),简称神经网络,是一种模仿大脑神经系统及其功能的简化数学模型,是一种并行计算的网络。从人体生理功能的角度来看,大脑通过相互作用、相互学习的神经元构成的网络来应对外界环境的刺激和变化,从而实现大脑的整体智能。人工神经网络正是基于大脑的这种学习、智能变换机理,用为数较少的神经元(一般少于 50 个单元),模拟或逼近一般的刺激反应系统的实用性很强的网络(Gilbert and Troitzsch, 2005)。

传统的计算机根据事先确定的程序完成具体的任务,与此不同的是,大部分人工神经网络在事先不确定的系统下,通过训练(Training),可以自适应学习新的联系、函数相关性和模式。神经网络避免使用复杂且明确定义的数学公式、计算机模型和不实际的物理模型。神经网络具有与传统的计算模型不同的一些特点(Nannariello and Frike, 2001; Kalogirou, 2003; Mellit and Kalogirou, 2008):

- A. 自适应学习。在学习和训练的过程中,神经网络通过改变突触的权重,逼近输入输出之间的非线性函数关系,从而实现对问题领域(Problem Domain)中信息与知识的获取。
- B. 大规模并行处理。神经网络具有大规模并行处理数据的能力,可以用来处理传统方法很难处理的形式较多或者变量太多的数据。
- C. “黑盒”方法。神经网络分析可以看成是一个“黑盒”方法,它不需要使用者具有很好的数学知识。
- D. 分布式存储。神经网络能够对信息进行分布式存储,它将获取的信息与知识存储在神经元之间连接强度的分布上,这样比较有利于获取并用于计算。
- E. 有效性和鲁棒性。神经网络对于问题领域中未知数据(未在训练中使用)的识别与归类具有较高的准确性。并且即使在输入信息中含有噪声的情况下,也具有很好的鲁棒性。

人工神经网络模型中基本的模块包括神经元模型和网络结构模型。应用最

广的神经元模型为基于 McCulloch 和 Pitts 的模型, 如图 3.8 (Mellit and Kalogirou, 2008) 所示, 输入为  $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ , 每个输入相应的权重为  $\{w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{ij}, \dots, w_{nj}\}$ , 加权和如式(3.5)所示, 其中  $\theta_j$  为阈值。神经元的输出  $y_j$  与输入的关系是线性的或者是非线性的, 通过激活函数  $y = f(z)$  表示。在 McCulloch-Pitts 模型中, 激活函数为 sgn 函数, 输出如式(3.6)所示, 当净输入超过阈值时, 输出  $y_j = +1$ , 否则, 输出  $y_j = -1$ 。

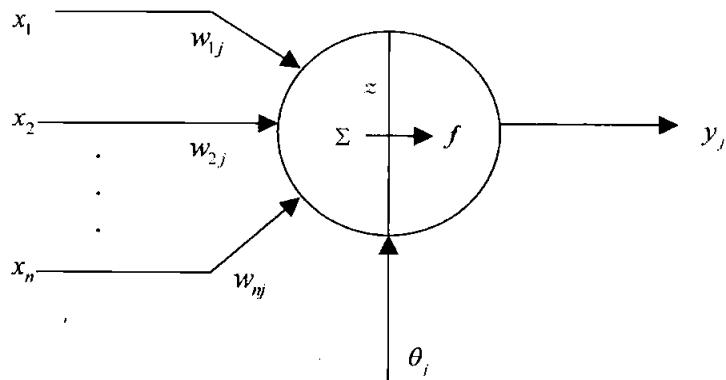


图 3.8 基本神经元模型

在一个神经网络中, 神经元相互联结组成一个网络, 进行分布式计算。神经网络结构图包括若干结点(神经元与外部输入)和神经元之间的带权重的连接。一种最典型的连接形式为前馈网络(Hu and Hwang, 2001; 朱大奇和史慧, 2006), 如图 3.9 所示, 第一层为输入层, 最后一层为输出层, 两层之间为隐藏层。下一层只接受上一层的信号, 各层之间没有反馈, 各连接都是带有权重的连接。输入单元并无计算功能, 只是表示输入的各特征值。每个计算单元可以有多个输入, 但只有一个输出, 输出可以送到多个结点作输入。输入层将信号传递给隐藏层, 隐藏层中每个单元计算其输入的加权和, 加入偏置值或阈值, 再将其通过线性或非线性转换至输出层, 输出层经过类似步骤计算出最后的输出。图 3.9 中, 输入向量  $x$  和输出向量  $y$  分别为  $N$  维和  $M$  维, 而期望输出的向量  $t$  为  $M$  维, 每个训练样例形式为  $(x, t)$ 。对于第  $j$  个隐藏单元来说, 它的输入的加权和如式(3.7)所示, 其中  $w(i, j)$  表示第  $i$  个输入单元与第  $j$  个隐藏单元之间连接的权重。对于前馈网络来说, 典型的激活函数为 S 形函数, 因此第  $j$  个隐藏单元的输出如式(3.8)所示。假设输出单元中为线性转换, 则第  $k$  个输出单元的输出如式(3.9)所示, 其中  $w(j, k)$  表示第  $j$  个隐藏单元与第  $k$  个输出单元之间连接的权重。并且, 定义第  $k$  个输出单元的误差为式(3.10)。

$$z = \sum_{i=1}^N w_{ij} x_i - \theta_j \quad (3.5)$$

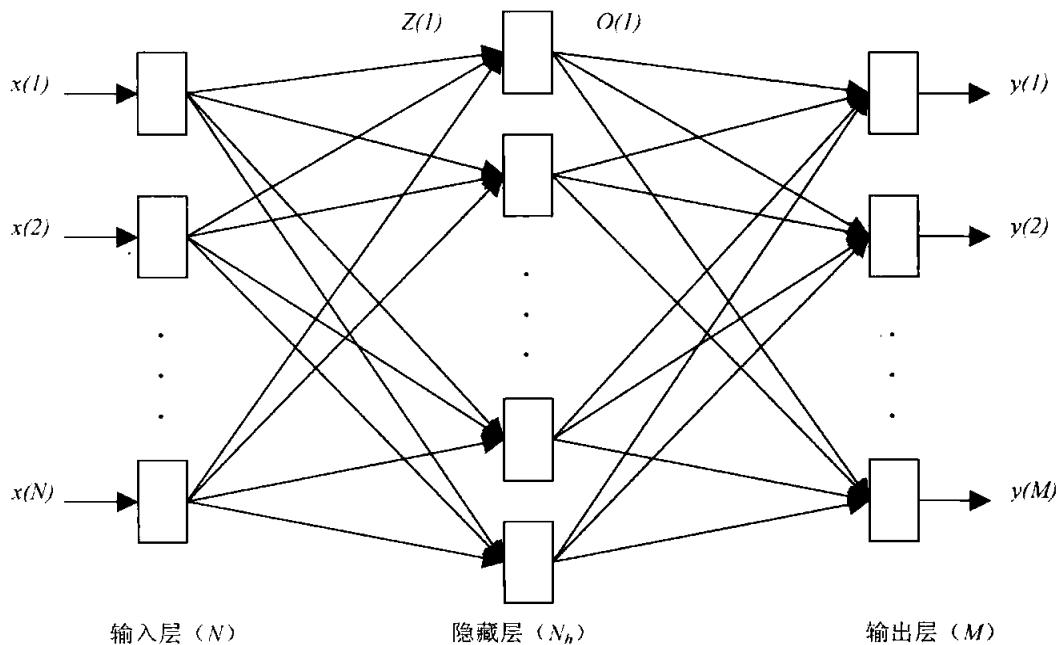


图 3.9 前馈网络结构

$$y_j = \text{sgn} \left( \sum_{i=1}^N w_{ij} x_i - \theta_j \right) \quad (3.6)$$

$$z(j) = \sum_{i=1}^N w(i, j) x(i) \quad 1 \leqslant j \leqslant N_h \quad (3.7)$$

$$O(j) = f_s(z(j) - \theta_j) = \frac{1}{1 + \exp(-(z(j) - \theta_j))} \quad (3.8)$$

$$y_k = \sum_{j=1}^{N_h} w(j, k) O(j) - \theta_k \quad 1 \leqslant k \leqslant M \quad (3.9)$$

$$E(k) = t_k - y_k \text{ 或 } E(k) = (t_k - y_k)^2 \quad (3.10)$$

神经网络可以完成一系列复杂的非线性映射,是因为它可以根据输入信息的特征来学习,在学习或训练的过程中改变连接的权重值,因此具有自适应能力。反向传播(BP, Back Propagation)前馈网络是一种典型的神经学习网络,它可以根据输出值与期望值之间的差距(误差)来调整网络中连接的权重。

一般的反向传播算法(Mitchell, 1997; Gupta et al., 2003)如下所示:

//START:

假设一组有限的训练样例。

第1步:设定神经网络的层数、每个隐藏层中神经元的数量和容错参数 $\epsilon$ 。

第 2 步:随机选择各权重的数目。

第 3 步:初始化各参数。

对于训练样例中每一个( $x, t$ ):

第 4 步:根据式(3.7)和(3.8)计算神经网络中每个单元的输出。

第 5 步:对于输出层的每个单元计算它的误差项  $E_k$ 。

$$E_k \leftarrow O_k(1 - O_k)(t_k - O_k)$$

第 6 步:对于隐藏层的每个单元计算它的误差项  $E_h$ 。

$$E_h \leftarrow O_h(1 - O_h) \sum_{k \in outputs} w_{hk} E_k$$

第 7 步:更新每个网络权重值

$w_{ji} = w_{ji} + \Delta w_{ji}$ , 其中  $\Delta w_{ji} = \eta E_j x_{ji}$ ,  $\eta$  为学习效率。

第 8 步:计算总误差  $E$ 。

第 9 步:如果  $E \leq \epsilon$ , 则到第 10 步, 否则返回第 4 步。

第 10 步:学习结束, 输出各权重值。

//END;

## (2) 人工神经网络模型的应用

神经网络在社会学与社会网络中的应用。Li 和 Chen(2008)提出了在 web 社会网络中的一种网络博客推荐机制, 文中使用 BP 神经网络来预测各个网络博客的最终推荐指数。Quek 和 Moskowitz(2007)使用神经网络对人的个性进行了研究, 通过记录多个参与者在多种情况下多种事件中互动的数据来训练和测试神经网络。Tang 等人(2006)研究了组织结构对于组织内知识传递的影响, 文中使用单层感知器(只包含输入层与输出层, 无隐藏层)神经网络来模拟知识从一个优秀成员至其他成员之间的传递过程。Lane 和 Scott(2007)提出了研究组织认同的神经网络模型, 模型描述了在组织成员的知识结构中, 组织认同是一种通过子网络来连接成员与组织的有效渠道。

神经网络在供应链管理中的应用。Efendigil 等人(2008)研究了在多级供应链中不确定需求下的需求预测问题。Chang 等人(2008)从供应链管理(SCM)的角度研究了企业资源计划(ERP)的作用。文中提出了一种概念模型, 使用反向传播神经网络作为评估工具, 从供应链管理的角度评估了 ERP 的作用和优点, 此模型也可以协助企业来评估潜在的合作者。Choy 等人(2003)研究了供应链中供应商关系管理(SRM)问题。文中提出了一个结合基于案件推理(CBR)和神经网络的智能供应商关系管理系统, 这个系统

可用来选择潜在的供应商。Yoo 等人(2008)等人研究了在非稳定顾客需求下顾客服务水平的管理。文中提出了一种神经网络控制器,通过顾客服务水平的变化侦测顾客需求的变化,并且通过调整网络权重来保持目标顾客的服务水平。

在本书第 20 章中介绍了语言演化的计算实验,其中每一个人工代理的行为受一个前向神经网络的控制。例中根据研究问题建立了两个具体的计算实验,分别采用了一个三层的神经网络和一个四层的神经网络。在第一个实验的三层神经网络中,包括 3 个输入单元集、5 个隐藏单元、2 个输出单元集和它们之间带权重的连接。3 个输入单元集表示代理接收的关于食物和语言的信息,2 个输出单元集表示代理的行为和语言输出。在第二个实验的四层神经网络中,包括 1 个输入层(25 个视网膜结点、4 个感受结点和 4 个语言结点),2 个隐藏层,一个输出层(4 个运动结点,行为输出)和它们之间带权重的连接。在两个实验中,每个代理的神经网络的权重编码后作为遗传算法的基因输入,遗传算法将在节 3.4.5 中描述。

## 2. 机器学习

### (1) 机器学习模型概述

机器学习(Machine Learning)是计算机程序自动地通过经验来提高处理某任务性能的学习模型(Mitchell, 1997),是一个多学科交叉的领域,包括人工智能、计算机复杂理论、神经生物学、控制论和信息论等等。计算机程序在完成一个学习任务时,一般需要使用三种特征来定义一个学习问题:具体的任务种类、衡量任务完成的质量标准和学习经验的来源。例如, Samuel(1959)设计的学习下西洋跳棋的计算机程序,任务为下西洋跳棋,任务完成质量标准为比赛中的胜率,学习和训练经验为和自己进行对弈的过程。因此,在机器学习算法的设计过程中,需要考虑训练样例的类型和形式、学习的目标函数定义、表达形式和计算方法,从样例中学习目标函数的算法。

机器学习问题经常归结于搜索问题,即对一个假设空间进行搜索,以找到一个最佳契合观察的数据和学习已有知识的假设。不同的假设表示法适合不同的学习搜索方法,在不同的假设表示中,不同的学习算法利用不同的内在结构优势对假设空间进行搜索(Mitchell, 1997)。

这里将主要介绍机器学习中的基于案例的推理和强化学习两种模型。

基于案例的推理(CBR, Case-Based Reasoning)是通过检索历史类似问题中类似的解决方法来解决问题(Fdez-Riverola and Corchado, 2004)。基于案例的推理包括 4 个步骤(Aamodt and Plaza, 1994; Chen et al., 2008)如图 3.10 所示,当新问题形成的新案例出现时:

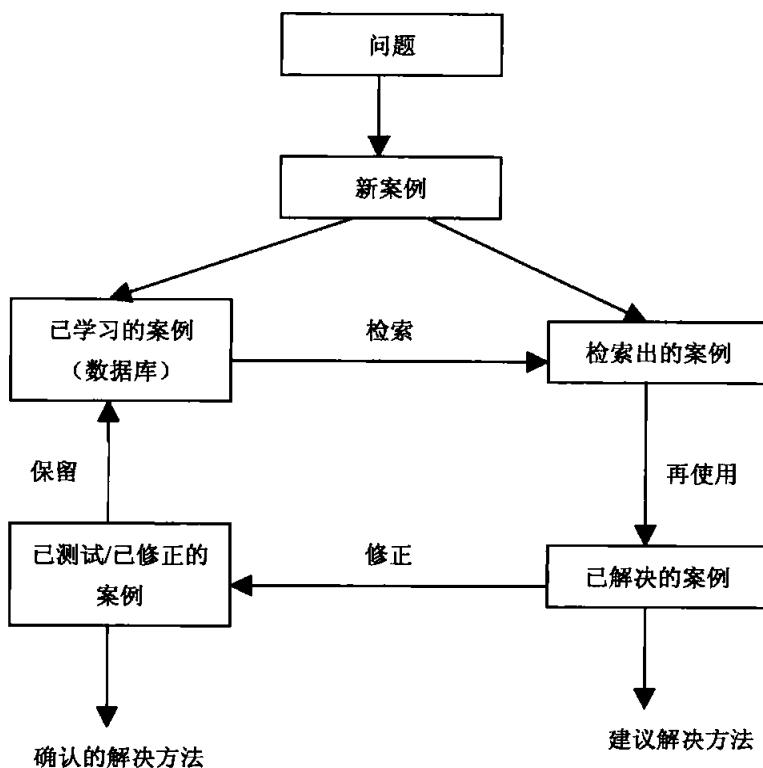


图 3.10 CBR 的四步骤过程

//START:

第 1 步: 从数据库中检索相似的过去的案例。主要的检索方法为邻近算法 (Nearest-Neighbor), 归纳和知识引导 (Inductive and Knowledge-guided)。邻近检索方法可以找出一些和新案例特征相似最多的案例, 然后根据重要性对这些相似的案例赋予权重。但是这种方法忽略了任何特征的重要性是受其他特征影响的, 也就是说是和案例本身相关的。检索的时间与数据库的大小成线性关系, 因此这种方法很耗时。归纳方法可以决定最能区别案例的特征。根据这些特征将案例放在决策树中, 因此减少了检索时间。但是, 这种方法要求有一个适当大小和质量的数据库。知识引导检索应用现有的知识独立地识别每个案例中重要的特征。这种方法不适用于数据库, 因为它所需要的数据库太庞大了 (Barletta, 1991; Watson and Marir, 1994; Salem, 2000)。

第 2 步: 从检索出的案例中产生对新案例的解决方法。以往案例中的解决方法需要经过调整才能应用于新案例, 这种调整可以是结构方法或推导方法 (Watson and Marir, 1994)。结构调整方法通过修改以往案例中的解决方法来解决新案例。推导方法通过应用基于以往案例的算法、方法或规则解决新问题。

第 3 步: (可能)评估和修正得到的解决方法。

第 4 步: 确认/修正后的解决方法存入数据库。通过不断更新数据库, CBR

系统的推理能力和准确性得到不断提高。

//END;

强化学习(RL, Reinforcement Learning)是一种学习和优化代理在环境中的行为和预测代理行为结果的机器智能算法,在此环境中,代理行为使环境从一种状态到另一种状态,并由此可能产生奖励或惩罚(Sutton and Barto, 1998)。强化学习需要解决的问题是:一个能够感知环境的自适应代理,如何通过学习选择能达到其目标的最优动作。强化学习的一般问题框架如图3.11(Mitchell, 1997)所示。在这种框架中,包含三个要素:环境的状态空间(a state space),行动序列(a set of actions)和行动所得回报(rewards)。行动可以使决策者从一种状态移动到另一种状态(导致状态的变化),行动产生的结果可以是正的或者负的效用(回报)。一般情况下,决策者一开始并不知道环境中的规则(状态如何变化,行动会产生什么后果),所以他必须从经验中学习(Dayana and Niv, 2008)。目标的设置方法可以有多种,例如平均收益率(奖励减去惩罚),或者如图3.11中的期望收益,较远未来的收益相对于较近的收益减少了( $0 \leq \gamma \leq 1$ )。下面简单介绍一种增强学习算法:Q学习(Mitchell, 1997)。算法步骤如图3.11:

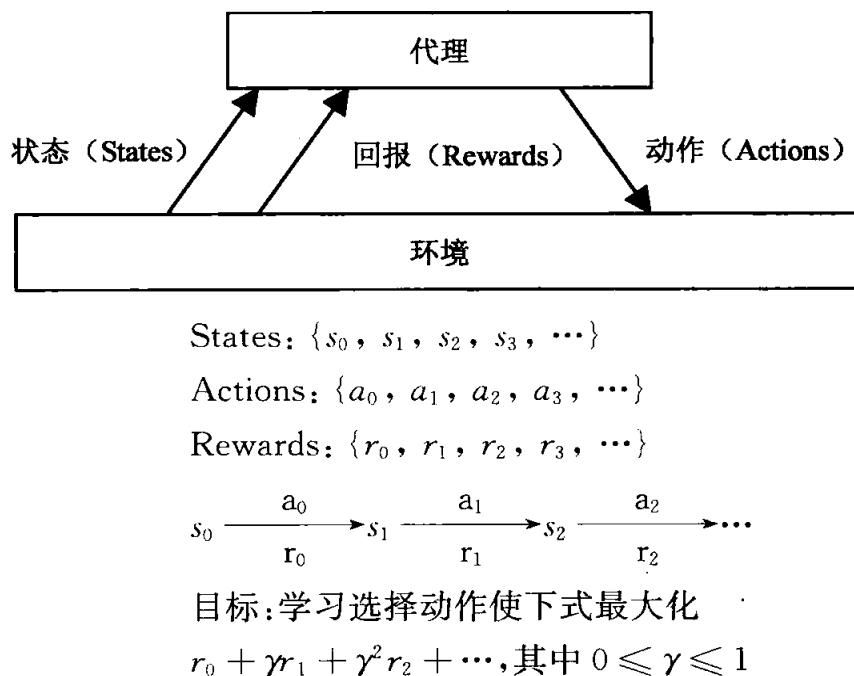


图3.11 一般增强学习框架

//START:

第1步:For each  $s \& a$ , Initialize  $Q(s, a) \leftarrow 0$ ;

//初始化每个状态和行为的Q函数,Q函数的值是从状态s开始,使用第一

一个动作  $a$  的最大折算累积回报, 计算方法在下面步骤中给出。

第 2 步: 观察当前状态  $s$ , 重复以下步骤:

第 2.1 步: 选择执行一个动作  $a_t$ , 接收到立即回报  $r_t$ .

第 2.2 步: 观察新状态  $s_{t+1}$ .

第 2.3 步: 按下式更新 Q 函数:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow r(s_t, a_t) + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1})$$

第 2.4 步: 更新状态  $s_t \leftarrow s_{t+1}$

//END;

## (2) 机器学习模型的应用

机器学习在社会学中的应用。Kianmehr 和 Alhajj(2008)应用机器学习研究了如何通过呼叫细节记录(CDR, Call Detail Record)中的信息识别呼叫团体。Devillers 等人(2005)研究了听众如何察觉说话者情绪的表达和如何描述、自动侦测一个对象在说话时的情绪状态。几种机器学习方法(支持向量机 SVM、决策树)用来从现实生活人与人之间的对话中识别相关的情绪状态。Ye 等人(2008)研究了网络中旅游评论信息的情感分类。文中使用三种监督的机器学习方法(朴素贝叶斯学习、支持向量机和基于字的 N-gram 模型)对这些信息进行了情感分类。

机器学习在供应链管理中的应用。Carboneau 等人(2008)应用了三种机器学习的方法(神经网络 NN、递归神经网络 RNN 和支持向量机 SVM)对供应链最终顾客的失真需求(牛鞭效应)进行预测。Hong 和 Ha(2008)提出了一种动态合作者评估系统来评估供应伙伴不同时期的供应能力。这个系统使用了多准则决策模型和机器学习来评估合作伙伴的供应能力。Piramuthu(2005)研究了供应链的自适应和动态结构。文中使用机器学习算法提出了一个动态结构的供应链框架。Chi 等人(2007)在供应商管理补货(VMR, Vendor Managed Replenishment)系统中应用了遗传算法和机器学习方法。

在本书第 4 章中建立了供应链中动态库存的计算实验, 其中使用了基于案例推理的强化学习算法。此例中 CBR 的案例结构为库存策略状态和需求状态、未采取行动前的客户服务水平、采取的库存策略调整行为、采取行动后的客户服务水平。当在历史案例库中搜索相似案例时, 即搜索相似的库存策略状态和需求状态, 通过检查行为产生的回报而修正案例。如何检查和修正案例由强化学习算法来决定。此例中的强化学习应用历史相似案例中的库存策略调整行为和所得到的回报(采取行动后的客户服务水平)来修正案例。如果没有相似的历史案例, 则凭经验尝试一个行动, 观察所得回报, 并将此新案例加入案例库。如果

历史相似案例中显示行动所得的回报符合目标要求，则直接采取此行动，并观察此行动在新案例中所得回报，如果历史行动在新案例中不能取得符合目标的结果，则加以修正；如果历史相似案例中显示行动所得回报不符合目标要求，则尝试修改行动，再观察修改后的行动在新案例中所得的回报，修正案例。如此反复学习，经过一定运行周期后，达到稳态。

### 3.4.5 进化模型

进化模型一般包含遗传算法模型和群智能算法模型。本节中将具体介绍遗传算法模型，对于群智能算法模型只做简单介绍。

群智能算法(SI, Swarm Intelligence)是从群居动物群体(例如蚁群、蜂群或鱼群)中得到启发的一种基于代理(Agent)的模拟进化建模方法(Denby and Le Hégarat-Mascleb, 2003)。群体行为是群居昆虫(Social Insects)的一种主要特点，群居昆虫(例如蚂蚁、白蚁、黄蜂、蜜蜂)可以成功地建造巢穴或更复杂的居住场所。群居昆虫群体具有很高的柔性，并能很好地适应变化的环境(Teodorović, 2008)。这种柔性使群居昆虫群体有很好的鲁棒性，即使在受到很大干扰的情况下也能有组织地生存下来(Bonabeau et al., 1999)。群居昆虫群体中的个体昆虫之间的通信已经被很好地识别出来，例如，蜜蜂在获取食物过程中的舞蹈，蚂蚁分泌信息素等。这些个体之间的通信系统有助于群居昆虫群体的集体智慧(Collective Intelligence)的形成。因此，群智能正是这种集体智慧的体现，尽管个体是简单的，但是作为一个群体却能表现出较高的智能。群居昆虫群体告诉我们非常简单的生物体可以通过动态的相互作用，形成能够执行高度复杂任务的系统(Teodorović, 2008)。

#### 1. 遗传算法模型描述

遗传算法(GA, Genetic Algorithm)是一种模仿生物自然选择过程的搜索进化算法(Buckeles and Petry, 1992)。遗传算法适用于寻找复杂系统的最优解决方案(Gilbert and Troitzsch, 2005)。其特点(周明和孙树栋, 1999)如下：

(1) 遗传算法将问题的可能解的编码作为搜索空间。遗传算法将问题的可能解进行编码，一般编为一个二进制码串，称为染色体。然后，通过模拟自然选择和进化过程中对染色体进行遗传操作以得到问题的最优解。

(2) 遗传算法直接以适应度(Fitness)为搜索信息。遗传算法通过直接计算和衡量适应度来确定搜索方向，不需要对目标函数进行求导，避免了传统方法中的障碍。通过衡量适应度的大小将搜索范围逐渐缩小，也提高了搜索的效率。

(3) 遗传算法同时使用多点的搜索信息。遗传算法初始为包含多个个体的

一个种群，因此遗传算法从多点同时进行搜索，对整个群体进行遗传算子的计算，因此提高了搜索效率。这种搜索体现了遗传算法的隐含并行特征。

(4) 遗传算法使用概率搜索策略，而非固定规则。遗传算法中采取了概率搜索策略，按照适应度的高低分配繁殖后代的概率。因此，遗传算法避免了只选择种群中最好的个体而使整个种群向这个个体收敛。

遗传算法适用于寻找复杂问题的最优解。例如在文献(Gilbert and Troitzsch, 2005)中，一个批发商需要计划一个运货车的送货路线，这个送货车将给若干个商店送货。货车送货的顺序并不重要，重要的是路线总距离需要最短。这就是著名的“旅行商问题”(TSP, Travelling Salesman Problem)的一个例子。

在遗传算法中，问题的可能解被编码为一个位串，一般为二进制位串(例如，100110110101)，即染色体。种群的染色体通过一系列遗传算子变换(进化)后，适应度高的染色体存活下来并产生下一代。遗传算法中包括3个遗传算子：选择(Select)、交叉(Crossover)和变异(Mutation)。这些遗传算子用来修改种群染色体，并使更适应的染色体遗传到下一代中，种群生命周期与遗传算子如图3.12(Mellit and Kalogirou, 2008)所示。如图所示，选择是指选择一对适应度较高的基因作为“父母”基因产生后代。交叉是指在两个基因之间交换部分基因，产生的后代各继承了一部分父母的基因。变异是指基因中随机位置的基因突变，用来防止早熟收敛(Premature Convergence)。

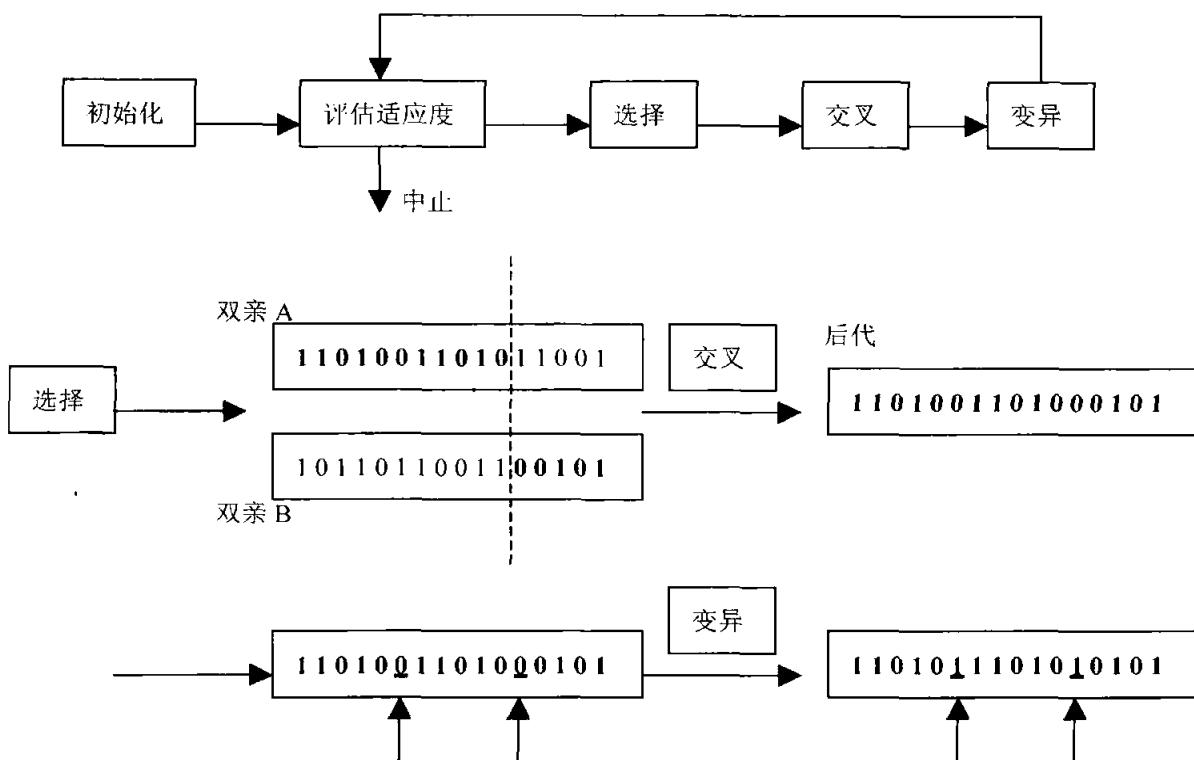


图 3.12 种群生命周期和遗传算子

基本遗传算法的描述(Gilbert and Troitzsch, 2005; Mellit and Kalogirou, 2008)如下所示:

//START:

第1步:定义一个目标函数  $f(x)$ ,用来表示每个可能解的适应度。

第2步:选择一种合适的表达法或编码,并选择遗传算子。

第3步:随机定义一个种群,含有  $P$  个个体,每个个体的染色体为  $c_i (i = 1, 2, \dots, P)$ 。

第4步:计算每个个体染色体的适应度  $f(c_i)$ 。

第5步:根据适应度,赋予每个染色体一个繁殖概率  $P_i (i = 1, 2, \dots, P)$ 。适应度较高的个体被选择繁殖的概率也较高。

第6步:根据繁殖概率  $P_i$  选择  $N$  个个体配对进行繁殖来产生下一代,每一对配对个体产生两个新的后代。产生后代的过程通过遗传算子和它们相应的概率完成,例如,交叉(交叉概率),变异(变异概率)。图 3.12 中的交叉为单点交叉,也可以设计为双点交叉。双点交叉中把染色体看成一个循环链,在循环链中随机定义两个交叉点,再进行交叉。

第7步:复制没有变化的( $P - N$ )个个体到新的种群中,这样种群中的个体总数保持不变。

第8步:旧的种群消亡。

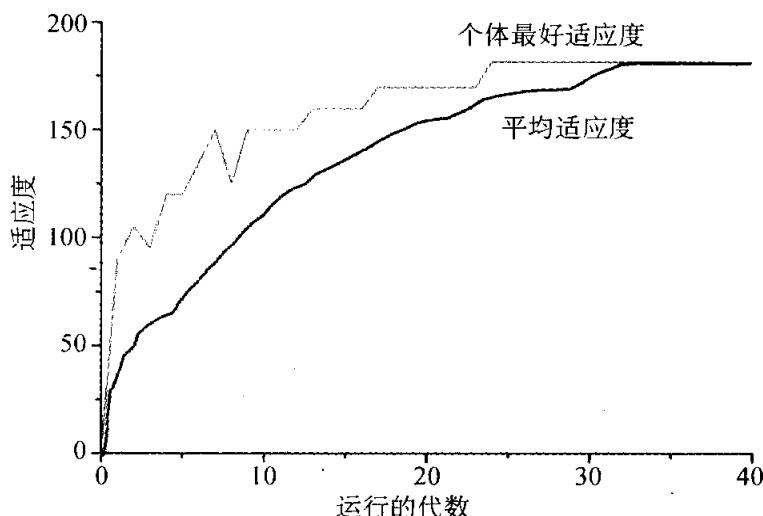


图 3.13 一般遗传算法的适应度变化

第9步:如果达到了中止条件,则退出。否则,返回第4步。例如,种群的平均适应度进化到了一个最优值,例如图 3.13(Gilbert and Troitzsch, 2005)所示。种群的平均适应度是期望增加的,因为适应度较低的个体不能繁殖后代而被淘汰(死亡)。

//END;

## 2. 遗传算法模型的应用

遗传算法在社会学中的应用。Firat 等人(2007)研究了将遗传算法结合基于随机游走(Random Walk)的距离测量方法来寻找社会网络中的子群。文中将遗传算法作为一种启发式的搜索技术应用于群集的社会网络。Ng 等人(2008)使用并比较了四种模型用来预测香港私有住房的需求:线性回归分析(LRA, Linear Regression Analysis)模型、遗传算法(GA)模型、GA-LRA 模型、GA-LRA 模型结合自适应变异率(AMR, Adaptive Mutation Rate)。

遗传算法在供应链管理中的应用。Yao 和 W. M. (2008)研究了最小化仓库最大空间需求(MWSR, Maximum Warehouse Space Requirement)的问题。文中放宽了以往的假设条件,允许仓库在任何时候补货,并提出了一种用于任何补货计划安排计算的 MWSR 方法。然后,使用遗传算法来搜索最优的补货计划安排。Hong 和 Kim(2009)研究了联合补货(Joint Replenishment)的问题。文中设计了一种准确库存成本的无偏估计方法,并且提出了基于此新的成本估计方法的遗传算法。Altiparmak 等人(2007)研究了供应链网络的设计问题。文中使用了一种稳态遗传算法(ssGA, steady-state GA)设计了一个单源、多产品和多级的供应链网络。Borisovsky(2007)应用了两种变异遗传算法解决有下限需求的供应管理问题(SMPLD, Supply Management Problem with Lower-bounded Demands)。

在本书第 20 章介绍的语言演化计算实验结合了人工神经网络和遗传算法,人工神经网络的作用已在 3.4.4 节中叙述。神经网络中连接的权重被编码为遗传算法中的基因(染色体),然后通过遗传算法中的选择、交叉和变异算子进行进化计算。具体的进化过程和结果可参考本书应用篇中的相关章节。

### 3.4.6 不确定性推理

人类推理的最大特点之一是能够通过不确定、不完整的信息得出有效的结论。社会科学的计算实验方法能够较好地研究各种社会问题,这需要在实验中构建的虚拟主体能够具有一定的推理能力,而由于社会信息的不确定性,在很多情况下需要使用不精确的信息进行决策。而由于信息的不确定性,可能会导致主体在实验过程中作出明显的非最优甚至是差的决策,这显然与现实生活中人们的推理能力相违背。这种要求实验主体具备使用不确定信息进行较合理推理的能力对计算实验方法的构建提出一定的要求。本节主要讨论在计算实验的方法框架下如何对不确定信息进行合理表达,同时对其进行相关的推理。

本节所说的不确定信息指的是信息不准确或是不完整以至于使用经典推理

方法无法得出合理的结论或是决策方案。在计算实验模型中产生不确定信息的原因很多,最常见的包括已知条件的误差和不精确、结论的误差和似然性;另外一大类不确定性来自于实验规则本身的误差,比如建模人员构建的规则的可靠程度、不同实验规则之间的矛盾、规则的包含和冗余、规则的遗漏等。这些问题都对计算实验模型解决社会问题的有效性提出了挑战。为了有效处理不确定信息,前人已经提出了多种处理不确定信息的相关理论,包括经典概率论、主观贝叶斯方法、证据理论、确定性理论和模糊推理等方法。对于一个合格的计算实验设计人员来说需要根据不同的实验状况,合理的使用不同方法对实验中的不确定性信息进行处理。

### 1. 主观贝叶斯方法

如果实验模型中规则的初始条件不足,无法得出相关信息的后验概率,可以通过主观贝叶斯方法来处理这种情况。Duda 等(1976)提出了主观贝叶斯方法,并将其成功地应用于一个地矿勘探专家系统当中。主观贝叶斯方法中,知识采用形如“如果  $E$  则  $H$ ”的规则表达,通过使用证据  $E$  的概率、该规则的充分性和必要性等条件将结论  $H$  的先验概率转化为后验概率。在该规则当中  $H$  的先验概率为:

$$O(H) = P(H)/P(\bar{H}) = P(H)/(1 - P(H)) \quad (3.11)$$

另外,条件  $E$  对结论  $H$  支持程度可以使用充分性概率表示为:

$$\lambda = P(E | H)/P(E | \bar{H}) \quad (3.12)$$

当证据一定存在的时候  $P(E) = 1$ ,那么,根据上面公式在条件  $E$  的前提下结论  $H$  的概率为:

$$O(H | E) = P(H | E)/P(\bar{H} | E) = \lambda O(H) \quad (3.13)$$

通过概率函数的定义可以得知结论  $H$  的后验概率为:

$$P(H | E) = O(H | E)/(1 + O(H | E)) = \lambda P(H)/(1 + (\lambda - 1)P(H)) \quad (3.14)$$

此时当  $\lambda$  大于 1 的时候  $E$  将增加  $H$  为真的概率,当  $\lambda$  等于 1 的时候  $E$  与  $H$  不相关,当  $\lambda$  小于 1 的时候条件  $E$  将导致结论  $H$  为真的可能性下降,当  $\lambda$  等于 0 的时候  $E$  将直接导致  $H$  为假(Duda, 1976)。

在 Duda 的论文中还详细分析了当证据不存在的时候和证据不确定的情况下对结论的影响,在计算实验模型的构建中,通过该方法可以较好地处理证据不足时的不确定性推理。关于主观贝叶斯方法的详细信息可以参考 1976 年 Duda

的论文。

## 2. D-S 证据理论

Dempster(1967)将不确定性信息描述为一组概率数据用来替代传统的一个概率数据,同年 Shafer 对该理论做了进一步的改进, Garvey(1981)在前人工作基础上提出了处理不确定信息的证据推理方法。因为该推理方法以 Dempster 和 Shafer 的工作为主要理论基础,所以被称之为 D-S 证据理论。证据理论使用可信函数解决经典概率论方法需要提供先验概率的问题(在很多情况下先验概率很难给出)。而通过可信函数给出证据可能的上下边界能够较好地解决先验概率不精确的问题,这对计算实验模型处理初始状况不确定的问题具有一定意义。

D-S 证据理论使用希腊字母  $\Theta$  表示样本空间,也称之为环境;使用基本概率分配函数  $m$  来表示样本中各个证据的可信度,通过该函数给每个样本对应一个可信度,其中  $m(\emptyset) = 0$  且  $m(\Theta) = 1$ 。对于证据样本空间的下限可以使用信任函数  $Bel$  来描述(下限函数),该函数描述了对证据可信的支持程度。 $Bel$  函数是样本集合及其所有子集的信任度之和,通过使用分配函数可定义样本集合  $A$  的信任函数如下:

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (3.15)$$

其中  $A \subseteq \Theta$ 。对于证据样本空间的上限可以使用合理度函数(上限函数)  $Pl$  描述,该函数表达了样本可能的最大信任度。上限函数可以通过下限函数来计算:

$$Pl(A) = 1 - Bel(\Theta - A) \quad (3.16)$$

其中  $A \subseteq \Theta$ 。这样对某个证据  $A$  的信任空间可以表示为  $[Bel(A), Pl(A)]$ 。关于证据理论的详细信息可以参考 1981 年 Garvey 的论文或是 Giarratano 于 2002 年出版的书籍。

在计算实验的建模过程中,如果从不同的地方得到了不同的概率分配函数  $m_1$  和  $m_2$ ,那么就需要使用概率分配函数的正交和( $m_1 \oplus m_2$ )来组合这些函数以方便后继的推理过程,当然不同的概率分配函数将得到不同的不确定性推理过程。通过该方法可以定义计算实验模型中无法精确衡量的条件的可信区间,增加实验主体决策的科学性。使用 D-S 证据理论表达计算实验中的不确定问题时最大的问题是证据组合时如果某个样本在其他组合中不存在,则会导致比较意外的结果,就是说目前 D-S 证据理论无法处理不存在的对象的信任问题。

## 3. 确定性理论

在计算实验建模过程中,可能发现某些规则的条件、结论和推导过程都有一

定的不确定性,对此使用确定性理论方法可以较好地解决。Shortliffe(1975)提出基于确定性因子的不确定性信息处理方法,同时成功应用于名为 MYCIN 的医疗专家系统当中。确定性理论对规则当中的每个信息都计算其确定性因子 CF(Certainty Factors),使得使用每个信息的时候都要参考其 CF 的取值。同贝叶斯方法不同的是确定性理论除了考虑信息的可信度以外还要考虑信息的不可信度,这主要是因为现实生活中不信任并不是信任的简单相反数。确定性理论认为 CF 是信息的信任与不信任二者的差值,使用概率来表示对信息的信任可以使用下式:

$$MB(H, E) = \begin{cases} 1 & P(H) = 1 \\ (\max\{P(H | E), P(H)\} - P(H))/(1 - P(H)) & P(H) \neq 1 \end{cases} \quad (3.17)$$

其中  $E$  表示规则的条件,  $H$  表示规则的结论。对于不信任可以使用与上式对应的方式描述:

$$MD(H, E) = \begin{cases} 1 & P(H) = 0 \\ (\min\{P(H | E), P(H)\} - P(H))/(1 - P(H)) & P(H) \neq 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

在此基础上,可以将确定性因子定义为:  $CF = MB - MD$ 。根据相关定义可以对规则的确定性因子计算为:

$$CF(H, E) = \begin{cases} 0 & P(H/E) = P(H) \\ (P(H/E) - P(H))/(1 - P(H)) & P(H/E) > P(H) \\ (P(H) - P(H/E))/P(H) & P(H/E) < P(H) \end{cases} \quad (3.19)$$

其中  $CF(H, E)$  的取值范围为  $[-1, 1]$ ,  $CF(H, E)$  的值越大说明条件越是支持结论的正确性, $CF(H, E)$  的取值小于 0 时,该值越小说明条件越是支持结论为假。

在计算实验中,对条件和结论等信息可以使用  $CF(E)$  和  $CF(H)$  表示,这些信息的确定性因子的取值区间同样为  $[-1, 1]$ 。 $CF(E) = 1$  表示实验主体认为该条件一定为真, $CF(E) = -1$  表示实验主体认为该条件一定为假, $CF(E) = 0$  表示实验主体对该条件的真假无法判断。如果实验主体认为该条件具有一定的真实性,那么  $0 < CF(E) < 1$  表示其真实程度;如果实验主体认为该条件具有一定的真实假性,那么  $-1 < CF(E) < 0$  表示其虚假程度。

假设在实验过程中需要对多个条件( $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ )进行组合使用,各

个条件对应的确定性因子分别为  $(CF(E_1), CF(E_2), CF(E_3), \dots, CF(E_n))$ , 此时如果组合条件是各个条件的合取 ( $E = E_1 \wedge E_2 \wedge E_3 \dots \wedge E_n$ ) 时其组合条件的可信度如下:

$$CF(E) = \min\{CF(E_1), CF(E_2), CF(E_3), \dots, CF(E_n)\} \quad (3.20)$$

如果组合条件是各个条件的析取 ( $E = E_1 \vee E_2 \vee E_3 \dots \vee E_n$ ) 时其可信度如下:

$$CF(E) = \max\{CF(E_1), CF(E_2), CF(E_3), \dots, CF(E_n)\} \quad (3.21)$$

在计算实验建模过程中, 如果知道条件和规则本身的确定性因子, 那么可以通过不确定性的传递来计算结论的确定性因子, 其关系如下:

$$CF(H) = CF(H, E) \times \max\{CF(E), 0\} \quad (3.22)$$

由上式可以看出, 如果实验主体规则的条件为某种程度的虚假时, 那么,  $CF(E) < 0$ , 由此引起结论的可信度为 0, 即无法判断其真假; 当然, 如果条件确定为真 ( $CF(E) = 1$ ), 那么, 结论的可信度就是推理过程本身的可信度。

在实验的建模过程中, 如果实验主体通过不同的初始条件和规则得出了相同的结论, 那么结论的可信度就需要考虑各个初始条件和规则对其自身可信度的传导性了。假设两条不同的规则分别为: 如果  $E_1$  则  $H$ ; 如果  $E_2$  则  $H$ 。如果已知条件  $E_1$  和  $E_2$  的确定性因子分别为  $CF_1(E_1)$  和  $CF_2(E_2)$ , 两条规则的可信度因子为  $CF_1(H, E_1)$  和  $CF_2(H, E_2)$ , 那么通过上面的不确定性传导公式可以计算两条规则中结论各自的可信度为:

$$\begin{aligned} CF_1(H) &= CF_1(H, E_1) \times \max\{CF_1(E_1), 0\} \\ CF_2(H) &= CF_2(H, E_2) \times \max\{CF_2(E_2), 0\} \end{aligned}$$

结论  $H$  的组合可信度函数  $CF_{comb}(CF_1(H), CF_2(H))$  可以使用下式来计算:

$$\begin{aligned} &CF_{comb}(CF_1(H), CF_2(H)) \\ &= \begin{cases} CF_1(H) + CF_2(H) \times (1 - CF_1(H)) & \text{若 } CF_1(H) > 0 \text{ 且 } CF_2(H) > 0 \\ \frac{CF_1(H) + CF_2(H)}{1 - \min\{|CF_1(H)|, |CF_2(H)|\}} & \text{若 } CF_1(H) < 0 \text{ 或 } CF_2(H) < 0 \\ CF_1(H) + CF_2(H) \times (1 + CF_1(H)) & \text{若 } CF_1(H) < 0 \text{ 或 } CF_2(H) < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.23)$$

相对于其他方法, 确定性理论研究了对某个信息的信任和不信任的测度, 通过不确定性传递函数能够简单实现不确定性信息在模型中的传播, 提高了实验

主体决策的科学性,使得实验主体能够更加拟人化。关于不确定性理论的详细信息可以参考 Giarratano(2002)的 5.3 节,关于确定性理论在计算实验当中的应用案例可以参考本书的第 5 章内容。

#### 4. 模糊推理

前文介绍的几种处理不确定性信息的方法都是以概率论为基础的,另外一种比较有效的方法是模糊推理方法。模糊推理是一种基于模糊逻辑的推理方式,最早的相关理论出现在 Zadeh 发表于 1965 年的论文当中(Zadeh, 1965),随着该理论的发展,模糊逻辑被逐渐应用于多个学科和领域当中,通过该方法的应用可以提高计算实验模型的可信度。如果建模人员在计算实验的建模过程中需要处理一些类似自然语言的信息,比如:如果成本比较高那么就不生产该产品,如果价格比较低就增加采购量,如果质量很好就可以接受较高的价格等。在处理这些信息的过程中对于“比较高”、“比较低”和“很好”等内容的处理方式将会影响到结论的正确性。通过使用模糊推理能够在一定程度上增加实验主体决策的科学性。关于模糊集合的描述和模糊逻辑的运算等详细内容可以参考 Giarratano(2002)的 5.5 节内容。

### 3.5 社会科学计算实验之评述

本章前文介绍了社会科学计算实验的概念、技术路线、研究范式、常用方法和工具,较为完整地反映了计算实验方法的基本全貌。但是,应该看到,计算实验是传统的社会科学研究方法的发展,又是多学科技术和方法的集成。因此,它既有自身的特点,又与其他技术和方法有着密切的关系,这在客观上使我们在理解计算实验概念以及认识其特点时,容易产生这样或那样不够准确的地方。为此,本节将进一步对计算实验概念和特点进行评述,特别是将计算实验方法与实验管理方法、计算机仿真方法等概念进行比对,希望通过这样的比较分析能够帮助读者更加全面和准确地理解计算实验基本概念。

#### 3.5.1 实验管理方法与计算实验方法

首先要比对的是实验管理方法与计算实验方法。从字面上看,实验管理方法是通过实验的手段研究管理问题,而计算实验方法也是用实验方法研究包括管理问题在内的社会科学问题。但实际上,两者之间有着诸多区别。

所谓实验管理方法,是通过构建一个尽可能接近现实的实验环境,并有真正的参与者(人)在这一环境中根据其自身的角色表现其行为和决策,人们根据观

测、分析这些参与者的行为和决策,包括人与人、人与计算机在内的交互结果,进行管理问题的研究。由此可见,实验管理方法的主体是“人”。

而计算实验方法是通过计算机技术构造和模拟出现实系统,并由此进行现实系统复杂性的研究。计算实验是以计算机建模为主,采用自下而上的多代理建模等方法,由此,计算实验方法的主体是计算机程序所构成的人工代理(Artificial Agent)。

根据上述基本概念,不难看出,实验管理方法与计算实验方法的主要区别有:

### 1. 实验主体不同

实验管理方法的主体即为实验参与者(人),如体现博弈关系的管理实验可以向实验参与者提供一定的经验,帮助其观测学习的效果。实验参与者一般应具备与所研究对象相近的水平与能力。

而计算实验方法的主体为人工代理,人工代理可以用来替代社会系统中的个体、组织、资源或功能等。例如,管理问题的计算实验把社会组织系统模型化成特定网络结构下由相互作用的“人工代理”构成的演化系统,并把它作为现实社会系统的“替身”,即计算实验方法中的主体主要是计算机化了的“人”和其他智能体。

### 2. 实验思路不同

实验管理方法主要选择由真实人群参与的实验和为参与实验人员提供模拟组织环境的计算机系统所组成。整个过程分为实验准备阶段、实验实施阶段、实验结果分析阶段。在准备阶段,实验者首先选定问题、明确实验目的、深入分析研究对象、提出假设。实验的设计主要包括实验对象的确定、相关实验因素的控制、预备实验等。其中,预备实验的目的是为正式实验提供必要的实验参数,以及必要的实验过程的指导。在预备实验中通常需要确定实验对象数目、指标的有效性、自变量的操作方法、无关变量的控制方法、实验指导语、实验过程的演练。对实验结果通常进行的统计分析包括:实验结果的平均数和标准差计算、总体平均数估计、显著性差异等(万迪昉,2005)。

而计算实验的研究则以自下而上的多代理建模过程为主,架设微观与宏观之间的桥梁,在人工系统模型的基础上,模拟系统基本的演化规律,实现系统微观层面和宏观层面的双向反馈。计算实验在计算机建模前,首先要对拟研究系统进行机理分析,弄清楚实际系统的组成要素、结构和运作机制间的相互影响和通信、接口关系等。根据机理分析阶段设计的方案、提炼的模型,分析、提炼现实系统的角色,建立各类代理模型。定义各类代理的属性、行为规则、学习模式、决策规则和通讯接口,设计各类机制(谈判、合作、协调等)的规则库,以及各类方

法、模型的方法库、模型库。然后,利用计算技术构造智能代理模型实现对实际社会系统及其相互关系的描述,从而构建人工实验系统。在计算机中模拟实际主体的决策行为及其相互作用,记录每一个演化计算“时刻”的各种属性和状态变化,分析社会系统宏观结构特征的演化过程和不同层次间的相互影响及关系,寻找有效的运作协调、优化和控制方法等。

### 3. 小结

综上所述,实验管理方法主要是通过对实验的控制(如设置各种参数),观察实验参与者的行为来研究管理问题、验证或发现新的理论,而计算实验方法则主要运用计算机程序实现技术,建立多代理模型,探索系统复杂行为和演化规律。

概言之,实验管理方法是以人直接参与实验其中为重要特征的一种研究方法,本质上属于经验与行为的调研和归纳,而计算实验方法则是充分运用多代理系统的高度灵活性与可变性,在计算机与网络平台上研究复杂系统机理与演化机制,研究系统微观行为与宏观行为相互影响和作用。

## 3.5.2 计算机仿真方法与计算实验方法

先就一些相关的名词和概念作一些解释。

**仿真:**利用模型模仿真实系统进行实验和研究。

**系统仿真:**依据系统原理,建立描述实际系统结构或行为过程的模仿系统,即利用具有一定逻辑关系和数量关系的仿真模型进行实验研究,并借助专家经验、知识和实验数据分析,以获得对实际系统的正确认识,确定决策方案。

**计算机仿真:**由于现代系统仿真一般以计算机技术为平台,包括相应的计算机仿真技术和专用于仿真的计算机,因此,系统仿真也常称为计算机仿真。

根据以上的基本概念,我们不难理解:

(1) 广义地讲,计算机仿真(系统仿真)方法也好,计算实验方法也好,它们都是通过模仿实际系统来研究真实系统的方法,因此,在这个意义上说,计算机仿真与计算机实验方法都是仿“真”技术。

(2) 仿“真”是一个相对概念,因为任何“仿”都不可能也没有必要完全“真”。这样,“仿真”就有程度之分、级别之分、角度与侧重点之分,也有成本之分。因此,对不同的仿真系统很难笼统地评判它们之间的优劣,但可以分析它们之间的异同。

(3) 一般地,计算机仿真(系统仿真)的基本步骤为问题定义、制定目标、描述系统并列出可能替代方案、收集数据与信息、建立计算机模型、校验和确认模型、运行模型、分析输出。关于这些步骤的详细内容可参见有关著作,这里仅着重指出这九个步骤的基本思路。

事实上,计算机仿真的基本思路为,在明确研究问题和目标基础上,通过数据与信息收集,将现实系统模型化,并进一步将其转换成计算机模型,再确认这些模型是否同我们的设想相吻合,是否具有相应的功能。一句话,要验证模型是否能够正确反映现实系统。显然,既然是“仿”真,就不能指望模型的行为百分之百地就是真实系统的行为,而只能期望两者之间不相抵触或比较接近而已。其基本原则是,假如一个模型在得到相关正确的输入后,其输出与“真实”系统相应的行为或状态在一定程度上是一致的,即认可仿真系统是有效的,否则,则要不断修正模型,使之逐次“逼近”真实系统。

这里一个重要的思想是,计算机仿真是以真实系统为“标杆”,“仿真”要尽量“逼真”。换句话说,计算机仿真方法是视实际的系统现象为“真”,通过构建仿真模型模仿实际系统,如能与实际之“真”充分一致,则认为仿真效果好,否则就逐次修正仿真模型,以减少“失真”。打个比喻,实际的系统行为是一辆汽车轰然驶过并在沙漠中压出的深深的印痕,仿真系统方法则是人们建造一辆汽车,在一定的指令和控制规则下,让它重新开过那个地段,并希望新的印痕能与老的印痕尽可能一致,如果做不到这一点,便不断改进汽车的指令和控制规则,使两者尽可能一致。

(4) 从广义上讲,虽然计算实验也是一种“仿真”,但它的思想与上面有很大的差别。仍然用汽车行驶为例,计算实验方法也是建造一辆汽车,但除了一定的指令和控制规则外,这时还安排了一个计算机化的驾驶员来驾驶这辆汽车,并充分赋予驾驶员在驾驶过程中的自主性,包括“他”对驾驶技术的记忆、学习,对沿途各种情况的适应与反应,同时也注重沿途交通环境与其他汽车对这辆汽车行驶的影响。这样,可以想象,要求这辆汽车的压痕与老的“真实”压痕一致,仅靠汽车建造者事先设定好的指令就极难办到,因为这时驾驶员的自主性及沿途发生的各种情况都是难以预料甚至无法控制的。实际情况是,由于这辆汽车是“真实”汽车的“替身”,所以一般情况下如果这辆汽车重复多次驶过,多次压痕构成的压痕“集”大致会在老的压痕附近,并与老压痕相差不会太远。但也不排斥由于驾驶员的“失常”或者途中发生重大事故,而使某一次压痕与老的压痕“大相径庭”。所有这一切,对计算机实验方法来说,都是“正常”的,因为计算实验方法恰恰显示出主体(驾驶员)的自主性以及系统演化对环境的依赖。所以,即使我们要求“驾驶员”如何“准确”地沿着老的痕迹行驶,但沿途的各种情况、驾驶人员的实时心态与应对能力等均会影响汽车的行驶轨迹,而且整个行驶轨迹又具有“路径依赖性”。因此,重复这样的行驶,一般只能得到一“束”与老痕迹接近的痕迹,也不排斥某一次的行驶轨迹与其他痕迹有极大差异。

这说明,计算实验方法虽然也是“仿真”,但这里的“真”,已不再是真实系统

的“一种”状态、“一条”轨迹,不再是“尘埃”某一次落地的路径,而是在一定的基本法则下的多种可能状态、轨迹和落地路径。

综上所述,社会科学计算机仿真方法是通过计算机尽可能重现“一种”社会现实,这“一种”现实对计算机仿真来说即视为“真”,多次实验得到的仿真结果使这一种社会现实越来越逼真。而社会科学计算实验方法是通过计算机尽可能重现“一束”社会现实,而每一次实现的是这“一束”社会现实中的“一种”,多次实验得到的是这“一束”社会现实的各种可能情形,甚至包括可能的“怪异”情形。

### 3.5.3 社会科学计算实验之评述

在社会科学计算实验方法与计算机仿真及实验管理方法比较的基础上,我们对社会科学计算实验的基本思想再进行凝练,以图对之有更深刻的理解。

#### 1. 计算实验方法揭示了社会系统现象中的两种进化机制。

第一种是由于系统宏观层面上的某种限制(如资源有限等)引起的竞争而产生的广义进化机制,由于这种机制的存在,使得社会在演化过程中存在一种类似生物演化基因的文化复制因子(文化基因),而文化基因在很大程度上决定了人们的记忆、学习、适应、(文化)遗传、突变等个体特征。

在社会经济系统中,每个人的心理和行为可以视为在一定条件下,根据环境影响和其他主体行为等外部输入并结合自身个体特征而最终形成的决策。人的行为可视为其决策的外部表现,决策可以通过模仿被传递,也可以在人脑中被复制或突变。

根据广义进化机制,可以构造人工社会的基因层次,如设计出自我复制和变异功能,可在一定条件下动态生成或退出的、具有独立意义且不可再分的“代码”。这样的“代码”在一定结构下相互组合构成软件系统,并用此来模拟类似生物基因和文化基因的竞争、复制、遗传、变异、组合等基本特征,并进一步从系统演化过程中在“基因”层次上分析基本单位之间的相互竞争与作用。

第二种为社会系统主体主动的、在一定目标驱使下形成的自组织机制。社会系统同时受组织机制和自组织机制的共同作用。具有自组织行为的系统主体之间的相互作用称为自组织结构,自组织结构对于社会经济系统的时空有序结构及演化过程具有重要作用。

依据上述两种进化机制,结合计算机多主体建模技术中面向对象的思想,即可构成计算机实验人工社会的三层模型。

#### 2. 社会科学计算实验方法研究对象主要是整个社会系统。

该方法注重社会系统中个体行为和相互作用,注重系统宏观、中观与微观层面之间的双向反馈,强调人机集成、主体行为规则分析与数理分析的综合集成,

并根据研究需要修正实际模型或参数以重复进行实验。

3. 社会科学计算实验作为新的方法论,其意义在于:

- (1) 能够有效研究有较多层次和较复杂结构的社会系统;
- (2) 能够从系统微观层次上的主体记忆、学习、适应、决策以及相互作用出发,揭示复杂社会现象的形成机制;
- (3) 能够揭示社会系统宏观与微观之间,诸因素之间的相互作用对社会系统的影响;
- (4) 能够进行可控、可重复的实验,提供群体决策支持。

4. “环境依赖”和“问题导向”是社会科学研究紧密结合实际的需要,也是社会科学研究进一步成熟的标志,而计算实验充分注重构建实际问题计算机化的“替身”和充分注重用演化的观点来研究问题,其本身就具有明显的“问题导向”和“环境依赖”特征。由此可见,计算实验方法作为新的方法对推动社会科学研究水平的提高具有重要意义。

5. 社会科学计算实验通过社会系统微观主体行为与系统宏观现象之间的关联机制来研究社会系统的整体“涌现”。“涌现”是不能在事先确知的前提下,通过规定性的“程序”构造出来的,而只能在系统自组织过程中生成并具有路径依赖性。如果“涌现”正是“历史告诉我们”的社会现象,则我们可以通过计算实验方法来解释社会、剖析社会、组织社会和总结规律。如果“涌现”是“历史还没有告诉我们”的社会现象,则我们可以通过计算实验方法来“预测”、“预见”、“预警”和“预言”社会现象。社会经济系统演化过程中的任一点,向后有其确定的路径,但向前不能确定,今天包含着过去,但今天未必包含在过去之中,明天也不完全包含在过去与今天之中。但无论如何,计算实验方法都为我们提供了认识、分析社会历史、现状与预见未来的新的工具和方法。特别有意义的是,计算实验结果一旦向我们展现了社会系统未来时间和非真实世界的景象,它就使我们除了能回放社会历史、重现社会现在之外,还能感受社会的未来。

6. 最后,打个比方,社会科学计算实验好似只对剧中人物和主题作了最基本的规定,但并不对情节与细节作硬性规定的一部剧本。这样,故事的情节便只能依据最基本规定及剧本中人物的特性而自我发展与展开。事实上,有关社会的故事从来都是无法硬性规定的,因此,故事的情节只能“顺其自然”,可能是“一帆风顺”,而最终呈“大团圆”结局,这也许是一般人能估计到的。但也可能其情节“跌宕起伏”,最终为“悲剧”结局,而令我们“大吃一惊”,而这也恰恰是社会系统宏观“涌现”复杂性和演化多样性的体现,也是运用计算实验方法研究社会科学问题之价值所在。

因此,计算实验方法能够让我们突破自身经验和已有理论的局限,突破传统

单一的定性或定量方法的不足,而告诉我们关于社会系统的新故事、新知识、新原理,启迪我们关于社会科学研究的创新与发现;从而让我们不仅可以从社会系统中挖掘数据、挖掘信息、挖掘知识、挖掘智慧,而且挖掘社会复杂性和社会本质、挖掘社会的过去、现在与未来。

## 3.6 应用计算实验的常见问题

本节将从技术实现的角度讨论在应用社会科学计算实验研究方法时经常会遇到,也非常值得关注的几个问题。

### 3.6.1 应用计算实验的基础知识

#### 1. 应用计算实验的理论基础

社会科学研究的计算实验是一种新的方法论体系,它以系统科学思想为指导,借鉴生物学、数学、心理学、计算机科学等多个学科的思想方法,以社会系统为实验对象,从系统演化的角度,利用计算机技术的优势来研究社会系统的演化机制、系统与环境的交互作用以及系统中要素的动力学行为特征。

社会科学研究的计算实验方法是基于复杂性科学的相关理论构建社会系统可计算模型,这就要求研究者要了解复杂性科学领域的主要研究理论,特别是有关演化、涌现、反馈、自组织、非线性、人工社会等理论,掌握系统结构分析、系统特征分析、系统逻辑分析、综合集成等研究方法以及自下而上的系统建模思想。

社会科学研究的计算实验方法的目的就是通过对系统要素行为及其相互作用和影响的微观层面分析,揭示系统整体状态的演化过程,从而进一步揭示社会系统演化的一般原理。因此,研究者应具备把社会系统模型转换为计算实验模型的能力,同时对社会系统的分析是建立在对大量计算实验记录的数据进行分析的基础上的,研究者还需要能够熟练运用各种数据分析方法。

#### 2. 应用计算实验的工具基础

计算实验研究方法的应用范围非常广泛,可以被应用到各个研究领域当中。当然,对于不同领域、不同知识背景的社会科学研究学者来说,可以根据他们所研究的问题,选择合适的工具来帮助自己完成相关研究。

对于那些具有一定的计算机程序编写能力的研究人员来说,在实现计算实验这个环节,可以利用自己常用或熟悉的某一种计算机编程语言(如 C++ 语言、Java 语言等)直接编程实现。这样处理有很大的灵活性,可以按照自己的意愿改动程序结构,实现想要的实验处理方式。如今许多复杂系统建模环境都提

供了大量公用的计算机程序模块或函数,借助已有的建模环境中的库函数,可以大大减少辅助模块的开发工作,如 I/O 模块、图形输出处理模块等。另外,许多专用绘图软件也都支持多种编程语言,借用它们的功能模块或函数,可以获得非常好的图形效果。

对于没有计算机编程经验的研究者来说,可以利用现有的软件建模环境,有选择地使用建模工具。通过短期的学习掌握一种建模工具,同样可以实现最终的模型结果。目前比较常见且方便易学的建模工具有 FABLES、NETLOGO 等,它们的操作过程简单,可利用接近人类自然语言的表达方式设置程序流程和框架,容易学习和掌握。例如建模软件 FABLES,它是一种基于多主体的仿真编程语言,主要目的是帮助那些非计算机专业,或不具有很强计算机编程能力的研究者完成复杂系统的建模。它允许研究者通过交互界面的鼠标点击和参数设置,“傻瓜”式地完成实验系统建模,系统模型的每个部分和要素定义都有合适的范例,如模型初始化、调度安排、代理定义等。这对几乎没有软件编程经验的研究者来说也许是个不错的选择。

### 3.6.2 信息处理及其可视化

#### 1. 计算实验与计算机辅助信息处理之间的联系

计算机辅助信息处理是一个包含许多内容的概念,例如企事业单位的信息管理系统、财务系统、人事系统等。从对客观社会系统的表示角度来讲,这些计算机辅助信息处理系统的一个主要特征是用标准化的编码数据,记录现实社会已经发生的事情,并在此基础上根据需要对记录的数据作适当的处理。适当的处理不仅包含对历史情况的分析,对现状的把握,也包括基于历史数据对未来的趋势预测。对计算机辅助信息处理系统而言,记录的基础数据是客观的、唯一的,而且只能从客观世界真实地接收。计算机辅助信息处理系统的计算处理,实际上是对现实社会系统中抽取的给定数据进行计算处理。

计算实验与计算机辅助信息处理系统之间至少有三类联系。首先,计算机辅助信息处理系统记录的数据和处理的结果可以作为评估实验结果的依据之一,但不是唯一的。其次,计算机辅助信息处理系统所记录的数据或处理的结果可以作为计算实验的初始数据,这对于研究一段时间内,某一社会系统在特定初始条件下的演化过程是非常有现实意义的。最后,在一个较长时间周期的管理活动中,例如大型工程项目管理,可以把计算实验和计算机辅助信息处理系统进行整合,实现数据共享。一方面可以不断更新实际的社会活动数据,另一方面可以随时对将来可能的演化方式进行评估。特别是对于诸如大型工程建设等社会活动管理过程中的风险管理、效益评估、进度评估、可行性分析以及对社会与环

境的影响评估等具有很大的意义。

## 2. 计算实验与可视化技术

在计算实验中可以通过不同的方式来表达信息处理的结果,最常见的是二维和三维视图,例如直方图、饼图、网格图以及静态或动态的统计图等。研究者可以借助这些手段直观地了解主体的决策过程、变量之间的相互影响过程以及系统的动态演化过程等。另外,针对特定的社会科学问题的计算实验,可以把虚拟现实技术用于计算实验的人机交互环节,这样能够提供更真实的情景从而将人的因素特别是人对客观环境刺激的反应引入到计算实验中,使得计算实验的结果更加逼近客观现实。虚拟现实(Virtual Reality)一般是指人们通过计算机对复杂数据进行可视化操作和实现实时交互的环境,可认为是计算机可视化技术的一种。其利用计算机构造出一个三维的模拟客观世界的环境,人可以通过眼、手、耳或其他装置与这个环境进行交互。虚拟现实的典型应用有:军事仿真训练、虚拟数字城市、虚拟现实展厅、虚拟现实实验室、数字城市、模拟驾驶等。

社会科学研究的计算实验方法是利用计算技术对社会系统演化机制、与环境的交互作用及其系统中要素的动力学行为进行模拟。因此可以认为虚拟现实关注的是对事物的外在表现的刻画,而社会科学研究的计算实验关注的是对事物内部演化机制的刻画。

综上所述,可以看出计算机辅助信息处理是计算实验的底层,担负着数据收集和处理的工作。可视化技术是将计算实验的过程和结果直观表达的重要手段,可以帮助我们更好地理解计算实验复杂问题,更清晰地认识系统结构,即可视化技术是计算实验信息处理过程和结果的外在表现。在有些复杂的计算实验模型当中,由于虚拟主体的数量多或系统演化时间较长,因此如何有效处理实验产生的海量数据是建模人员必须关注的一个问题。通过合理地使用各种信息处理方式,结合必要的可视化技术能够使得建模人员较好地研究系统中虚拟主体的状态变化和整个系统的演化过程,加深对计算实验结果的理解,这对提高计算实验方法的有效性具有重大意义。

### 3.6.3 定性要素的量化处理

对于许多社会科学领域的研究者来说,当把涉及人的社会学问题研究与计算机技术结合起来一起考虑的时候,定性要素的量化处理常成为他们特别关注且感到困惑和无从下手的问题之一。因此对这个问题要有一个清楚的认识,并有必要寻找一种可行的解决办法。这里以计算人的心理决策活动为例,从以下几个方面来试图解决这个问题。

### 1. 消除对“计算”的“误解”

绝大多数人接触的计算概念最初是从数学引入的,所以当讨论计算的时候,人们会马上联想到数学中的量,也就是一个事物的数值或方向。由此形成的思维模式是首先必须对客观事物进行量化处理,然后才能进行计算处理,这里的计算处理隐含的是基于(数学)方程的计算。事实上,在计算机科学中的“计算”有更广泛的含义。计算的对象可以是有数值计算的“量”的概念的编码,也可以是没有“量”的概念的编码,例如采用编码的方式对文字的处理,只是在某一规则下的先后位序不同,如字母的排序规则,A字符排在B字符前边。因此计算包含了两个主要方面,即对处理对象的可计算描述和操作。对处理对象的可计算描述对应着计算机科学中数据结构的相关方法,采用数值或非数值的编码来表示处理对象,采用适当的结构来表示它们之间的关系。相应地,对处理对象的计算操作对应一段处理程序,这样的一段处理程序既可以基于一组数学方程(公式),也可以基于一组规则。基于方程的计算是将数值运算与逻辑运算通过基本的机器指令表示出来,对应计算机的基础机器指令;而基于一组规则的计算可以用接近自然语言的“IF/THEN”形式规范化表示,对应计算机的机器指令主要是逻辑运算。

社会科学计算实验中需要描述的处理对象可以用数值或编码表示,计算操作可以用基于方程的计算或基于规则的计算,经过适当的设计后,现实系统就可以表示为计算机程序构造的抽象计算模拟系统。

### 2. 正确理解行为主体的心理决策活动

在计算实验方法中,行为主体是系统中能够独立决策的智能主体,它作为系统的一个构成要素(成员),在系统中具有特定的位置。系统演化的过程中的行为主体有特定的输入和输出,行为主体的输入是外部环境中与主体有关的各种信息的抽象,行为主体的输出就是主体的行为决策,而主体的心理活动就是一系列对应输入与输出的转换关系的集合。这一系列的转换关系集合可以用一组数学方程或一套转换规则表示,也可以用某一个网络系统(如人工神经网络)的输入和输出来表示。可以看出,对行为主体的输入与输出刻画得越精细,对转换关系表示的智能化程度就越高,对行为主体的决策活动描述也就越逼近现实,对系统活动的描述就越具体。

### 3. 处理对象的描述方法

对于描述很难或根本无法直接量化的计算对象,可行的处理方法是分类与编码。对应于智能主体的输入和输出,可以把与所研究问题直接相关的所有输入输出信息进行分类(可以继续细分为多个小类),同时对每一类设定若干个状态,对每一类中的每一个状态给定一个唯一的编码,作为这个状态在系统中的标

识。如研究企业技术创新的决策问题时,可以考虑把输入分为:人才、制度、市场、资金、成本、收益等几大类,每一类中可以依据某个特征设定不同的状态,每个状态对应有一个编码。通过这样的方法,就可以将一些复杂问题在计算实验模型中进行很好的描述。

计算处理人的心理决策过程,需要考虑人的不同属性对决策的影响。例如人的性别、年龄、受教育程度、特长等和主体自身对应的私有属性,以及人的职务、岗位、工作类型、家庭角色等和社会活动对应的社会属性。对于属性信息,可以同样采用前述的“分类+状态”的编码方法加以描述。当然,有些属性可以直接用数值表示,如年龄、收入等。

计算处理主体的心理决策过程,需要考虑主体在学习基础上的适应性。以人为例,人在一定程度上会根据社会系统反馈的信息,改变自己的行为以适应社会。计算处理这样的适应过程,需要用适当的方式描述人的记忆。可以把主体在某一时刻对应的输入、输出编码整合记录下来,加上主体对该输入输出决策的评估,作为智能主体的记忆数据,加入到数据库中。考虑到人的记忆具有时间相关性,以及计算机的存储容量有限,可以采用循环队列的数据结构描述主体的记忆数据。

计算处理主体的心理决策过程,还需要考虑主体的认知偏好和行为偏好。从计算的角度看,认知偏好可以理解为主体观测外部世界时,对各类信息关注程度的不同。行为偏好可以理解为是主体对各类输出活动的决策权重不同。因此,认知偏好可以用与输入分类对应的向量描述,而行为偏好可以用与输出分类对应的向量描述。将它们看作输入输出的过滤器,通过对每个主体过滤条件的不同设置,对每一类中的状态进行处理,刻画不同的人对几乎完全一致的输入的不同理解,以及即使是理性决策后的不同行为输出。

#### 4. 处理对象决策的计算方法

计算处理主体的心理决策过程,主要是在描述属性数据、输入和输出的编码数据、记忆数据、认知偏好和行为偏好数据基础上,对主体行为决策的一系列转换关系进行处理的过程。下面以一个简单计算处理例子来说明。

假定计算处理主体决策的一系列转换关系时使用一套固定的转换规则,这相当于构造一个包含输入组合和与之对应的输出组合的表格。用某一时刻的某一输入组合作为关键词,在这个表格中查找最接近或最匹配的输入组合项,然后把对应的输出组合项作为主体的输出。当然这时主体的智能很低,只是简单的“刺激/反应”模型。

这样一个包含输入组合与对应输出组合的表格中的每一项都是一组编码,与生物基因的编码类似,我们可以把它看作是文化基因关于决策的表现形式,并

且可以利用基本的复制、突变、交换等计算操作,来对应处理人类的模仿、尝试、继承、学习等活动。很多演化算法可以用于此类处理,如进化算法、学习算法等,这时主体已经具有适应能力。在此基础上,可以加入基于历史记忆(经验)的决策计算处理,比如类似于专家系统的计算处理或类似于围棋博弈的深度搜索计算,使主体具有更高程度的智能。

注意到由于考虑了多种因素对主体的影响,计算实验模型中的各个主体会具有不同的属性,产生不同的认知偏好和行为偏好,具有不同的角色分工。由于在系统中所处的环境不同,导致能够获取的输入信息不同,进化、学习等适应性计算结果不同,所拥有的记忆也不同。如果再考虑到计算的初始值不同,以及计算过程中的随机因素,即使计算处理的主体数量庞大,也很难找到完全相同的主体。

特别需要指出的是,到目前为止,所有的“计算”没有涉及针对量化后数据的基于方程的计算,而是全部采用针对编码数据的基于规则的计算。

### 5. 处理结果的量化方法

从计算机得到的非数值的编码数据集合中得到量化的结果主要有两类处理方法——统计分析与结构分析。在计算实验过程中记录各种编码和数值,并在此基础上用统计分析方法处理,可以得到一类量化结果。对记录的各种编码和数值作结构分析和关联分析,可以得到以网络或图的形式表现的数据,其中包含了图论分析方法中的相关量化数据,如路径和度等。

对量化后的数据,可以根据需要利用多种数学方法进行进一步的计算分析,其中主要包括以下两个层面的分析。一是空间层面,主要关注数据的空间分布、相对位置、数据结构层次、交互关系和程度等特征。二是时间层面,主要关注资金、信息、物资等的流动过程;局部或整体某一属性的演化过程;拐点、突变点的阈值分析以及系统动态、均衡态的范围分析等。通过对数据的计算分析,可以很好地描述系统结构、各层次状态以及主体行为决策的依据,从而反映出推动社会系统演化的种种特性。

## 参考文献

- Aamodt, A., Plaza, E., Case-based reasoning: foundational issues, methodological variations, and system approaches. *AI Commun.*, 1994, 7:35~59.
- Altiparmak, F., Gen M., Lin, L., Karaoglan, I., A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 2007, doi: 10.1016/j.cie.2007.05.012.
- Barletta, R., An introduction to case-based reasoning. *AI Expert*, 1991, 6:42~49.

- Belew R., Evolution, Learning, and Culture: Computational Metaphors for Adaptive Algorithms. *Complex Systems* 1990, 4:11–49.
- Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G., Swarm Intelligence. Oxford University Press, Oxford, 1999.
- Borisovsky, P., Dolgui, A., Eremeev, A., Genetic algorithms for a supply management problem: MIP-recombination vs greedy decoder. *European Journal of Operational Research*, 2007, doi: 10.1016/j.ejor.2007.06.060.
- Buckeles, B. P., Petry, F. E., Genetic Algorithms. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1992.
- Carboneau, R., Lafraimboise, K., Vahidov, R., Application of machine learning techniques for supply chain demand forecasting. *European Journal of Operational Research*, 2008, 184:1140~1154.
- Carley, K. M., A comparison of artificial and human organizations. *Journal of Economic Behavior and Organization*. 1996, 31:175~191.
- Carley, K. M., Sociology: Computational Organization Theory. *Social Science Computer Review*. 1994, 12(4):611~624.
- Chang, I. C., Hwang, H. G., Liaw, H. C., Hung, M. C., Chen, S. L., Yen, D. C., A neural network evaluation model for ERP performance from SCM perspective to enhance enterprise competitive advantage. *Expert Systems with Applications*, 2008, 35: 1809~1816.
- Chen, S. H., Jakeman, A. J., Norton, J. P., Artificial intelligence techniques, An introduction to their use for modelling environmental systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2008, 78:379~400.
- Chi, H. M., Ersoy, O. K., Moskowitz, H., Ward, J., Modeling and optimizing a vendor managed replenishment system using machine learning and genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 2007, 180, 174~193.
- Choy, K. L., Lee, W. B., Lo, V., Design of an intelligent supplier relationship management system: a hybrid case based neural network approach. *Expert Systems with Applications*, 2003, 24:225~237.
- Dayana, P., Niv, Y., Reinforcement learning: The Good, the Bad and the Ugly. *Current Opinion in Neurobiology*, 2008, 18:185~196.
- Dempster, A. P., Upper and Lower Probabilities Induced by Multivalued Mappings, *Annals Mathematical Statistics*, 1967, 38(2):325~339.
- Denby, B., Le Hégarat-Masclef, S., Swarm intelligence in optimisation problems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2003, A(502): 364~368.
- Devillers, L., Vidrascu, L., Lamel, L., Challenges in real-life emotion annotation and machine learning based detection. *Neural Networks*, 2005, 18:407~422.
- Duda, O. R., Hart, E. P., Nilsson, J. N., Subjective Bayesian Methods for Rule-Based Inference Systems, *National Computer Conference (AFIPS Conference Proceedings vol. 45)*, 1976:1075~1082.
- Efendigil, T., Önüt, S., Kahraman, C., A decision support system for demand forecasting

- with artificial neural networks and neuro-fuzzy models: A comparative analysis. *Expert Systems with Applications*, 2008, doi: 10.1016/j.eswa.2008.08.058.
- Epstein, J. M., Axtell R., Artificial Societies and Generative Social Science, In Masanori Sugisaka, editor AROB 1st. Japan, 1996.
- Farley, M. A., A Probabilistic Model for Uncertain Problem Solving, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC* - 13, 1983, 4: 568~579.
- Fdez-Riverola, F., Corchado, J. M., Improved CBR system for biological forecasting, EOAI, Workshop 23., Binding Environmental Sciences and Artificial Intelligence, 2004, Valencia, Spain.
- Firat, A., Chatterjee, S., Yilmaz, M., Genetic clustering of social networks using random walks. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2007, 51: 6285~6294.
- Foster, D., Young, P., Stochastic Evolutionary Game Dynamics. *Theoretical Population biology*, 1990, 38: 219~232.
- Garvey, T. D., Lowrance, J. D., Fischler, M. A., An Inference Technique for Integrating Knowledge from Disparate Sources, Proceedings of 7th International Joint Conferences on Artificial Intelligence, 1981: 319~325.
- Giarratano, J., Riley, G., Expert Systems Principles and Programming, Thomson, 2002.
- Gilbert, N., Troitzsch, K. G., Simulation for the Social Scientist (Second Edition). Open University Press, 2005.
- Gupta, M. M., Liang, J., Noriyasu, H., Static and dynamic neural networks, from fundamentals to advanced theory. IEEE press, Wiley, 2003.
- Hong, G., Ha, S. H., Evaluating supply partner's capability for seasonal products using machine learning techniques. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 54: 721~736.
- Hong, S. P., Kim, Y. H., A genetic algorithm for joint replenishment based on the exact inventory cost. *Computers & Operations Research*, 2009, 36: 167~175.
- Hu, Y. H., Hwang, J. N., Handbook of neural network signal processing. Boca Raton, FL: CRC press, 2001.
- Kalogirou, S. A., Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2003, 29: 515~566.
- Kaplan, D. J., The STAR System: Multi-Agent Simulation Model of Structure, Task, Agent, and Resource. CASOS Working Paper, 1999.
- Kermack, W. O., Mckendrick, A. G., A contributions to the mathematical theory of epidemics, *Proc Roy Soc Lond*, 1927, 115: 700~721.
- Kianmehr, K., Alhajj, R., Calling communities analysis and identification using machine learning techniques. *Expert Systems with Applications*, 2008, doi: 10.1016/j.eswa.2008.07.072.
- Lane, V. R., Scott, S. G., The neural network model of organizational identification. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 2007, 104: 175~192.
- Li, Y. M., Chen, C. W., A synthetical approach for blog recommendation: Combining trust, social relation, and semantic analysis. *Expert Systems with Applications*, 2008, doi: 10.1016/j.eswa.2008.07.077.

- Marney, J. P., Tarbert, H. F. E., Why do simulation? Towards a working epistemology for practitioners of the dark arts. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2000, 3(4).
- Mellit, A., Kalogirou, S. A., Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, 34: 574~632.
- Minsky, M., *Society of Mind*. Simon and Schuster, New York, 1986.
- Mitchell, T. M., *Machine Learning*. McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
- Michael W, Nicholas R J., Intelligent agents: theory and practice. *Knowledge Engineering Review*, 1995, 10(2): 115~152.
- Nannariello, J., Frike, F. R., Introduction to neural network analysis and its applications to building services engineering. *Build Serv. Eng. Res. Technol.*, 2001, 22(1): 58~68.
- Newman M. E. J., Scientific collaboration networks. I. Network construction and fundamental results. *Phys Rev E*, 2001, 64(016131): 1~8.
- Ng, S. T., Skitmoreb, M., Wong, K. F., Using genetic algorithms and linear regression analysis for private housing demand forecast. *Building and Environment*, 2008, 43: 1171~1184.
- Ostrom, T. M., Computer simulation: The third symbol system. *Journal of Experimental Social Psychology*, 1988, 24: 381~392.
- Piramuthu, S., Machine learning for dynamic multi-product supply chain formation. *Expert Systems with Applications*, 2005, 29: 985~990.
- Quek, M., Moskowitz, D. S., Testing neural network models of personality. *Journal of Research in Personality*, 2007, 41: 700~706.
- Reschke, C. H., Evolutionary Perspectives on Simulations of Social Systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2001, 4(4).
- Salem, A. B., Intelligent Learning Systems: A Case-Based Reasoning Approach. 2000, [http://rilw.itim-cj.ro/2000/tutorials/salem\\_tut.html](http://rilw.itim-cj.ro/2000/tutorials/salem_tut.html).
- Samuel, A. L., Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers. *Computers and Thought*. New York: McGraw-Hill, 1959.
- Schaffer, M. E., Evolutionarily Stable Strategies for a Finite Population and a Variable Contest Size. *Journal of Theoretical Biology*, 1988, 132: 469~478.
- Shortliffe, E. H., Rhame, F. S., Axline, S. G., Cohen, S. N., Buchanan, B. G. MYCIN, A Computer-program Providing Antimicrobial Therapy Recommendations, *Clinical Research*, 1975, 23(2): A107~A107.
- Smith, M. J., Evolution and the theory of games. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- Smith, M. J., Price, G. R., The Logic of Animal Conflicts. *Nature* 1973, 246: 15~18.
- Sutton, R. S., Barto, A. G., Reinforcement Learning: An Introduction (Adaptive Computation and Machine Learning). The MIT Press, 1998.
- Tang, F., Xi, Y., Ma, J., Estimating the effect of organizational structure on knowledge transfer: A neural network approach. *Expert Systems with Applications*, 2006, 30: 796~800.
- Teodorović, D., Swarm intelligence systems for transportation engineering: Principles and

- applications. *Transport. Res. Part C*, 2008, doi: 10.1016/j.trc.2008.03.002.
- Watson R. A., Pollack J. B., Modular Interdependency in Complex Dynamical Systems. *Artificial Life*. The MIT Press, 2005, 11(4):445~457.
- Watson, I., Marir, F., Case-Based Reasoning: a review. *Knowl. Eng. Rev.*, 1994, 9: 327~354.
- Wolfram, S., *A new kind of science*. Wolfram Media, 2002.
- Wolfram, S., *Cellular Automata as Simple Self-organizing System*, 1982.
- Wooldridge, M., Jennings, N. R., Intelligent agents: theory and practice. *Knowledge Engineering Review*, 1995, 10(2):115~152.
- Yao, M. J., Chu, W. M., A genetic algorithm for determining optimal replenishment cycles to minimize maximum warehouse space requirements. *Omega*, 2008, 36:619~631.
- Ye, Q., Zhang, Z., Law, R., Sentiment classification of online reviews to travel destinations by supervised machine learning approaches. *Expert Systems with Applications*, 2008, doi: 10.1016/j.eswa.2008.07.035.
- Yoo, J. S., Hong, S. R., Kim, C. O., Service level management of nonstationary supply chain using direct neural network controller. *Expert Systems with Applications*, 2008, doi: 10.1016/j.eswa.2008.02.005.
- Zadeh, L., Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, 8(3):338~353.
- 贝塔朗菲.一般系统论:基础、发展和应用.林康义,魏宏森等译.北京:清华大学出版社,1987.
- 彼得·圣吉.第五项修炼.上海:上海三联书店,1998.
- 成思危.复杂性科学探索.北京:民主与建设出版社,1999.
- 成思危.与时俱进的中国人文社会科学.北京:中国人民大学出版社,2002.
- 成思危.在第四届中国软科学学术年会上的讲话.中国软科学,2004,(1):1~4.
- 成思危.中国管理科学的发展道路.第五届管理国际会议上的主题讲演.2004.
- 董荣胜,古天龙,蔡国永,谢春光.计算机科学与技术方法论.计算机科学,2002,1(29):1~4.
- 范冬萍.西方环境伦理学的整体主义诉求与困惑——现代系统整体论的启示.现代哲学,2003, 3:58~63.
- 范玉顺,曹军威.多代理系统理论、方法与应用.北京:清华大学出版社,2002.
- 弗兰西斯·路纳,本尼迪克特·史蒂芬森. *SWARM* 中的经济仿真——基于智能体建模与面向对象设计.北京:社会科学文献出版社,2004.
- 哈肯.协同学——自然成功的奥秘.载鸣钟译.上海:上海科学普及出版社,1988.
- 哈罗德 W. 库恩.博弈论经典.北京:中国人民大学出版社,2004.
- 贺宇江.商业组织的基因.北京:机械工业出版社,2003.
- 胡晓峰,司光亚,罗批,杨镜宇,张明智,吴琳.战争复杂系统与战争模拟研究.系统仿真学报, 2005, 17(11):2769~2774.
- 黄国锐,曹先彬,徐敏,王煦法.基于内分泌调节机制的行为自组织算法.自动化学报,2004, 30 (3):460~465.
- 黄海军.城市交通网络动态建模与交通行为研究.管理学报,2005, 2(1):18~22.
- 黄群慧,刘爱群.经济学和管理学:研究对象与方法及其相互借鉴.经济管理,2001(2):62~68.
- 黄速建,黄群慧.企业管理科学化及其方法论问题研究.中国社会科学院重大课题成果总报告.2005.

- 金观涛,华国凡.控制论和思想方法论.北京:科学普及出版社,1983.
- 金建萍.社会自组织演化的基本原理.东方论坛,2004,1:16~19.
- 克里斯汀·蒙特,丹尼尔·塞拉.博弈论与经济学.北京:北京经济管理出版社,2005.
- 克劳斯·迈因策尔.复杂性的思维:物质、精神和人类的复杂动力学.曾国屏译.北京:中央编译出版社,2000.
- 孔宪娟.基于元胞自动机的交通流建模及其特性分析研究.北京交通大学博士论文,2007.
- 兰少华.多Agent技术及其应用研究.南京理工大学博士论文,2002.
- 蓝仁哲,廖七一,冯光荣,刘文哲.加拿大百科全书.四川辞书出版社,1998.
- 勒内·托姆.突变论:思想和应用.周仲良译.上海译文出版社,1989.
- 李冬梅,郭德俊.动态系统研究方法在社会心理学中的应用.心理学探新,2005,25(1):54~57.
- 李怀祖.管理研究方法论.西安:西安交通大学出版社,2004.
- 李集明.科学数据发布策略探讨与气象数据共享实践.中国基础科学,2003,1:56~62.
- 理查德·道金斯.自私的基因.长春:吉林人民出版社,1998.
- 刘华杰.以科学的名义:刘华杰学术自述集.福州:福建教育出版社,2000.
- 米歇尔·沃尔德罗普.复杂——诞生于秩序与混沌边缘的科学.陈玲译.北京:三联书店,1997.
- 尼科里斯·普利高津.非平衡系统的自组织.北京:科学出版社,1986.
- 尼科里斯·普利高津.探索复杂性.四川:四川教育出版社,1992.
- 欧文·拉兹洛.系统哲学引论——一种当代思想的新范式.北京:商务印书馆,1998.
- 钱学森,于景元,戴汝为.一个科学新领域——开放复杂巨系统及其方法论.自然杂志,1990,13(1):3~10.
- 盛昭瀚,蒋德鹏.演化经济学.上海:上海三联书店,2002.
- 盛昭瀚,姚洪兴,王海燕,陈国华.混沌动力系统的重构预测与控制.北京:中国经济出版社,2003.
- 司光亚,罗批,张明智.面向战略决策模拟训练的模型构建实践与思考.军事运筹与系统工程,2008,22(2):16~19.
- 宋健.现代科学技术基础知识.北京:北京科学出版社,1994.
- 宋学峰.复杂性科学研究现状与展望.复杂系统与复杂性科学,2005,2(1):10~17.
- 宋毅,何国祥.耗散结构论.中国展望出版社,1986.
- 苏凤环.自组织临界性理论与元胞自动机模型研究.西南交通大学博士论文,2006.
- 苏珊·布莱克摩尔.谜米机器——文化之社会传递过程的“基因学”.长春:吉林人民出版社,2001.
- 孙明贺,郦全民.论社会科学研究的计算机实验方法.东华大学学报:社会科学版,2006,(2):20~24.
- 孙志海.自组织的社会进化理论方法和模型.北京:中国社会科学出版社,2004.
- 万迪昉,谢刚,乔志林.管理学新视角:实验管理学.科学学研究,2003,21(2):131~137.
- 万迪昉.实验管理学.北京:高等教育出版社,2005.
- 汪小帆,李翔,陈关荣.复杂网络理论及其应用.北京:清华大学出版社,2006.
- 王飞跃,蒋正华,戴汝为.人口问题与人工社会方法:人工人口系统的设想与应用.复杂系统与复杂性科学,2005,2(1):1~9.
- 王飞跃.人工社会、计算实验、平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究的讨论.复杂系统

- 与复杂性科学,2004,1(4):25~35.
- 王国成,黄韬.现代经济博弈论:市场经济中的竞争与对策.北京:经济科学出版社,1996.
- 王拉娣.传染病动力学模型及控制策略研究.上海大学博士论文,2005.
- 吴广谋,盛昭瀚.系统与系统方法.南京:东南大学出版社,2000.
- 吴彤.复杂性是随机性吗?系统辩证学学报,2005,13(2):6~11.
- 西利亚斯.复杂性与后现代主义—理解复杂系统.上海:上海科技教育出版社,2005.
- 香山科学会议第112次学术讨论会综述. <http://www.xssc.ac.cn/Web>ListConfs/ConfBrief.asp?rno=232.1999>
- 香山科学会议第20次学术讨论会综述. <http://www.xssc.ac.cn/Web>ListConfs/ConfBrief.asp?rno=329.1994>
- 香山科学会议第227次学术讨论会综述. <http://www.xssc.ac.cn/Web>ListConfs/ConfBrief.asp?rno=417.2004>
- 香山科学会议第255次学术讨论会综述. <http://www.xssc.ac.cn/Web>ListConfs/ConfBrief.asp?rno=809.2005>
- 香山科学会议第269次学术讨论会综述. <http://www.xssc.ac.cn/Web>ListConfs/ConfBrief.asp?rno=861.2005>
- 香山科学会议第68次学术讨论会综述. <http://www.xssc.ac.cn/Web>ListConfs/ConfBrief.asp?rno=278.1997>
- 项宝卫,余雪芬,骆兆文.模拟退火算法在优化中的研究进展.台州学院学报,2005,6:6~9.
- 肖条军.博弈论及其应用.上海:上海三联书店,2004.
- 谢惠民.非线性科学丛书:复杂性与动力系统.上海:上海教育出版社,1994.
- 许国志,顾基发,车宏安.系统科学.上海:上海科技教育出版社,2000.
- 杨健,赵国庆,严守权.经济数学模型化过程分析.北京:中国人民大学出版社,2002.
- 于景元,周晓纪.从综合集成思想到综合集成实践——方法、理论、技术、工程.管理学报,2005,(1):4~10.
- 于维生,朴正爱编著.博弈论及其在经济管理中的应用.北京:清华大学出版社,2005.
- 约翰·霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性.上海:上海科学技术出版社,2000.
- 约翰·霍兰.涌现——从混沌到有序.陈禹等译.上海:上海科学技术出版社,2001.
- 曾国屏.自组织的自然观.北京大学出版社,1996.
- 曾建国,俞志和.虚拟现实的技术及其应用.北京:清华大学出版社,1996.
- 张建伟.基于模拟式教学及其效果研究回顾.电化教育研究,2001,7:68~71.
- 张军,盛昭瀚.组织行为演化研究的计算试验方法.复杂系统与复杂性科学,2005,2(4):29~36.
- 张维迎.博弈论与信息经济学.上海:上海三联书店,1999.
- 赵东奎,张世伟.基于主体计算经济学初探.吉林大学社会科学学报,2003,2:32~38.
- 赵俪生.赵俪生文集.兰州:兰州大学出版社,2002.
- 周昌乐.透视哲学研究中的计算建模方法.厦门大学学报(哲学社会科学版),2005,1:5~13.
- 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用.北京:国防工业出版社,1999.
- 周涛,柏文洁,汪秉宏,刘之景,严钢.复杂网络研究概述.物理,2005,34(1):31~36.
- 周维刚.论还原方法与还原论.系统辩证学学报,2005,13(1):48~51.
- 朱大奇,史慧.人工神经网络原理及应用.北京:科学出版社,2006.



# 前　　言

供应链是由不同利益主体构成的合作型系统,是典型的、需要协调的整体,其成员在追求自身利益最大化的同时往往与系统整体目标产生冲突。因此为达到系统的整体优化目标需要设计有效的协调策略,使成员的个体利益和供应链整体利益相联系,激励其在追求自身利益最大化的过程中实现供应链整体利益最大化。

目前,国内外学者主要是针对具体的问题对供应链协调策略的设计进行研究,从研究方法角度可以将这些成果大致分为基于传统建模方法和基于多Agent的建模方法。在传统建模方法中,人们从供应管理、需求管理、生产管理、信息管理等不同问题的研究中设计了多种协调策略,产生了一系列成果,主要包括:

回购或退货策略(Pasternack, 1985; Ding and Chen, 2006; 于辉等,2005),收入共享策略(Cachon, 2005; 陈夫华等,2006),备货策略(Eppen et al., 1997),数量折扣策略(Wang et al., 2000; Li et al., 2006),数量柔性策略(Tsay, 1999; Kamrad et al., 2004; 杨庆定等,2005),期权理论策略(Moses et al., 2000; 陈旭,2006),快速反应策略(Iyer et al., 1997; 鲁其辉和朱道立,2004),价格折扣策略(Wang, 2005; 刘心报等,2006)等。

然而由于这些方法本身的局限性,现有研究大多集中于二层结构的供应链,即供应链中上游企业和下游企业之间的协调问题(Cachon, 2003),研究的问题也相对单一。20世纪90年代以来,随着多Agent技术的发展和成熟,众多学者开始采用基于代理的方法研究供应链。自Fox等(1993)首次用合作的智能Agent研究供应链以来,多Agent方法由于其可实验性、可量化性和快速性特点而得到了广泛关注。

实际上,供应链是由自主或者半自主的企业实体构成的典型复杂系统,这种复杂性不仅是因为其构成要素多且具有各自不同的独特能力,而且是因为这些要素间常常表现出非线性的、动态且密切的关系(Ashmos et al., 2002),同时,

供应链网络也是一个典型的复杂自适应系统(Choi et al., 2001; Surana et al., 2005)。

由于多 Agent 的分布式、自治性、快速性等特点,应用多 agent 方法研究供应链问题在供应链管理中成为一个新的研究热点。Swaminathan 等(1998)认识到基于多 Agent 的仿真模型是一种低成本、高效率、可重用的供应链建模与模拟技术,多 Agent 这些优点更能够描述供应链中的随机性和多点分布决策的特征。随后,众多学者从供应链建模、模拟(Fox et al., 1993; Lu et al., 2001; Kwon et al., 2007; 陈剑和陆今芳,2002; 陈志祥,2005)、生产计划调度(Baker, 1998; Caridi et al., 2004; 蒋旻,2006)等不同角度对供应链管理进行了研究。

20世纪80年代以来,随着人们对系统复杂性认识的不断加深,以美国圣塔菲研究所(Santa Fe Institute, SFI)为标志的复杂性科学的研究逐渐兴起(戴汝为,1997;成思危,1999)。面对社会、经济等复杂系统的研究,复杂性科学放弃了还原分解的方法,取而代之的是一种自下而上的综合集成方法(钱学森等,1990;于景元,1993)。随着计算机技术的发展和成熟,复杂性科学方法延伸到了人工社会和人生生命等领域,进而出现了计算实验这一新的复杂系统研究方法。计算实验方法以基于代理的计算机建模为主要手段,采用自下而上的建模方法,目前已在众多的领域得到应用,得到国内外众多学者的关注。

复杂性科学的出现和发展不但大大扩展了传统系统理论范围,而且也有助于我们用新的观点观察供应链网络中发生的各种变化,如节点企业之间相互关系的变化、市场的变化以及外部环境的变化等。由于企业本身是一个开放复杂的巨系统,而多个企业组成的供应链也属于开放的复杂巨系统的范畴。因此,采用复杂系统理论研究供应链管理,可以为解决供应链管理问题提供一种有效方法。它能够帮助我们对供应链管理中的各种复杂现象取得更好理解以便加以控制,从而以一个崭新的视角指导对供应链的构建与管理,控制供应链构建与管理过程中的复杂性,提高供应链构建与管理的效率及效果。

计算实验方法是复杂性科学理论中解决复杂性问题的新兴方法,该方法可以弥补以往实验的缺陷,其优点主要表现在可以完全按照自己提出的假设来决定研究的变量、设计变量的水平等,通过操纵自变量来观察因变量的变化,可以通过调整变量和实验条件观察到常规状态下很难出现的极端值和交互作用,因而能较好地估计变量间的因果关系。另外,计算实验是可以重复的,这是研究科学性的重要体现。采用计算实验方法可以更加方便地从供应链网络的整体出发,研究供应链网络中管理者关心的重大问题,揭示供应链网络演化过程的本质规律,为企业管理者和供应链网络集中化决策者(核心企业或第三方)提供决策参考。目前,很少有文献系统地运用计算实验方法来研究供应链管理中的一系

列问题。

一方面,供应链的复杂性迫使我们亟须尝试新的方法来对供应链的优化与协调进行研究;另一方面,复杂性科学的兴起,尤其是计算实验方法的相较于以往实验在解决复杂性问题时所显现的种种优势,也为我们用计算实验的方法解决供应链复杂性问题提供了新的思路和视角。因此,本专题试图通过采用计算实验方法研究供应链系统,进而推广计算实验方法的应用领域,同时对复杂供应链中的几类问题进行较为深入的研究,以对供应链运作提供决策建议。当然,通过本专题的学习,读者可以初步掌握对复杂供应链系统进行分析研究的基本思路和步骤,以及在供应链领域如何采用计算实验方法进行建模和实验。

本专题包括四大部分内容,分别从库存控制、价格协调、供应风险、网络设计等领域进行计算实验的相关研究。第一部分的内容为:供应链动态库存控制及其计算实现,包括两节内容:基于案例推理的强化学习算法设计及其在库存控制中的应用、异构供应链下( $S, s$ )随机控制系统的研究;第二部分的内容为:基于不确定信息谈判的供应链协调及其计算实现。建立了多 Agent 和专家系统的不确定性多 Agent 模型,通过谈判进行供应链的协调,并以外贸服装业进行验证;第三部分的内容是:基于人工供应链模型的供应风险应对策略研究,此部分的研究首先建立了人工供应链模型框架,随后,基于此模型,研究了交货提前期对供应风险的影响以及供应风险下的若干应对策略;第四部分研究的是供应链网络设计与优化问题,分为三节进行介绍,首先是基于人工供应链模型的供应链网络的动态演化问题研究;随后以逆向物流网络为背景,研究了逆向物流网络设计和优化问题;最后以复杂网络为工具运用计算实验研究了供应链网络结构的突变管理。

## 第4章

# 供应链动态库存控制及其计算实现

## 4.1 基于案例推理的强化学习算法 设计及其计算实现

### 4.1.1 简介

供应链管理为市场中的企业提供了竞争优势。其中,库存管理起到了重要的作用,近年来吸引了很多研究者的关注。一些已知的库存控制策略引起了人们的注意,并从各个方面进行了改进,例如降低成本和增加柔性。Chen 等(2006)提出了一种基于案例的多标准 ABC 分析,这种方法通过考虑附加的标准,例如 SKU(stock-keeping units)的关键程度来提高 ABC 的性能,这一过程通过考虑 SKU 分类中更多的因素来提高柔性。Lee 和 Wu(2006)提出了一种基于统计过程控制(SPC, statistical process control)的补货方法,其中库存规则和需求规则设计用来决定补货量,以此来解决订货批次问题,这个控制系统减少了延期交货量与牛鞭效应。Tütüncü 等(2007)提出了在不确定情况下连续盘点的库存控制方法,寻找出使模糊成本最小的再订货点与最佳订货量。

另一方面,不同的库存管理系统可以根据具体的行业或环境来进行设计。Aronis 等(2004)使用贝叶斯方法来预测电子设备备用零件的需求。这种方法为决定满足既定顾客服务水平的库存水平提供了更高的准确性。Ashayeri 等(2006)提出了在制造行业中循环生产—库存优化模型。ElHafsi(2007)提出了在订单装配系统中的最优库存分配策略是一种多级的且取决于状态的配给策略。Diez 等(2008)设计了基于离散人口均衡(discretized population balance)模

型的控制方法。PB(population balance)模型用来描述几乎每个加工工业中都会遇到的特殊工艺。Kopach等(2008)回顾了一种排队模型并使用能级交叉技术来确定最佳库存控制策略。

为了识别影响库存管理的因素,例如成本,需求等,可以通过辅助设计库存管理的方法。Andersson 和 Marklund(2000)提出了一种修正的仓库成本结构模型,将多级的库存管理问题分解为多个单级的问题。通过对这些问题使用一种简单的协调过程就可以得到近似优化解。Zhang(2007)研究了库存管理在需求具有时间异方差性的情况下问题,文中发现这种特性对于库存成本有很大的影响。Chiang(2007)使用动态编程方法来决定固定订单系统中的最优库存控制策略。Tütüncü 等(2007)使用模糊集理论处理成本的不精确性,使用概率论处理顾客需求的不确定性。此外,Maiti 和 Maiti(2007)考虑了在模糊环境中的通货膨胀和折价的情况,设计了库存管理中的最优生产和广告策略。

从上述的最近研究发现,数学或分析模型是主要的方法,例如贝叶斯方法(Aronis et al., 2004)、效用函数方法(Maiti 和 Maiti, 2007)、模糊集理论(Tütüncü et al., 2007)、自回归和集成移动平均数(Autoregressive and Integrated Moving Average),广义自回归条件异方差(Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity)(Zhang, 2007)。这一类方法提供了严格的推导过程,通常含有假设条件下的复杂符号和公式。尽管如此,一方面,动态问题中的环境可能会随时间变化,特别是在供应链一类的演化系统中,某一时间的解可能并不适用于另一时间;另一方面,这些模型对于管理者来说由于计算的复杂性而很难实施。因此,为了作出正确的决策,管理者应当具有从不断丰富的经验中学习的能力。强化学习(reinforcement learning)是一种机器智能的方法,它结合了动态编程和监督学习,可以用来构建有效的机器学习系统(Harmon and Harmon, 1996)。Chi 等(2007)研究并证实了使用机器学习建模、理解和优化复杂供应链的适用性和需求性。为了更好地使用学习方法,智能主体是必需的载体。多代理系统(MAS, Multi-Agent System)是一种有效的方法,其中代理具有智能性、自主性、互动性和反应性的特性。Liang 和 Huang(2006)设计了一个多代理系统来模拟供应链系统,通过代理之间的协调来控制库存并且使供应链的整体成本最小化。Govindu 和 Chinnam(2007)提出了一种以过程为中心的理论框架,用来设计多代理供应链系统。

因此,本文中提出了一种在多代理供应链中基于增强学习和案例推理(CBR)的学习方法(CRL)。类似的研究如 Kwon 等(2007),他们设计一种基于案例的短期增强学习方法,用来在供应商管理补货(VMR)的库存策略中,以满足目标顾客服务水平进行库存管理。而在本文中,旨在尝试提供一个更简单但

性能类似或更好的学习算法，并且这种算法可以更广泛且更易于应用。进一步说，文中建议建立 CRL、SCM 和 MAS 之间的更紧密的“联系”。

本节的内容安排如下:第二部分解释并说明了文中的供应链模型和库存管理问题;第三部分具体描述了文中提出的 CRL 算法;衡量 CRL 性能的计算实验环境和实验结果在第四部分叙述;第五部分给出了结论和扩展研究方向。

#### 4.1.2 多代理供应链模型

首先建立一个包含若干顾客和零售商的简化两级供应链模型以演示提出的算法(见图 4.1)。假设每个零售商在一个固定的延时后从供应商收到所有订货,不管其订货数量为多少。并且零售商将面临两种情况的动态顾客需求:

- (1) 每个零售商都有自己的固定消费群,但是顾客的需求是动态的;
  - (2) 每个顾客在同一个竞争市场中自由选择零售商。

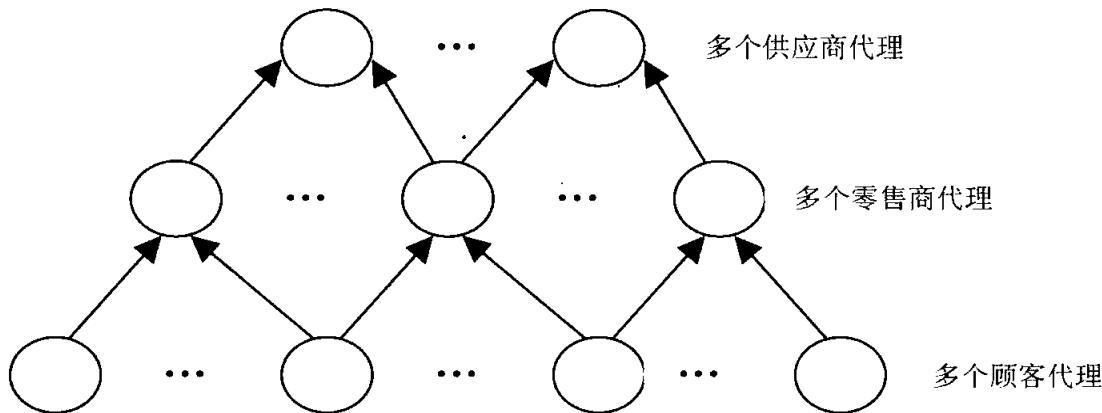


图 4.1 研究的供应链模型

在以上第二种情况中需要增加顾客选择零售商的标准和零售商为吸引顾客或使利润最大化的调整策略。前一个标准采用由 Zhang 和 Zhang(2007)提出的简化的动机方程：

$$M_i = PS_i \times P_i + QS_i \times Q_i + ft_i \times in_i \quad (4.1)$$

$M_i$  是一个顾客代理对于零售商  $i$  ( $i = 0, \dots, N_{retailer} - 1$ ) 的选择动机。 $PS_i$  表示一个顾客对于零售商  $i$  的价格敏感度。 $QS_i$  表示质量敏感度变量， $ft_i$  为跟随趋势。 $P_i$  和  $Q_i$  分别为零售商  $i$  的价格和质量。 $in_i$  为一个代理从朋友代理中获得的关于零售商  $i$  的影响。式(4.1)具体展开为：

$$M_i = (-\alpha^{P_i - P_{ave}} + K) \times P_i + (\beta^{|Q_i - Q_{ave}|} + L) \times Q_i + ft_i \times in_i \quad (4.2)$$

其中,  $\alpha > 1$ ,  $0 < \beta < 1$ ,  $P_{ave}$  和  $Q_{ave}$  分别表示所有零售商的平均价格和平

均质量。 $K$  为一个常量,用来表示顾客的价格敏感度,不同的顾客代理由于其社会地位的不同,对价格的敏感度也不同。 $L$  为相应的顾客的质量敏感度。 $in_i$  的计算方法为:每个顾客根据自己对所有零售商的排行,对外都有一个影响列表(从正到负),例如对于自己心中排行第一的零售商评价为 +30,第二名 +25,直到最后一名评价为 -30。 $in_i$  等于所有朋友对于零售商  $i$  的评分之和。

对于零售商  $i$  来说,一种简单的调整策略如下:

```

if (its market share < average market share)
    then {  $P_i = P_i - p$  };
else if (its market share > average market share)
    then {  $P_i = P_i + p$  };
else no change is made.

```

在两种情况中,不能立刻满足的需求视为失去销售机会。但是,在第二种情况下,由于每个顾客根据动机方程都有一个自己心中对于所有零售商的排名,当第一名零售商库存不足时,顾客即向第二名购买,以此类推。

在此供应链中,所有的零售商首先使用周期盘点库存策略( $T, S$ ),其中  $S$  为补充后的最大库存量,然后使用定量订货( $Q, s$ )策略,其中  $s$  为安全库存。这两个量( $S, s$ )通过使用 CRL 算法以满足目标顾客服务水平为目标来学习(见图 4.2 和图 4.3)。每个零售商的目标包括满足目标顾客服务水平以及最小化多余的库存。文中的顾客服务水平采用订货完成率(fill-rate)表示。

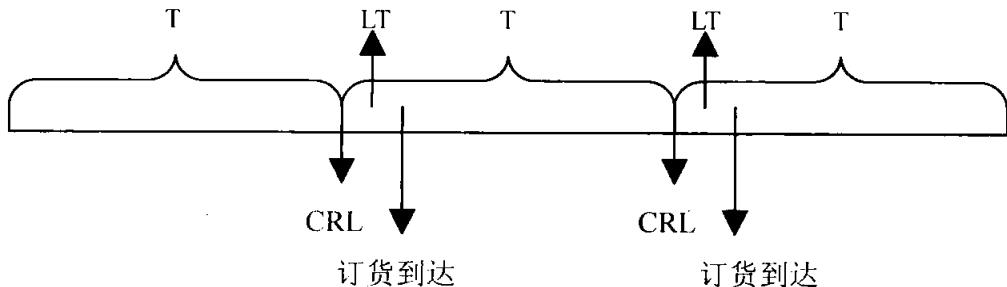


图 4.2 ( $T, S$ ) 库存补充机制

可以看出在( $T, S$ )系统中,CRL 算法用在送货延时(LT, lead time)之前,因为此时需要学习前一个行为的结果从而决定和使用新的订货上限水平(Order-up-to level),并且发出补货订单。而在( $Q, s$ )系统中,再订货点的选择是在 LT 之后,因为此订货点只有在下次库存低于安全库存水平时才使用。

模型使用 Java 编程,环境为 JDK(Java2 Development Kit)1.5。各代理及属性介绍如下:

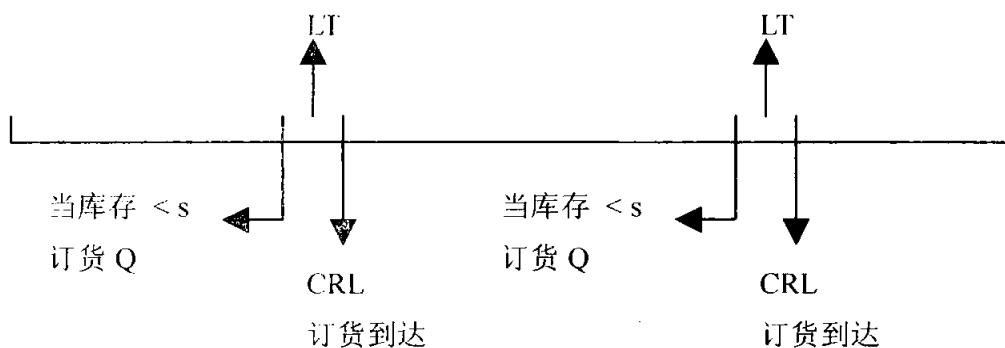


图 4.3 (Q, s) 库存补充机制

(1) Customer 类: *ID* (*int*), 顾客 ID。*Demand* (*int*), 动态需求。*K* (*int*), 价格敏感度变量。*L* (*int*), 质量敏感度变量。*index* [] (*array of double*), 动机函数值的数组。*Rank* [] (*array of all retailer objects*), 零售商的数组。*Influence\_out* [] (*array of double*), 对朋友的关于零售商的影响。*Influence\_in* [] (*array of double*), 从朋友接收到的关于零售商的影响。*Follow* (*double*), 跟随趋势。*FriendID* [] (*array of int*), 朋友代理的 ID。 $\alpha$ ,  $\beta$  (*static double*), 动机函数的参数。*Mean* (*static int*), *CV* (*static double*), *Deviation* (*static int*), *T* (*static int*); *extent* (*static double*), 动态需求的参数。*Range* (*static int*), 朋友代理的个数。*SuperID* (*Vector*), 每次记录卖者的 ID。*BuyHistory* (*Vector*), 每个时期内记录购买历史, 记录为零售商的 ID。

(2) Retailer 类: *ID* (*int*), 零售商 ID。*Price* (*double*), 零售商货物的价格。*quality* (*double*), 零售商货物的质量。*Cost* (*double*), *profit* (*double*), *bank* (*double*), 保留。*Stock\_in* (*Vector*), *Stock\_out* (*Vector*), 货物流记录。*Money\_in* (*Vector*), *Money\_out* (*Vector*), 资金流记录, 保留。*LostSales* (*Vector*) 丢失的所有销售记录。*Order* (*int*), 每次的补货量。*TimeNow* (*int*), 市场的运行期。*T* (*static int*), (*T*, *S*) 系统的审核周期。*Q* (*static int*), (*Q*, *s*) 系统的订货量。*Max\_Stock* (*int*), (*T*, *S*) 系统的订货上限水平或 (*Q*, *s*) 系统的再订货点。*TargetSL* (*static double*), 预先定义的目标顾客服务水平。*Slave* (*static double*), 平均顾客服务水平。*CurrentSL* (*double*), 当前达到的服务水平。*Case* [] (*array of Vectors*), *CaseSize* (*int*), *Counter* [] (*array of int*), *CaseMarker* (*int*), *ActionMarker* (*int*), *UpdateMarker* (*int*), *InvenIncrease* (*int*), *InvenDecrease* (*int*), *SLba* [] (*array of double*), *SLaa* [] (*array of Vectors*), *Actions* [] (*array of Vectors*), CRL 的组成部分。*SuperID* (*Vector*), *SuperHistory* (*Vector*), 供应商记录, 保留。*NextID* (*Vector*), *NextHistory* (*Vector*), 顾客记录。

(3) Transfer 类:该类负责上下游企业之间的货物流和资金流的流动,计算平均价格、质量和服务水平等。

(4) Business 类:该类提供了供应链的市场环境,并且控制其他代理的工作流程。

#### 4.1.3 基于案例推理的强化学习(CRL)

本节具体描述第二部分提到的基于案例推理的强化学习(CRL)的要素和学习过程。对订货上限量(S)和再订货点(s)两者的学习是基于过去经验之上的,设定上一次采用 S(s)后得到的实际服务水平作为之前行动的奖励或回报。由此,可以得出一系列的(状态,行动,回报)记录,这些记录保存下来,为下一次遇到类似状态时提供决策参考。

具体的学习组成部分如下所示:

$$\text{Case}[\text{CaseSize}] = \{\text{Case}[0], \text{Case}[1], \dots, \text{Case}[\text{CaseSize} - 1]\}$$

其中  $\text{Case}[i] = \{\text{inventory level (int)}, D_{\text{mean}}(\text{int})\}$ 。

$\text{Case}[\text{CaseSize}]$  (array of vectors) 用来记录所遇到的不同的状态。每种状态包含两个部分:当前的库存策略状态(当前 S 或 s 的选取值)和预测的当前顾客平均需求。

$$\text{Counter}[\text{CaseSize}] = \{\text{Counter}[0], \text{Counter}[1], \dots, \text{Counter}[\text{CaseSize} - 1]\},$$

其中  $\text{Counter}[i] = \{\text{counter (int)}\}$ 。

$\text{Counter}[\text{CaseSize}]$  (array of int) 为一个计数器序列,记录了每种状态所遇到的频率。

$$\text{SLba}[\text{CaseSize}] = \{\text{SLba}[0], \text{SLba}[1], \dots, \text{SLba}[\text{CaseSize} - 1]\}$$

其中  $\text{SLba}[i] = \{\text{SLba}_n[0], \text{SLba}_n[1], \dots, \text{SLba}_n[i], \dots\}$ ,  $\text{SLba}_n[i] = \{\text{Current Service Level before action (double)}\}$ 。

$\text{SLba}[\text{CaseSize}]$  (array of double) 记录在相应案例下,行动之前的当前的顾客服务水平。

$$\text{Action}[\text{CaseSize}] = \{\text{Action}[0], \text{Action}[1], \dots, \text{Action}[\text{CaseSize} - 1]\}$$

其中  $\text{Action}[i] = \{\text{Action}_n[0], \text{Action}_n[1], \dots, \text{Action}_n[i], \dots\}$ ,  $\text{Action}_n[i] = \{\text{Action}_m[0], \text{Action}_m[1], \dots, \text{Action}_m[i], \dots\}$ , 其中:  $\text{Action}_m[i] = \{\text{Change amount (int)}\}$ 。

由于在一种状态下可以有多个行动,因此对于行动的记录采用了多级结构,

行动解释为对于当前  $S(s)$  值的变动量(正或者负)。具体的变动数量由  $InvenIncrease(int)$  或  $InvenDecrease(int)$  表示。

$$SLaa[CaseSize] = \{SLaa[0], SLaa[1], \dots, SLaa[CaseSize - 1]\}$$

其中  $SLaa[i] = \{SLaa_n[0], SLaa_n[1], \dots, SLaa_n[i], \dots\}$ ,  $SLaa_n[i] = \{SLaa_m[0], SLaa_m[1], \dots, SLaa_m[i], \dots\}$ ,  $SLaa_m[i] = \{resulting service level after action (reward) (double)\}$ 。

根据行动采取的结构,实际得到的服务水平也采用了相同的结构。总的数据结构如图 4.4 所示,他们之间的关系如图 4.5 所示。

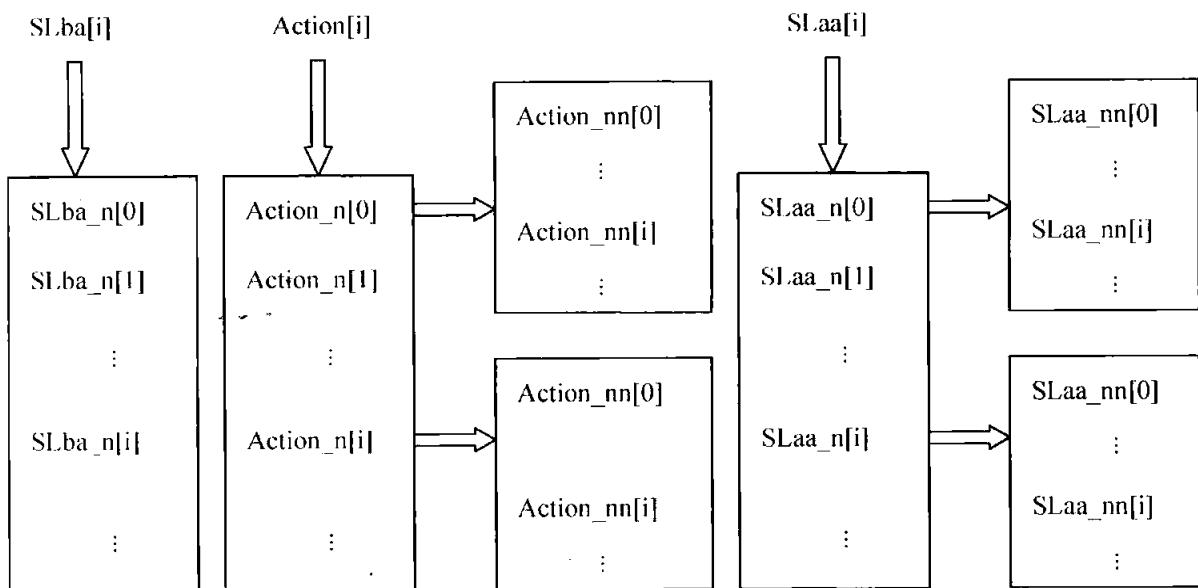


图 4.4 数据结构图

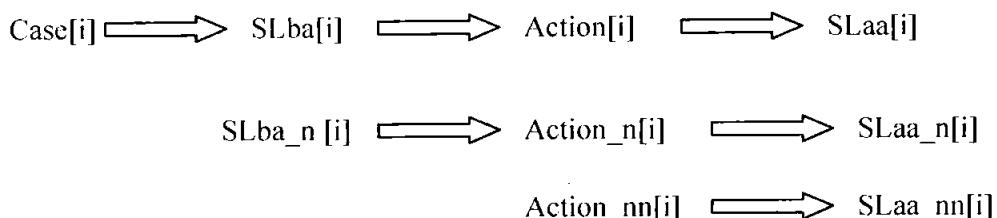


图 4.5 元素关系图

所有数据结构的初始值设为空。基于案例推理的强化学习方法概括来说分为 3 级搜索。搜索步骤如下所示。

第 0 步:在搜索前更新  $SLaa_n[i]$ ,作为上一次行动的回报。记录的具体更新位置由三个标签标识:  $CaseMarker$  案例标签、 $ActionMarker$  行动标签和  $UpdateMarker$  更新标签。

第 1 步:第一级搜索。搜索案例记录(Case)以找到相似的状态。如果案例

示这为一个新的案例。转到第 2.1 步。如果不是新案例,用第 1 步中提及的相似标准搜索  $SLba\_n[]$  以寻找相似的记录,将 grid 设置为 0.2%。然后,如果没有相似记录,转到第 2.1 步,如果有相似记录,更新 ActionMarker,到第 3 步。

第 2.1 步:将当前服务水平加入  $SLba$  记录。比较当前的服务水平与目标服务水平(TargetSL)。如果当前服务水平在 [TargetSL - 0.2%, TargetSL + 0.2%] 的范围内,不做任何更改,并且将 0 加入行动记录中。如果不在此范围内,根据预测的顾客平均需求和当前服务水平与目标服务水平的差距计算  $InvenIncrease$  或  $InvenDecrease$ 。将此计算值加入行动记录并且更新 S。

第 3 步:第三级搜索。搜索  $SLaa\_n[ActionMarker]$  寻找与目标服务水平最接近的记录。此记录表示为 SLC。如果 SLC 的范围落在 [TargetSL - 0.2%, TargetSL + 0.2%], 到第 3.1 步。如果不在这个范围, 到第 3.2 步。

第 3.1 步:从  $Action\_n[ActionMarker]$  中得到相应的历史行动并更新  $S(s)$  和  $UpdateMarker$ 。在下一个周期的第 0 步,用实际得到的服务水平替换 SLC。这样做的目的是保证如果由此行动得到的实际服务水平不再满足目标服务水平时,那么此行动也不再是合格的行动。

第 3.2 步:根据预测的顾客平均需求和 SLC 与目标的差距计算  $InvenIncrease$  或  $InvenDecrease$ 。将此计算值加入行动记录并且更新  $UpdateMarker$ ,以此表示新的  $SLaa\_nn[i]$  记录将要被增加。因此,旧的 SLC 将不会被替代。

第 4 步:当需要再次补货时,重复以上步骤。

#### 4.1.4 计算实验结果与分析

实验中的供应链模型包括 10 个零售商和 80 个顾客。在第一种顾客需求情况下,每个零售商有固定的 8 个顾客。顾客需求遵循正态分布  $N(\mu, \delta^2)$ ,但是均值根据两个参数变化:间隔 T 和范围 extent,这两个参数遵循均匀分布。这表示在每一个时间间隔 T,  $\mu = \mu + extent$ .

两种动态需求定义为:

TE 1:  $T = \text{Uniform}(50, 80)$ ,  $extent = \text{Uniform}(-1, 1)$ .

TE 2:  $T = \text{Uniform}(15, 30)$ ,  $extent = \text{Uniform}(-2, 2)$ .

需求的标准偏差( $\delta$ )的计算为  $\mu$  乘以参数变量(CV)。初始  $\mu$  为 20。每个零售商的目标服务水平为 90%。(T, S)的 LT 设为 1,(Q, s)的 LT 设为 4。每个实验运行 10000 步。在相同实验条件下,使用不同的随机种子,重复 20 组实验,得出的平均服务水平作为最后的结果。第一种顾客需求情况下的 4 个实验模式设置如表 4.1 所示。

类根据回报的变化而变化,这种回报的变化反映了环境的变化。随着经验的累积和增加,错误将会不断减少。

文中所思考的是将 CRL、SCM 和 MAS 更紧密地结合起来。未来的可能研究方向有两个。一个方向是将 CRL 扩展到一个多级的多代理供应链,这样可以观察牛鞭效应并且可以研究如何有效减少这一影响;另一个方向是将 CRL 应用到供应链的其他问题中,例如交易竞争。

## 4.2 异质供应链( $S, s$ )随机库存控制系统研究<sup>①</sup>

### 4.2.1 引言

库存问题是企业关注的一个重点,相应的库存策略成为学界和产业界关注的一个重要领域。在上一节中我们讨论了在面临动态顾客需求的情况下,满足目标水平的动态库存管理问题。在实际的供应链环境中,企业通常会置身于不同的供应链模式中,而针对不同的供应链模式,企业应如何采用有效的库存策略以达到自身利益的最大化?在这一节中我们将重点讨论这一问题。

在中国目前的产业技术水平下,供应商之间的竞争方式大体相同,主要体现在价格和提前期上,这就意味着零售商在更换供应商时仅仅需要付出很低的代价,在这个前提下零售商可能会快速地更换供应商,此时零售商库存系统中的采购提前期也可能会随之改变。此外,零售商还可能同时与多家供应商合作。在这种情况下,采用传统库存控制策略( $S, s$ )可能无法计算出  $s$ (安全库存量)的值,因为零售商无法提前确定他的供应商,从而导致采购提前期也是无法确定的。这需要考虑一个零售商对多家供应商的两阶段供应链模型。我们都知道( $Q, s$ ),( $S, s$ ),( $R, S, s$ )都有一个相似的参数  $s$ ,本文中的模型假定零售商都采用( $S, s$ )库存策略,提出了四种类型的供应商组合方式和两种零售商竞价机制。由于供应链的不确定性,我们采用多代理技术进行研究。目前多代理技术已被用于研究库存管理等相关领域,如降低牛鞭效应(Zarandi et al., 2007)和安全库存水平(Schwartz et al., 2006)等。这些工作对我们的研究都很有帮助。

### 4.2.2 研究现状

本节主要研究了随机库存策略、竞争策略和竞价机制等方面内容。

<sup>①</sup> 已经取得 IEEE 授权。

随机库存控制策略研究方面已有很多成果, Lee 和 Hong(2003)分析了多层次需求和成本缺失条件下的(S, s)随机生产系统控制, 大量的实验表明由于系统参数的不同, 库存定量补给策略可明显地降低平均运营成本。Johansen(2001)在满足所有需求的条件下, 计算最优的(S-1, s)策略, 并且建立了 Markov 决策模型求解最优的补货策略。Lee 和 Schwarz(2007)从代理的角度设计和实现了连续检查库存的(Q, r)随机策略, 认为代理的作用影响了补货的提前期。

近来也有研究者对不同供应链模型中的最优策略进行了研究。Fox 等(2006)分析了一种决策者可从两家供应商中任选一家的定期检查库存模型。Corbett(2001)提出寄售存储的方法, 可以通过向供应商提供附加的奖励来减少批量规模, 进而减少库存。此外, 作者还对不同信息和渠道中的零售商情况进行了介绍。

本节另外一个重要方面是竞争策略及竞价机制。Shay 等(1999)提供了一个深入竞争策略分析的研究视角, 并且提出一个整合了当前竞争环境动态特征的模型。这些研究大多数都是基于数理方法并得出了一些行之有效的结论(Ghose et al., 2005)。

与本节相似的是, 许多研究者在此领域应用了多代理的方法。Gregg 等(2006)设计了一种代理系统, 在此系统中竞价咨询代理机构可以为在线的竞价买家和卖家提供当前的信息和有关方面的推荐信息。Kim(2007)采用代理技术建立了最优结构的仿真模型, 该模型可以估计拍卖参数对于结果的影响。为了寻找一个最优的组合, Avenali 和 Bassanini(2007)提出并研究了组合竞拍的相关问题。

综合前人的研究, 文中讨论了四种类型的两阶段供应链的竞争策略。其中包括多个供应商参与的价格、提前期策略等。

### 4.2.3 模型及其参数设定

#### 1. 原型系统

本节主要关注不同的供应链库存策略, 假设所有的供应商拥有相同的产品, 通过产品价格和提前期策略与其他供应商竞争。如此一来, 可以形成以下四种不同的供应链情景(不同供应商的组合和竞价机制):

- (1) 所有的供应商有不同的提前期和价格, 只有一个供应商能竞价获胜;
- (2) 所有的供应商有不同的提前期和价格, 有多个供应商可以竞价成功;
- (3) 所有供应商的价格都不相同, 其中两两组合成为一对, 每对拥有相同的提前期, 但是只有一个供应商竞价获胜;
- (4) 所有供应商的价格都不相同, 其中两两组合成为一对, 每对拥有相同的提前期, 但可以有一个或多个供应商竞价成功, 分享销售商带来的利润。

以上所述的四种供应链可以描述如下:S3(针对第一种情况),M3(针对第二种情况),S6(针对第三种情况),M6(针对第四种情况)。假设有 $lt1$ 、 $lt2$ 、 $lt3$ 三种提前期,并且 $lt1 < lt2 < lt3$ 。其中S3表明供应链中有一个零售商和三个供应商,供应商拥有三个不同的提前期 $lt1$ 、 $lt2$ 、 $lt3$ 。在S3模型中只有一个供应商可以获得来自零售商的采购订单。M3和S3的不同之处在于供应商的竞价获胜人数不定,也就是说可能有一个或多个供应商分享销售商的订单。和S3、M3不同,S6和M6有三组供应商,对应于三个不同的提前期,在S6模型中只有一个供应商可以竞价成功,而在M6模型中可以有多个供应商获得成功。

## 2. 基于代理的模型设计

文中的整个实验系统框架是基于多代理系统设计的。这个框架包括三个组件:Monitor agent(监控代理)、Supplier agent(供应商代理)和Retailer agent(零售商代理)。在这个系统中,Monitor代理为整个供应链提供各种各样的支持服务;在相应规则下,Supplier代理在每个购买时期自动出价;Retailer代理用来辨别哪些供应商竞价成功。这些代理的详细功能可以描述如下。

### (1) 监控代理

在实验之前,监控代理先初始化整个系统。假定需求 $D$ 服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ ,监控代理首先确定需求的大小和偏差;同时控制一些其他信息,如每个供应商的最低利润和目标利润、 $lt1$ 、 $lt2$ 、 $lt3$ 和零售商的销售价格。

在实验系统中,零售商利用(S, s)策略控制库存,在传统的模型中,S表示最大库存量,并且

$$s = \bar{Dt} + k\sigma_{Dt} \quad (4.3)$$

其中, $t$ 为提前期, $k$ 代表安全系数, $\sigma_{Dt}$ 表示 $t$ 天总需求量的方差,由于零售商可以通过更换其他的供应商来提高利润,因此在我们的研究中,公式(4.3)不能用来计算s。文中讨论的实验是随着s的降低进行的,通过对实验结果的分析寻求四种供应链模型中库存系统的规则。

### (2) 供应商代理

所有供应商有相同的规则,这也正是我们实验的基础。

规则1:如果供应商在上个订货期中竞价成功,他将提高这一时期的竞价;

规则2:如果供应商在上个订货期中竞价失败,他将在这一时期降低他的竞价;

规则3:所有竞价必须在供应商的最小利润和目标利润之间波动。

### (3) 零售商代理

针对零售商代理,我们提出了两种竞价机制:单获胜者机制(只有一个供应

商中标)和多获胜者机制(一个或多个供应商中标)。在单获胜者机制中,零售商代理主要有三个基本规则。

规则 1:如果所有供应商竞价相同,那么提前期最短的供应商将竞标成功;

规则 2:如果一些供应商有相同的提前期,那么价格最低的供应商将竞价成功;

规则 3:如果没有供应商满足要求,提前期最短的供应商将竞标成功。

如果采用了多获胜者机制,对于零售商代理有三条规则如下:

规则 1:如果供应商竞价相同,那么提前期最短的供应商将竞标成功;

规则 2:如果所有的供应商都能按时的满足需求,价格最低的供应商获胜;

规则 3:图 4.13 反映了多供应商竞价的流程。图中, $f(x)$ 表示库存量函数,如果  $f(x) = \text{true}$ , 代表零售商不会缺货,  $x$  是供应商的提前期。S( $x$ )代表提前期为  $x$  的供应商,  $\text{minprice}(y)$  表示  $y$  供应商的最低竞价。

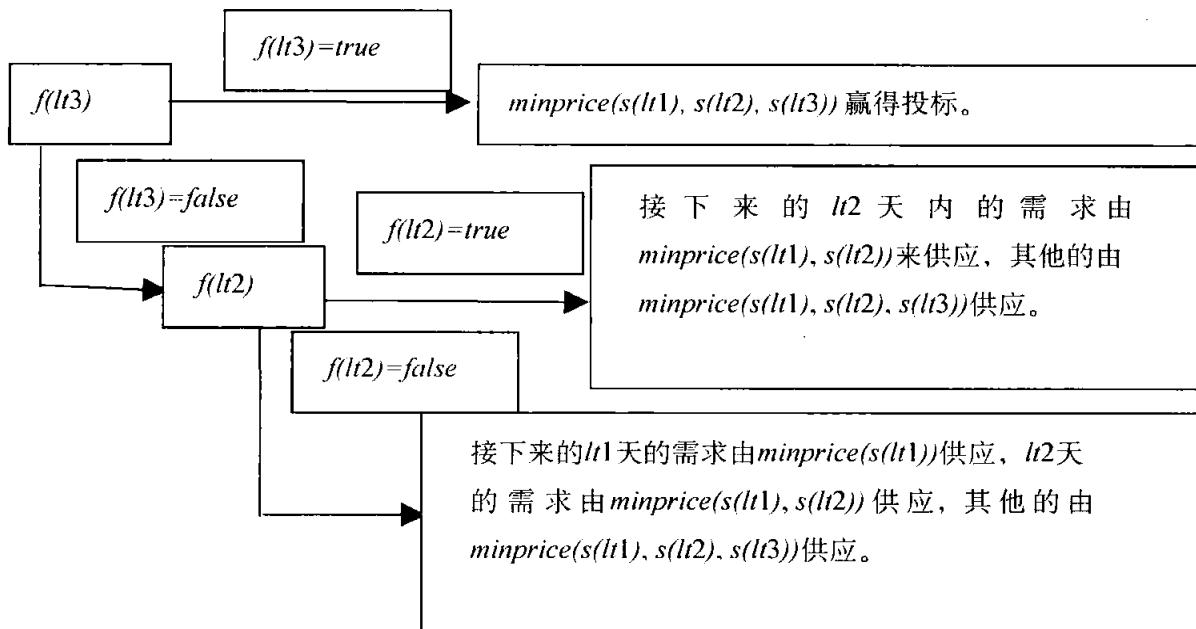


图 4.13 多中标者拍卖机制的第三条规则

### 3. 实验设置

对应四种供应商模型,本文设计了四个实验,在每一个实验中, $D$  服从  $N(3543, 354^2)$  的分布,  $lt1 = 1$ 、 $lt2 = 2$ 、 $lt3 = 3$ 。在提前期不同的情况下,供应商的成本分别为  $215(lt1)$ 、 $210(lt2)$ 、 $205(lt3)$ 。所有供应商的竞价在他们成本的 108% 到 120% 之间波动,固定竞价增量为 2%。对零售商而言,销售价格为 300,库存成本为 5,S 取 60000。四个实验分别进行了 10000 次仿真实验,下面图形中的所有数字都是 10000 次的平均数值。

#### 4.2.4 结果分析

##### 1. 零售商变化趋势

本小节内容阐述了零售商在不同的模型( $S_3$ 、 $M_3$ 、 $S_6$ 、 $M_6$ )中的仿真结果,下图反映了随着  $s$  的减小,零售商的日平均库存量、采购价格和平均库存的变化趋势。

从图 4.14 可以看出在  $S_3$  和  $S_6$  的情况下,零售商参数有着类似的变化趋

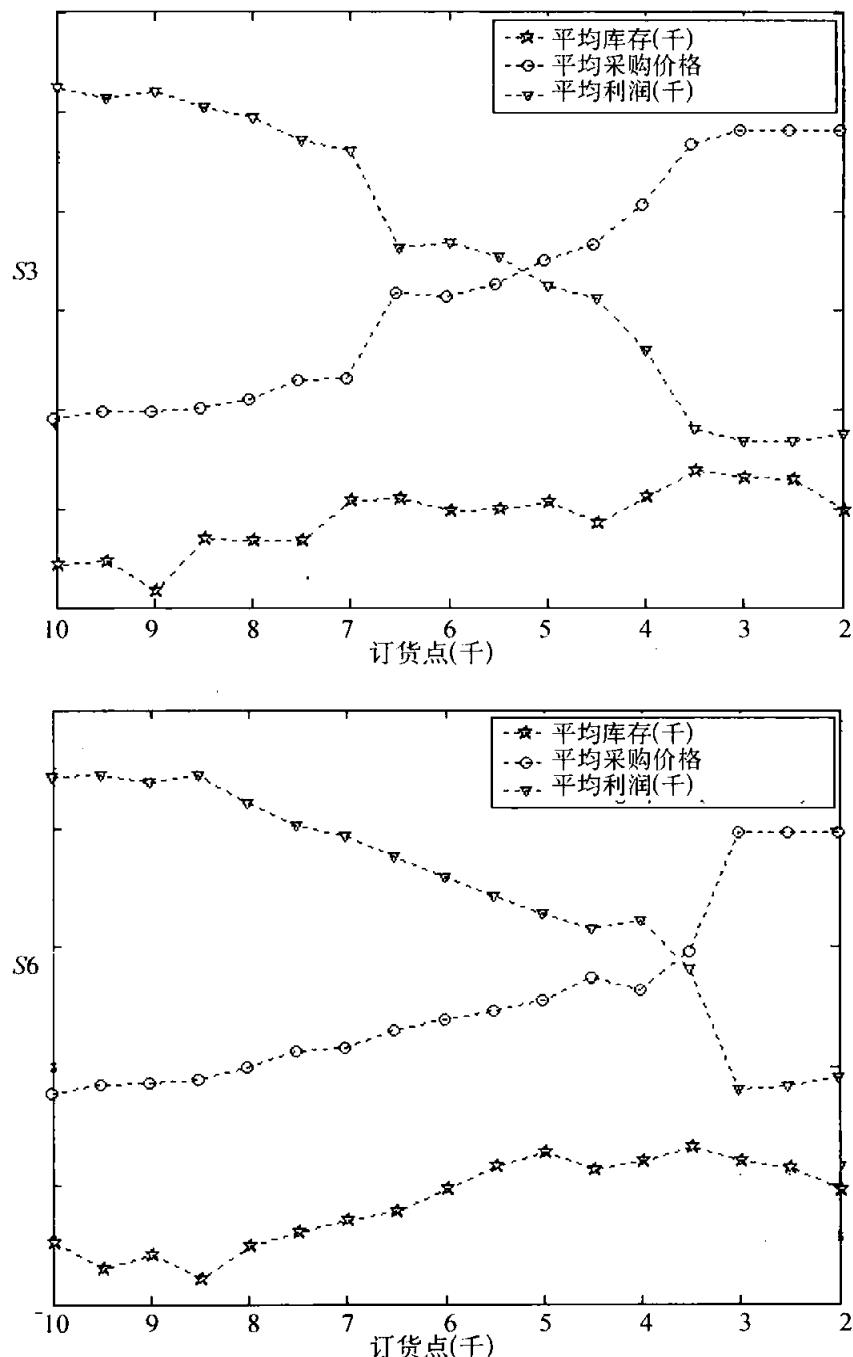


图 4.14 在  $S_3$  和  $S_6$  情况下零售商的采购价格、平均库存和平均利润

势。随着  $s$  的下降,零售商的库存先增加后减少。原因是随着  $s$  的下降,零售商会选择提前期较长的供应商更换为提前期较短的供应商。特别当  $s$  较小时,只有提前期最短的供应商才能够中标。在这两个图中,采购价格会因提前期的竞争而持续上升。在这两种情况下,较大的  $s$  有利于提高零售商的利润,由此可得到如下命题。

结论 1:在  $S3$  或  $S6$  的模型中,如果零售商降低他的  $s$ ,那么他的平均库存存

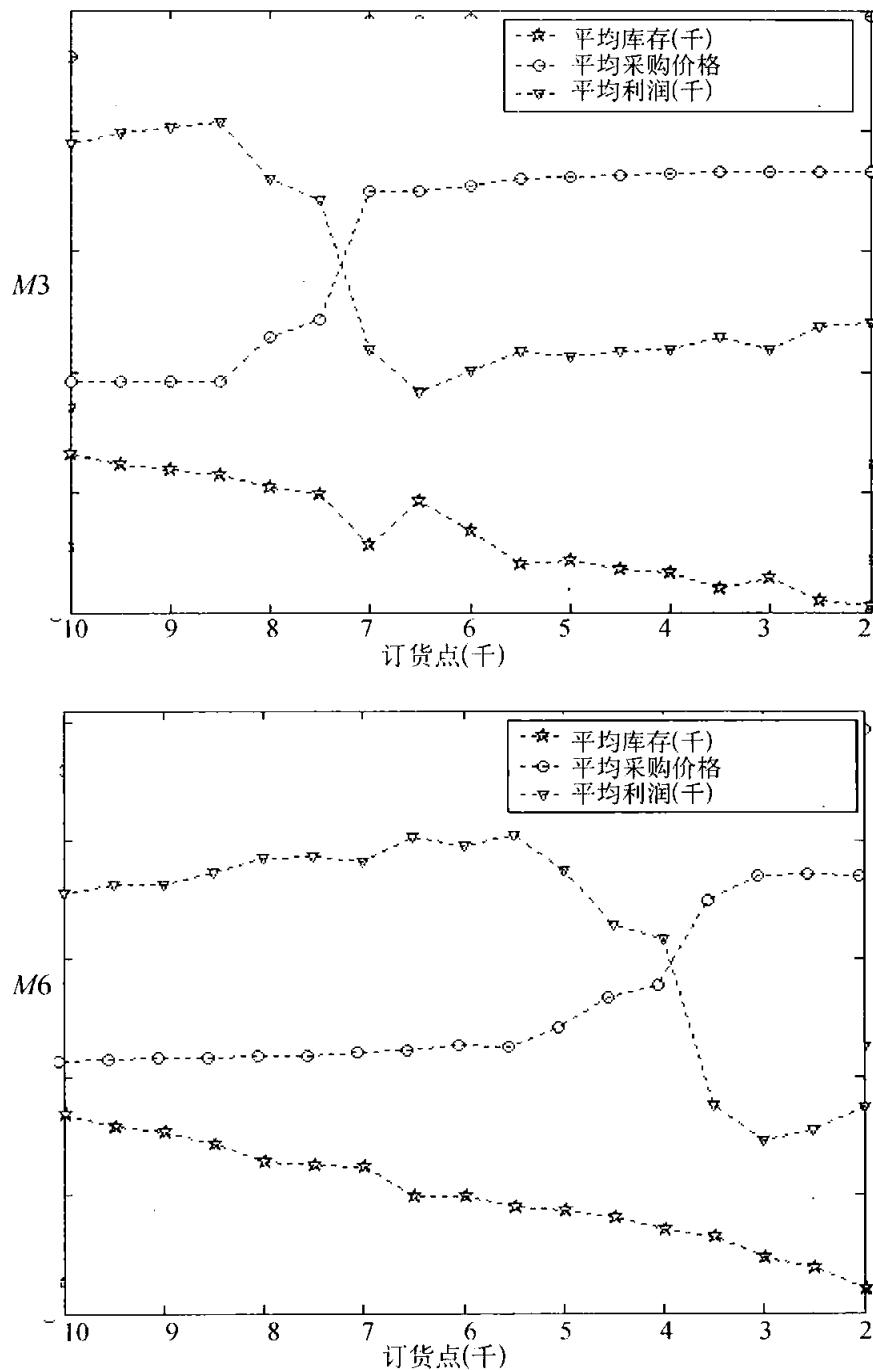


图 4.15 在  $M3$  和  $M6$  情况下零售商的采购价格、平均库存和平均利润

开始阶段增加,最后阶段减少,中间过程出现一些波动。随着  $s$  的下降,零售商将他的供应商由价格最低换成提前期最短。零售商的最大利润出现在开始阶段。

图 4.15 显示的是在  $M_3$  和  $M_6$  情况下零售商的采购价格、平均库存和平均利润的变化趋势。和图 4.14 相反,零售商的平均库存随着  $s$  的下降而降低。导致这一现象的原因是在这种情况下,零售商可以和更多的供应商合作。根据提前期和剩余库存,多个供应商可以获利,由此可以得出命题 2。

结论 2:在  $S_3$  或  $S_6$  的模型中,如果零售商降低  $s$ ,则此过程中的平均库存将会减少。随着  $s$  的降低,零售商将他的供应商由价格最低换成了同时满足价格最低和提前期最短的供应商。零售商的最大利润出现在开始阶段。

## 2. 对比分析

这一部分对  $S_3$ 、 $S_6$ 、 $M_3$ 、 $M_6$  模型下零售商的订货价格、平均库存和利润的实验结果进行了对比,图 4.16 反映了不同模型下的零售商采购价格和平均库存。

从该图中可以看出所有的采购价格都随着  $s$  的下降而上升。由于相同供应商之间的竞争, $S_6$  和  $M_6$  模型中的采购价格要低于其他模型。假设  $P_{M_3}$  代表  $M_3$  模型中的采购价格, $P_{M_6}$  代表  $M_6$  模型中的采购价格, $P_{S_3}$  代表  $S_3$  模型中的采购价格, $P_{S_6}$  代表  $S_6$  模型中的采购价格。可以得出,在这些曲线大部分区域内  $P_{M_3} > P_{S_3} > P_{S_6} > P_{M_6}$ 。这意味着如果零售商没有相同的供应商,一人获胜制将会优于多人获胜制(对零售商而言)。如果零售商有相同的供应商,多人获胜制将会优于一人获胜制。

图 4.16 反映了零售商平均库存随  $s$  降低的变化情况。可以发现, $M_6$  和  $M_3$  模型下的平均库存要低于  $S_6$  和  $S_3$  模型下的平均库存。这表示多人获胜制有利于降低零售商的平均库存,还可以看出, $M_6$  模型中的零售商平均库存与其他相比是最低的。从这些分析中,我们可以得出命题 3。

结论 3:相同的供应商有利于降低零售商的采购价格,在此情况下单人获胜制的采购价格要低于多人获胜制的采购价格。不管是否具有相同的供应商,多人获胜制都有利于降低零售商的平均库存。如果零售商拥有相同的供应商,则采用多人获胜制可以实现更低的库存水平。

图 4.17 反映了不同模型中的零售商利润。在这些曲线中,大部分情况下的  $M_6$  和  $S_6$  模型的利润要高于其他模型,这表明有多个相同供应商对零售商是有利的。在曲线的最后部分, $S_3$  和  $S_6$  模型的利润快速下降,这说明当  $s$  很小的时候,一人获胜制是不利于零售商。当然, $M_6$  模型下的利润总是高于其他情况的,这也为供应链管理提供了参考方向。

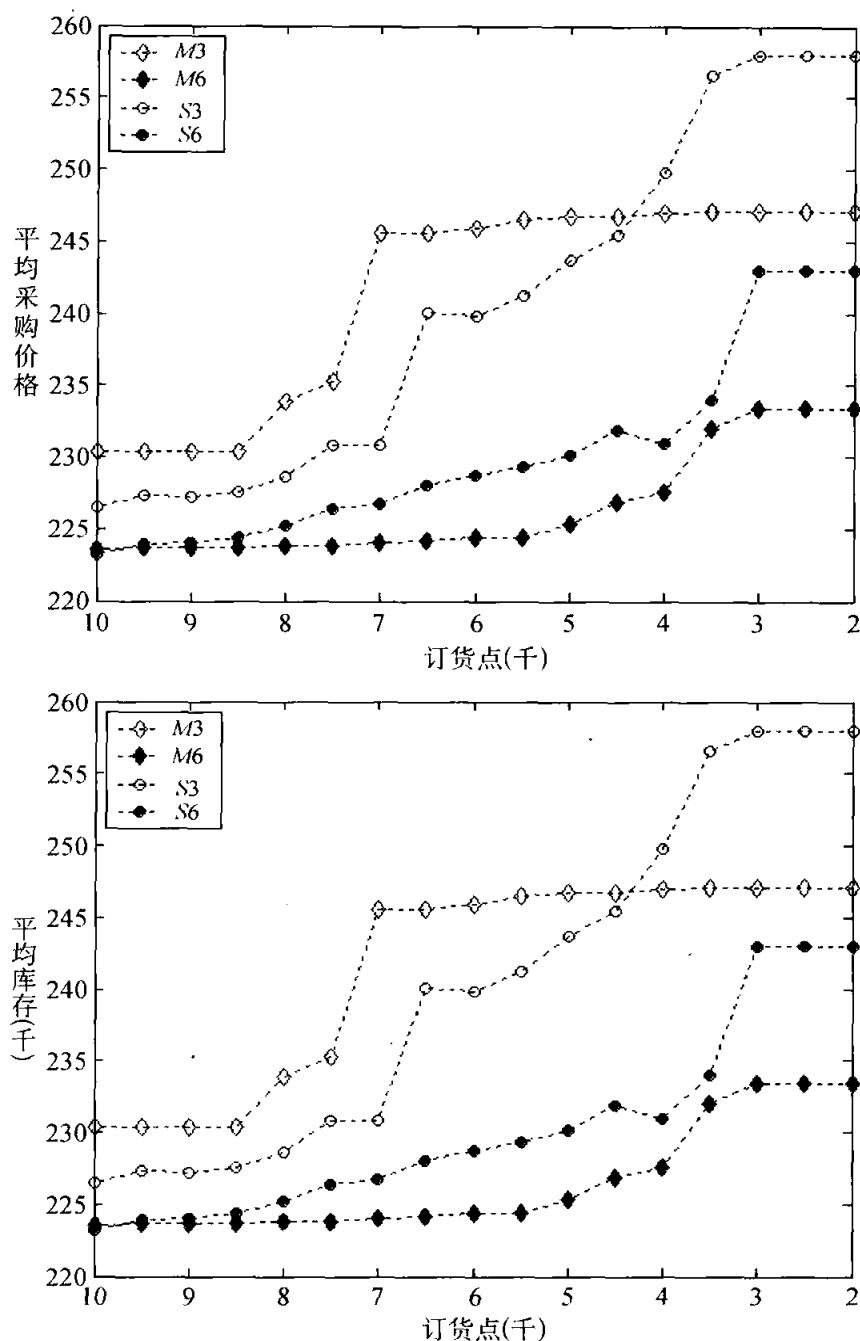


图 4.16 不同情况下零售商的采购价格和平均库存

结论 4: 拥有相同的供应商有利于提高零售商的平均利润, 所有模型中, 零售商的利润都是随  $s$  的减少而下降的。对零售商而言,  $M6$  是最佳的供应链结构。

#### 4.2.5 结论

本节采用  $(S, s)$  作为零售商的库存控制策略, 在假设供应商可以低成本快

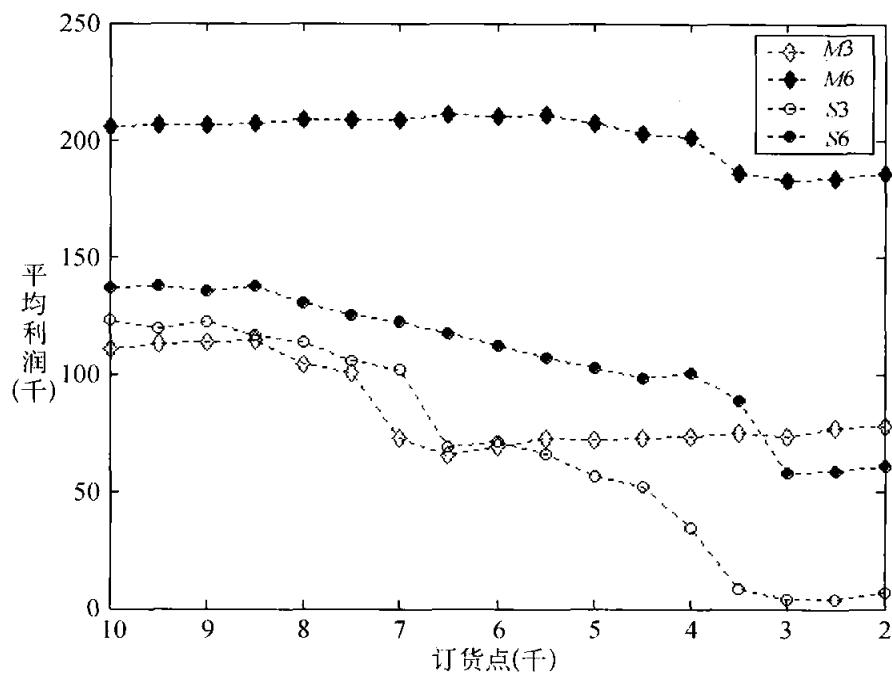


图 4.17 不同情况下零售商的平均利润

速更换的前提下,研究零售商库存控制策略问题。本研究采用计算实验的方法,运用多代理建模技术,设计了四种不同的供应链模型  $S_3$ 、 $M_3$ 、 $S_6$ 、 $M_6$  来模拟企业的环境。在这些模型中,研究引入了具有相同产品的供应商之间的竞争和一人获胜与多人获胜两种竞价机制。从实验结果可以得出四种合理的结论,这些结论建议供应商如果想获取最大利润,应该在不同的供应链模型下采取不同的供应链管理策略。由于在不同的供应链模型中的最优  $s$  是不一样的,因此研究的结论有利于在不同供应链模式下进行合理的库存管理。

## 第5章

# 基于不确定信息的供应链 协调及其计算实现

## 5.1 引言

供应链之间的协调通常都是参与者通过不断的谈判取得并确定的。在实际的谈判过程中谈判的各方往往面对的是不确定性的信息,如何利用这些不确定性信息确定谈判中的价格策略是各方关注的重点,本章以中国的服装业为研究背景,探讨不确定信息下的供应链协调策略问题。

本章研究的对象是多家企业投标、生产和采购活动的协调。不同于其他行业的是,中国的外贸服装业受到特殊的限制,外贸公司甚至在没有订单的情况下都会与服装厂保持联系。当外贸公司发现一个新的投标机会时,其款式设计首先由外国顾客提出,然后外贸公司必须估计这个设计成本并第一次向服装厂报价,服装厂自行计算此设计成本并给原料供应商一个合理的购买价格,当所有节点公司与其他公司达成一致后,外贸公司用最终购买价计算最终投标价。在这类供应链中,由于款式设计不同,每个订单的成本也有差异。在外贸公司参加国外客户订单投标前,所有节点公司必须在特定价格下达成一致。当然,由于存在商业竞争,没人知道这个设计下产品的真实成本,所有这些公司的成本必须由其他人估算出来,在这种情况下,外贸公司很难确定最优的购买和投标价格。本节则重点研究了该类公司的最优购买和投标价格。

在一个新的服装设计款式被提出时,所有节点的真实成本都是商业秘密,在这种情况下,节点公司缺少制定最优决策的信息。本节的专家系统则能解决不

完整信息下的不确定性推理,为了合理化这些不确定性信息,定义了确定性因子来描述事实和规则的可信度,这个专家系统被称为不确定性专家系统。由于缺少成本信息,这类服装供应链不能用数学方法模拟,而多代理模型则能解决那些很难甚至不能用单代理或单个系统解决的问题。文中提出了不确定性多代理模型来研究外贸公司的最优定价策略,为了提高代理的推理能力,首次提出将不确定性专家系统与多代理系统相结合的方法,并基于 Swarm 开发了一个实验系统。通过系统整合,得到外贸公司的最优定价策略。

## 5.2 相关研究现状

供应链学者们为解决供应链协调问题已经提出很多包括优化、仿真和基于多代理的研究方法。大多数研究者提出的都是基于特定假设的识别最优方案的方法,这些方法主要集中在特定问题上,例如库存管理、物流优化、生产安排等(Swaminathan et al., 1998)。

为解决离散时间下受随机需求影响的供应链优化控制问题,Bertsimas(2006)提出了一个基于稳健最优设计的基本方法。较多的文献提出了基于销售策略的方法,例如虚拟店面综合库存,高模块化供应商组件和售后服务策略,这些方法使用于销售渠道、销售时间、销售价格等供应链协调方面的研究(Hoetker et al., 2007);Aviv(2007)和Chen等(2006)通过计算机模拟仿真的方法研究订单分配和共同预测能使供应链利润最大化。

上述大多数成果是基于数学分析的,而且假定供应链环境是确定性的。最近,学者们开始重点研究用基于多代理的方法解决供应链协调问题(Swaminathan et al., 1998)。基于代理系统的软件被认为是解决复杂自然问题的有效工具。由于它们是在分布式结构体系下自主构建的,一般情况下明显优于独立工作的单代理。

Jennings 等(1998)对代理的定义是,代理是一个电脑系统,在某些条件下为达到目标能自主行动。Lau 等(2002a, 2002b)开发了一个多代理仿真模型,以研究不同层次的代理合作和供应链伙伴间信息共享的各种指标,其框架包含 6 种代理类型:消费者、零售商、经销商、制造商、供应商和运输商。Janssen(2005)提出半合作框架和基于多代理的方法来评价收益,他认为多代理能增加供应链的灵活性,并能使供应链成员的反应更加敏捷。Mangina 和 Vlachos(2005)以啤酒供应网络为模型来说明产品能通过销售网络获取信息实现自我调节。优化代理可以帮助解决饮料供应中的具体问题:降低库存、减少牛鞭效应、改善沟通环境并使供应链协调中无

不良分担风险。此外,它们也获得在运营中购买和销售的能力。Arunachalam 和 Sadeh(2005)讨论如何获取继承供应链环境的复杂性、随机性和竞争性。Labarthe 等(2007)为这样的供应链模型和仿真提出一个代理模型框架来促进管理。

Tah(2005)提出了一个原型系统,它被用来寻找使用这种方法建模和仿真模拟协作项目的供应网络预测计划的潜力。Zarandi 等(2007)开发出一个基于代理的系统来最小化成本并减少供应链上的牛鞭效应,该系统能给出合理的竞标规则。Kwon 等(2007)提出一个基于多代理合作和案例推理的综合框架,该框架能解决供应链中的各种协调问题。Chatfield 等(2007)结合形式仿真提出了一个概念框架,该框架允许当用一个过程导向方法代表订单时,让一个代理代表供应链基础设施,这种框架考虑到不同供应链结构和子系统自然、真实的代表,并能在总体观点上达成一致。Liang 和 Huang(2006)开发出一个模拟供应链的多代理系统,在此系统中代理操作代表不同库存系统的实体,通过信息共享和预测知识,由代理协调控制库存并最小化供应链总成本。用遗传算法预测需求,而订购数量则由每个梯形一体化立场的“系统思维”提供。在 Mele 和 Guillen(2007)的研究中,长时间影响供应链的生产/销售网络的设计和改造决策也被考虑在内。改造任务通过运用供应链定向代理仿真系统实现,该仿真模型中将每个实体看作供应链中一个独立的代理。Jiao 等(2006)运用多代理系统演示全球生产供应链网络的协调。Lin 和 Lin(2006)增加了多代理协商机制,以更多的利用现有的方法来解决分布式约束满足问题,然后通过对金属工业中订单交付过程的实验来综合评价系统的性能。Monteiro 等(2007)在多点系统中试验并提出一种新的决策方法,用这种新方法管理公司网络变得更简单,就像管理网络中的一个小公司一样。文中考虑了一个多级服装供应链,通过成千上万次的实验,可以找到针对外贸公司的最优或接近最优的定价策略。

### 5.3 简单的供应链背景:出口羽绒服供应链

本部分提出了一个羽绒服生产系统来解决具有多个节点的供应链内部问题。这个供应链的信息来自一家名叫 DOGO TRADE 的外贸公司,这个公司在中国有 4 个羽绒服供应商。最近 5 年,该公司每年接到 8 张设计样式不同的订单(每张大约十万件羽绒服),当出现一个新的国外客户设计要求时,DOGO 必须找到合适的羽绒服供应商来协调制定最优价格。由于成本信息的不完整性,这类问题不能用数学方法模拟。因为对每个羽绒服供应商来说实验是相同的,文中只选取一家运行实验系统。该供应链由简称为 DP 的绒毛厂,FCP 的布料

厂,FRP 的扣件厂,DCP 的羽绒服厂和 FTC 的外贸公司所组成。

DP 供应纯绒毛,FCP 提供布料,FRP 供应各种扣件,DCP 是羽绒服生产商,FTC 是一家特定的外贸公司。供应链中的公司可以概述为图 5.1。在研究的后半部分,公司网络包括 5 个被考虑的节点公司(图 5.1 虚线框中)组成。

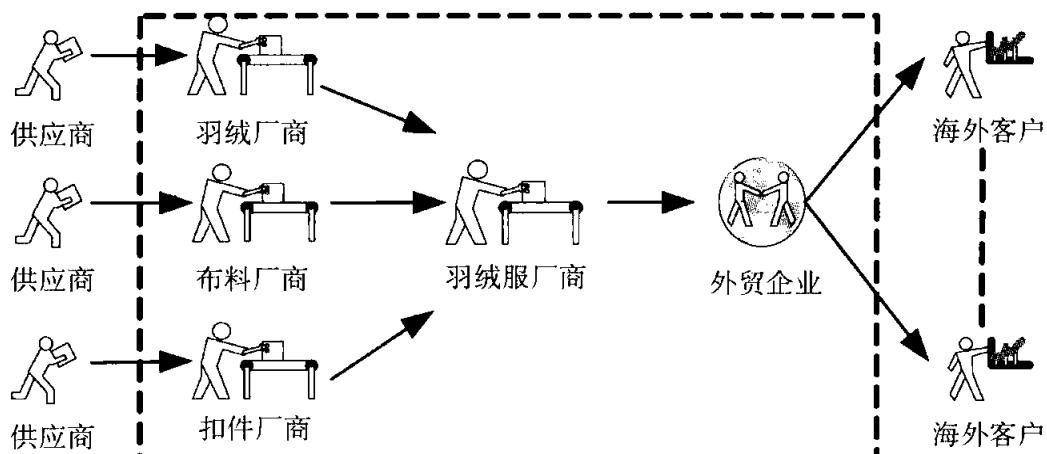


图 5.1 外贸羽绒服供应链结构

## 5.4 代理模型

前文供应链被模拟成一个基于多代理协同和不确定性专家系统的集成系统。该系统中,代理们可以根据协商谈判来建立一个最优策略。该集成系统的框架可以用图 5.2 表示。在图中,ES 表示在第一部分中提到的不确定性专家系统,根据

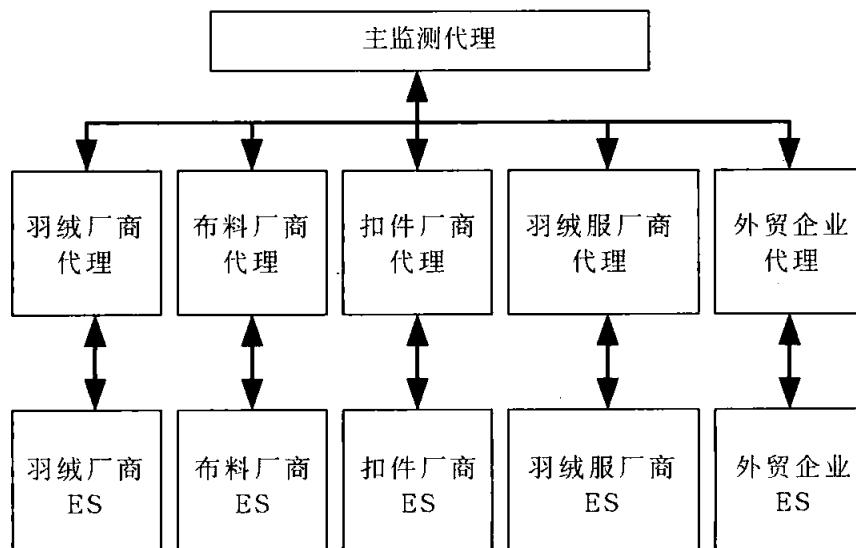


图 5.2 一体化的虚拟供应链框架

这个系统,其他节点公司的不确定性成本就可以被用来实现标价或采购价格的最优化。针对供应链中的各种不同情况,每一个代理的专家系统都有不同的规则和现状。为了能更好地解释这个问题,文中为每个代理设计了1个专家系统。

如果外贸公司发现了一个新的投标机会的话,除了监控代理外的所有代理,都将和其他的代理协商。如果所有的代理能在一个投标价格下协同,那么监控代理就终止所有的代理并公布结果。这里的协同是指根据他们产品的销售价格和采购价格,各节点公司同意按订单生产,如果不能达成一致,监控代理会将此事公布。在协商的过程中,每一个代理都会运用各自的专家系统支持自己的决策。对于用代理来模拟现实中公司的运行方式,该专家系统是很有用处的。当然,由于羽绒服是一个特殊的产业,它在签订合同之前是不生产的,所以库存成本在这个集成系统中就不作考虑。

#### 5.4.1 零售商代理

在这个系统中,对外贸易公司是零售商代理模拟的,零售商必须考虑以下3个问题:

1. 需要预定多少集装箱? 是否需要与其他产品搭配?
2. 第一次应如何向羽绒服生产商报价?
3. 如何与羽绒服生产商进行协商?

文中,对外贸易公司的运输成本并不是最终成本。假设零售商有3种选择:20尺柜、40尺柜或与其他产品搭配,当订单数量决定之后,零售商根据运输调度计算运输成本。以下是运输调度的两个基本规则。

规则1:如果单个集装箱可以承载得下,零售商就选择平均成本最小的集装箱。

规则2:如果单个集装箱不能承载,零售商就选择运输成本最小的集装箱。

在每一个阶段,零售商代理成本都被认为是最终成本。零售商的成本可以用以下式子来计算:运输成本+订单数量\*(管理成本+采购价格),这里运输成本指运输所需的成本,订单数量指在该订单中羽绒服的数量,管理成本指在管理中所需的成本,采购价格指零售商为生产羽绒服所需支付的原材料采购价格。

不确定性专家系统首先被用来确定羽绒服的采购价格。在决定采购价格之前,零售商代理就会推测羽绒服公司的成本和目标利润,所有信息都按确定性因子定义。例如,如果DCP的成本是100,它的确定性因子是0.8;目标利润是10%,它的确定性因子为0.7;规则的确定性因子( $H/E$ )是0.9,然后第一次的投标价是110,它的确定性因子为0.63。轮盘赌机制适用于按确定性因子选择价格。

协商机制是一种为零售商设立的机制,零售商根据该机制和羽绒服公司协商。

图 5.3 说明了零售商协商机制的有限态,图中无法协调的情况表明一些代理拒绝其他所有的竞标价格,以至于此供应链在这个价格下,羽绒服将无法投入生产。

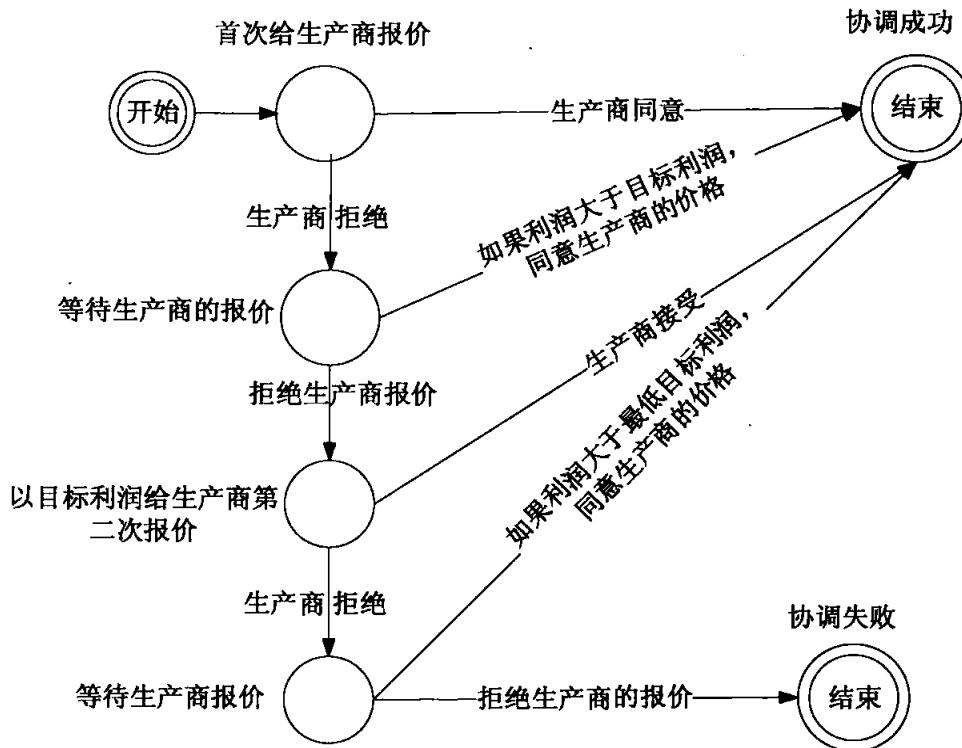


图 5.3 外贸公司的谈判有限状态机

#### 5.4.2 生产代理

羽绒服工厂是由系统中最复杂的生产商代理模拟的。生产商必须考虑以下 5 个问题：

1. 需要预定多少辆、什么类型的卡车？
2. 计算羽绒服厂的生产成本。
3. 如何决定向供应商提出采购价格？
4. 如何和所有供应商协商？
5. 如何和零售商协商？

对于生产者,首要问题是需要用到多少辆卡车。在现实中,不同的卡车有不同的负载和费用,所以生产商必须选择最好的卡车运输计划,使得它能最大程度地满足订单数量。形成卡车调度的规则和零售商运输调度的规则相似。

在该系统中,生产成本由生产商代理计算。如果需求超出了羽绒服工厂的生产能力,生产成本将不会改变;否则,生产商就会以更高的成本以超额完成生产,这就意味着产品的生产成本是依赖于需求的。羽绒服工厂的生产成本可以

用下面的规则来计算：

羽绒服工厂成本 = 运输成本 +  $\min\{\text{订单数量}, \text{生产能力}\} * \text{正常生产成本}$   
 $+ \max\{\text{订单数量} - \text{生产能力}, 0\} * \text{超额生产成本} + \text{订单数量} * \text{采购价格}$ 。

这里，羽绒服工厂成本指所有的工厂成本；运输成本指运输所需的成本；订单数量指订单的需求；生产能力指生产产品的能力；正常生产成本指需求小于生产能力时的生产成本；反常生产成本指需求超过生产能力的生产成本；采购价格指原材料的采购价格； $\min\{\text{订单数量}, \text{生产能力}\}$ 指订单数量和生产能力中的最小值； $\max\{\text{订单数量} - \text{生产能力}, 0\}$ 指 $\{\text{订单数量} - \text{生产能力}\}$ 和 0 中取最大的值。

不确定性专家系统首先将为原材料供应商竞标提供服务。第一个竞标规则和零售商的一样，但生产商的协商机制比零售商的更要复杂：当生产商获得零售商的第一次购买价格，生产商代理开始和所有的供应商协商。众所周知，3 个供应商每次都会有 8 种可能的车间类型。当生产商代理和所有的供应商协同后，就会再次和零售商协商，直到所有的代理协同，更多有关协同的信息都在图 5.4 中表示出来了。和图 5.3 不同的是，在图 5.4 中，有了退出这一术语，这就意味着羽绒服工厂给零售商提出了他们最后的竞标价格并且会出现再次拒绝协商这样一种情形。如果零售商不能接受这个价格，这种类型的羽绒服就不能在这个供应链中以该价格进行生产。

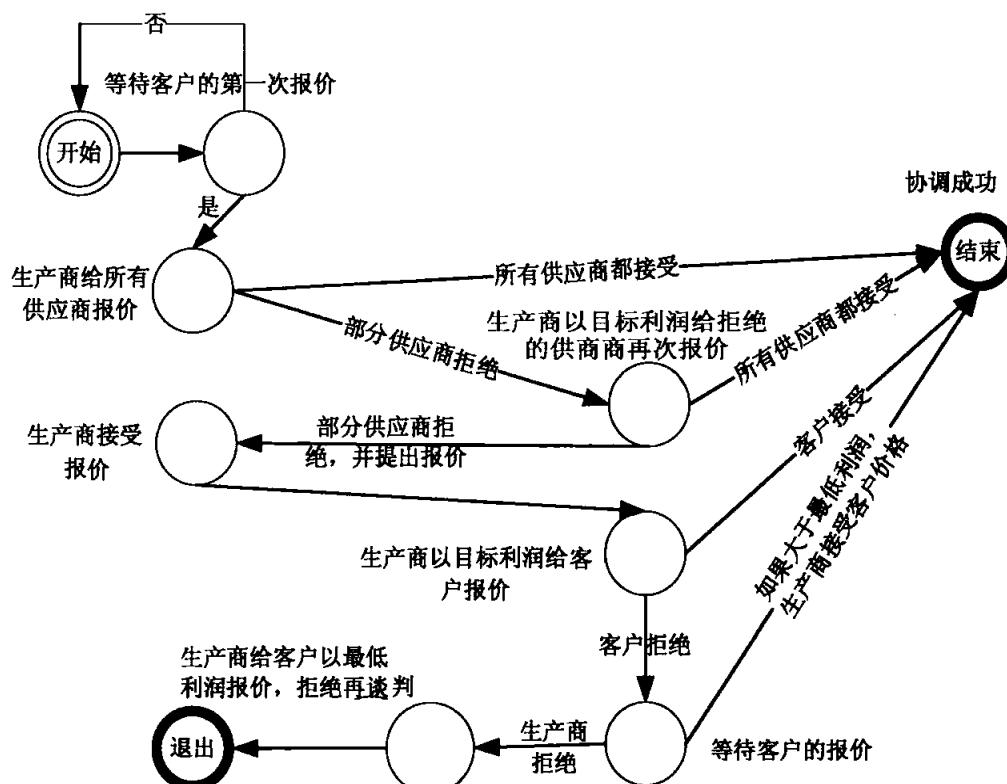


图 5.4 羽绒服生产商的决策有限状态机

### 5.4.3 供应商代理

绒毛供应商、布料供应商和扣件供应商在这个系统中由供应商代理模拟。所有的供应商都有相同的协商机制,它们必须考虑以下3个问题:

1. 需要预定多少辆、什么类型的卡车?
2. 计算供应商的生产成本。
3. 如何同生产商协商?

供应商代理选择最优的卡车运输计划的方法同以上讨论的生产商代理选择卡车运输计划一样。如果需求小于供应商的生产能力,生产成本不变。如果需求超过供应商的生产能力,生产成本将会增加。在图5.5中,各个供应商代理有着一样的协商机制。

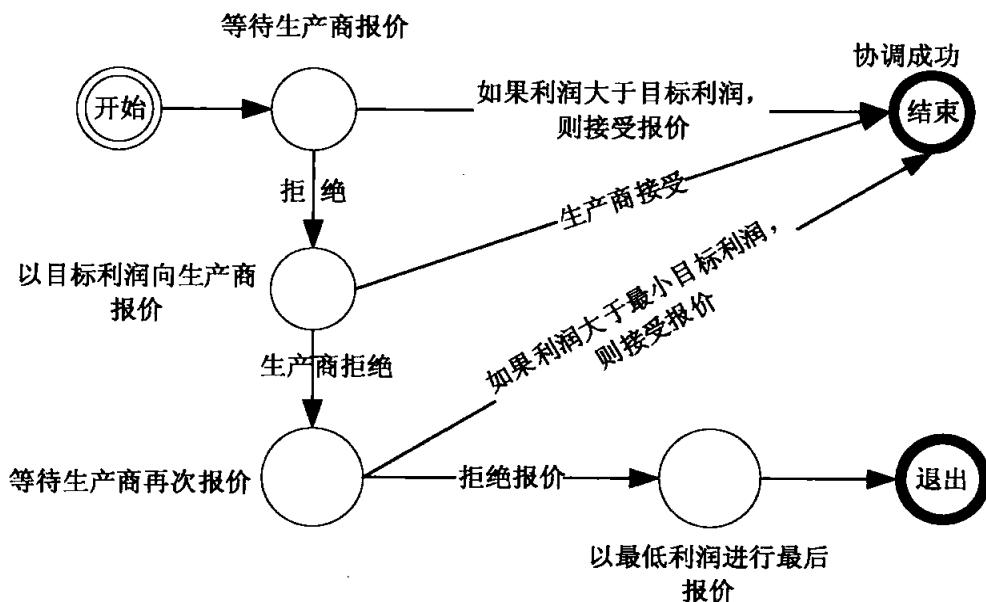


图 5.5 配件供应商的有限状态机

## 5.5 案例研究

### 5.5.1 系统假设

为了较好的运用该系统,文中做出了如下假设:

1. 运输成本

假设所有的原材料供应商的工厂都有3种类型的卡车,详细信息见表5.1。

本文为了保证运输成本的最小化而提出了一些规则,比如,如果订单数量小于10000,卡车1会被用到;如果订单数量超过30000,至少我们会用到一辆卡车3。这些规则可以帮助代理处理各种订单的不同运输成本。这也就意味着需求可能改变运输成本。

**表 5.1 供应商的运输费用**

车辆类型	载荷(原材料/每件)	费率(元/千米)
1	10000	2
2	20000	3
3	30000	4

从DP到DCP的距离是200 km,从FCP到DCP的距离是100 km,从FRP到DCP是300 km。在该案例中,DCP也有3种类型的卡车,在下面的表5.2中列出了更加详细的信息。

**表 5.2 DCP 的运输费用**

DCP的车辆类型	载荷(件)	费率(元/千米)
1	10000	3
2	20000	4
3	30000	5

从DCP到港口的距离是100 km。对于FTC,计划一个集装箱调度是非常重要的。假设FTC有3个可供选择的办法。相关的成本信息如表5.3中所述。

**表 5.3 FTC 的集装箱费用**

FTC的集装箱类型	载荷(件)	费率(元/次)
1	10000	16000
2	20000	31000
3	300	560

## 2. 生产成本

制造成本和工厂的生产能力紧密相联。假设所有车间的最大生产能力为100000件羽绒服,在表5.4中,第二列表示的是当需求小于工厂的生产能力时的生产成本,如果需求大于工厂的最大生产能力,这些超出的产品的生产成本在表格中的第三列中表示。同样,我们假设原材料供应商只有生产成本。

表 5.4 企业的生产成本

	C1(元/件)	C2(元/件)
DP	70	80
FCP	50	60
FRP	20	25
DCP	10	15

对于 FTC, 文中只考虑它的管理成本, 每件羽绒服的管理成本为 2 元。

### 3. 目标利润

目标利润对于企业的决策是至关重要的。在这种情况下, 每个企业都有 2 个目标利润: 最小目标利润和最大目标利润。表 5.5 中列出的是所有企业的最小和最大目标利润。这里目标利润指的是目标投资回报, 这是从净利润中计算而得的。

表 5.5 企业的目标利润

	目标利润(min)	目标利润(max)
DP	2%	8%
FCP	3%	8%
FRP	2%	7%
DCP	3%	9%
FTC	4%	10%

最后是该系统的不确定性分析, 在表 5.6 中, 所有节点公司的成本信息都被评估, 并且每一组成本中的第二个数字是成本的确定性因子。对所有规则, 确定性因子( $H/E$ )是 0.95。

表 5.6 确定性因子

DCP 的 ES	成本	成本	成本	成本	成本	最大目标利润	最大目标利润
DP	64, 0.5	68, 0.6	70, 0.8	72, 0.7	76, 0.7	8, 0.9	7, 0.8
FCP	44, 0.5	48, 0.6	50, 0.8	52, 0.7	56, 0.7	8, 0.9	6, 0.8
FRP	14, 0.5	19, 0.6	20, 0.8	22, 0.7	23, 0.5	7, 0.9	6, 0.8
FTC 的 ES							
DCP	126, 0.5	132, 0.6	150, 0.8	158, 0.7	165, 0.5	9, 0.9	8, 0.8

从上面讨论的确定性因子中, 我们可以得出这样的结论: 每一次这个平台至

少会有 300 种可能的竞标种类。所以,对于每一个 FTC 竞标价格,这个实验都进行 100 次。FTC 的销售价格从 220 直到价格无法协调,当进行了 17000 次实验后,FTC 的销售价格如下图所示。

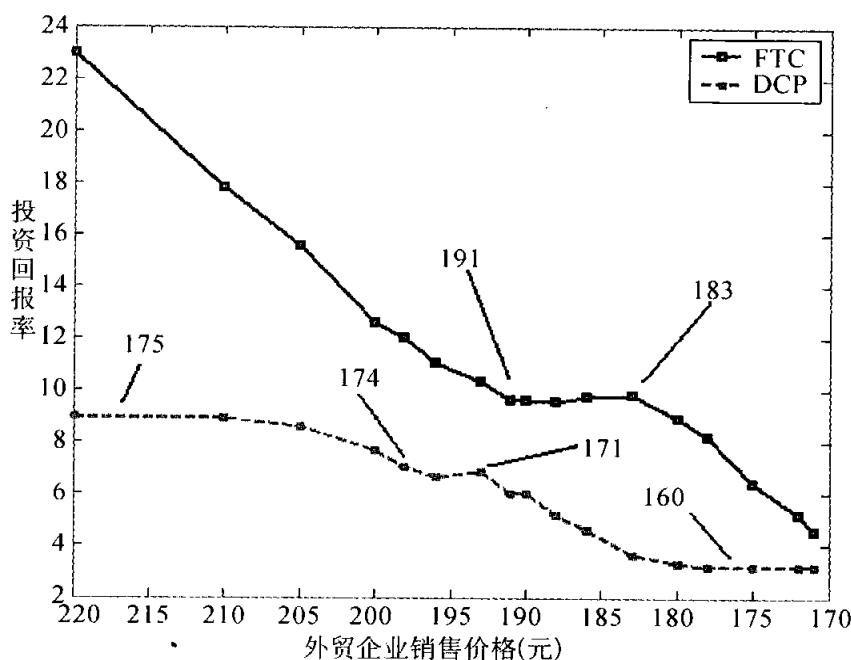


图 5.6 实验结果图

### 5.5.2 企业收入的稳定性分析

通过图 5.6 可以发现随着销售价格的下降,羽绒服生产商的利润曲线具有明显的三段性。第一阶段企业利润保持稳定时,其销售价格为 175。这也就是说,即使终端企业的销售价格较高,弱势企业也不会得到额外的利润,当羽绒服生产商的销售价格为 160 时,该企业的利润达到一个新的稳定阶段。此时,外贸公司的利润出现下降,这意味着强势企业在必要的时候会降低自己的利润以保证供应链中其他企业不会倒闭。因为在文中假设没有企业比 FTC 更加强势,所以销售价格增加时,FTC 的利润会无限增加,在现实生活中,行业利润会对 FTC 产生影响以确保这种情况不会发生。在本节中,DCP 的利润曲线更具有代表性。

通过 FTC 的利润曲线可以看出,当销售价格在 183 和 191 之间变动时,企业的利润会保持稳定;当销售价格处于 171 至 174 之间波动时,DCP 的利润也会保持不变。产生这种情况的原因是:当供应链中某节点企业的利润受到影响时,该企业会压缩比其弱势的其他企业的利润。所以,我们认为每个企业都存在这种利润可以保持稳定的价格区间,文中称之为 SPP。在供应链中企业的抗风

险能力与 SPP 的长度成正比。

通过上图可以发现:DCP 的销售价格最大不超过 175,最小不低于 160。这意味着 FTC 在供应链中会限制其他企业的最大利润,同时会降低自身的利润以保证其他企业不会倒闭。

文中 SPP 的量化描述形式是:

$$\alpha_i = \frac{SPP_{\max}^i - SPP_{\min}^i}{Price_{\max}^i - Price_{\min}^i} \quad (5.1)$$

公式(5.1)中  $\alpha_i$  是代理  $i$  关于的 SPP 指标, $SPP_{\max}^i$  是代理  $i$  出现利润稳定平台时的最大价格,而  $SPP_{\min}^i$  则是相应的最小价格。 $Price_{\max}^i$  是该代理能够取得的最大销售价格,同理, $Price_{\min}^i$  是对应的最小销售价格。

利用公式(5.1)DCP 的 SPP 能够计算为  $\alpha_{DCP} = \frac{174 - 171}{175 - 160} = 0.2$ 。

SPP 能够被用于衡量一个企业的协调能力、抗风险能力等,也可以作为一个管理供应链的重要指标,企业可以使用该指标来衡量其在供应链中的地位。

### 5.5.3 应用分析

SPP 在多个领域具有特定的意义,企业产品的合理采购价格和销售价格之间的关系即可以用 SPP 描述。通过对上述实验结果的推断可以得出如下结论。

**结论 1.** 如果  $SPP_{\min} \leq p_r \leq SPP_{\max}$  ( $p_r$  是销售价格),企业的合理采购价格与其销售价格之间具有一定的函数关系。

传统理论认为产品的采购价格与销售价格之间没有必然的联系,我们认为一定情况下,企业之间的控制行为会导致采购价格与销售价格之间存在一定的函数关系。通过 SPP 可以推断其关系如下:

$$fp_p = \begin{cases} \frac{p_r}{TP + 1} - C, & SPP_{\min} \leq p_r \leq SPP_{\max} \\ p_p, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.2)$$

在该公式中  $p_p$  是采购价格, $p_r$  是销售价格, $TP$  是企业的目标利润, $C$  是生产成本。通过该公式可以得出如下:如果  $p_r > SPP_{\max}$  或  $p_r < SPP_{\min}$ ,采购价格不会受到  $p_r$  的影响。当  $SPP_{\min} \leq p_r \leq SPP_{\max}$  时,商品的合理采购价格将根据以上公式变动。

供应链中企业的控制能力由其产品的质量、市场占有率和产品技术等因素决定。我们将这些能力定义为基本初始能力。而一个企业在协商谈判中的地位可能会随着产品价格的变化而变化。SPP 的另外一个应用是其能动态地决定企

业在谈判过程中的控制能力。我们将影响企业控制能力的价格边界定义如下：

- (1) 如果  $p_r > SPP_{\min}$ , 企业的控制能力与其初始能力相同;
- (2) 如果  $Price_{\min} < p_r < SPP_{\min}$ , 该企业在谈判中会受到其他企业的压制;
- (3) 如果  $p_r = Price_{\min}$ , 该企业在谈判过程中可以压制其他企业。

以上结论意味着在不同的交易价格下需要使用不同的供应链协调策略,如果只按照初始能力构建协调机制可能会导致协商失败。

结论 2. 如果  $p_r > SPP_{\min}$ , 供应链的协调策略与初始情况相同,如果  $Price_{\min} < p_r < SPP_{\min}$ , 该企业在协调过程中应当使用让步策略,在其他情况下应当使用强势策略。

SPP 能够被用于计算企业的合理采购价格与销售价格之间的关系、企业控制能力的转换等方面。通过 SPP 能够构建更为合理的供应链协调策略,这对节点企业和供应链的管理者都有一定的益处。

## 5.6 结论分析

在多代理和不确定性专家系统的基础上,本章研究了可以利用不完全信息的不确定性多代理模型。基于这个功能,代理可以智能化地竞标或者出价。我们可以发现,对外贸易公司的利润有很多拐点,例如当外贸企业的销售价格为 183 和 171 时会引发利润的较大变化,这些拐点是企业竞争的重要决策数据。通过对实验结果的分析发现,对供应链管理来说,SPP 可能是一个比较重要的决策指标,在对实验结果进行推断的基础上,我们也提出了相应的 SPP 计算模型,通过该方法可以扩展 SPP 的应用。

# 基于人工供应链模型的供应风险问题研究

## 6.1 基于计算实验的人工供应链模型构建

供应链网络是一个典型的复杂自适应系统。对这一动态的复杂系统,本节以系统科学的思想为指导,借鉴自然科学、数学、心理学、计算机科学等学科的思想方法,以供应链所在的局部经济系统为研究对象,通过模拟企业决策行为及其相互作用,揭示宏观层面供应链的形成原理、功能结构、演化规律和涌现机理,探索有效的调控和优化管理方法,更好地指导管理实践。

根据这一思想,本节试图对现实供应链进行科学、合理的抽象,利用计算机技术,在计算机中构造一个虚拟的人工供应链系统,使其尽可能逼近现实供应链系统,为研究供应链系统中的多层次间要素相互作用和系统宏观层次的问题提供平台。在本节内容中,将基于这一思想采用计算机技术建立了满足一类问题研究的人工供应链模型,并且在此模型的基础上进行了供应风险的相关研究,在下一节中基于人工供应链模型研究了供应链动态结构的形成和演化问题。

### 6.1.1 供应链网络中角色的定义

供应链是在给最终顾客提供产品和服务的不同过程和活动中涉及的上下游互相联系的组织网络。通过这一网络完成将原材料转化为产成品的过程,实现

客户服务和价值增值。在从上游原材料的生产到最终客户需求的满足,需要各类企业的参与和合作,从而在供应链上形成了各种分工不同的企业组织。一般来讲,生产型供应链上的参与企业根据他们在供应链中的角色,可以分为以下几类:

#### 1. 顾客

即消费者,是购买最终产品或服务的群体,他们的需求是推动企业发展的原动力,在供应链管理中,顾客的显性需求和隐性需求常常成为供应链战略研究的依据与基础。顾客的需求往往是不确定的,同时具有多样化和个性化等特点。随着企业之间市场竞争的逐渐激烈,消费者开始逐渐成为供应链中的决定性力量,供应链中的参与企业采用各种手段迎合消费者的需求。

#### 2. 零售商

零售商是以零售业务为主的群体,他们面对广大的终端消费者直接销售产品或提供服务,通过赚取差价或提供服务获取利润。零售是一个庞大的行业,其从业人员数量远远超出生产企业加批发企业之和。零售商的类型千变万化,新的组织形式也层出不穷,但总的说来当前的零售商可以分为零售商店和无门市零售商。前者诸如百货商店、超级市场、便利店等;后者则包括网上商店、自动售货、直接销售等多种形式。

#### 3. 分销商

分销商是以批发销售为主的一类企业,他们专门从事将商品从生产者转移到零售商以及消费者的活动,主要面向零售商,满足零售商的订单,因此其接受的订单往往具有批量大、间隔周期长等特点。在很多情况下,分销商也称为分销中心,常常负责某个区域的产品销售,管理其区域内的零售商。分销商与制造商之间的关系是买者和卖者的关系,分销商是完全独立经济实体。

#### 4. 制造商

制造商或称生产厂商,指从事半成品或产成品的制造、加工、组装等业务的企业。他们向上级供应商订购原材料或零组件进行加工制造,经过较为自动化的机器设备及生产工序,制成一系列的日常消费用品,然后将产品运输到分销中心,进行销售。制造商完成产品从原材料或半成品到产成品的转化,其业务流程在整个供应链中是相对较复杂的。在很多情况下,制造商是整个供应链的核心企业,他们从众多供应商手中采购原材料,而又向下游多个企业进行分销,制造商具有相对优势的地位,在合同的签订、定价决策等方面有较重的话语权。

#### 5. 供应商

供应商是指直接为下游企业提供原料、设备及其他资源或服务的企业。一

般情况下,供应商从事原材料供应,在很多情况下需要进行原材料的初步加工和制造,形成半成品,他们具有一定的加工生产能力,也能够经过较为自动化的机器设备及生产工序进行初步加工形成半成品或零部件。供应商直接面向制造商,满足制造商的订单需求,在整个供应链中处于上层。

## 6. 物流服务提供商

物流服务提供商是一个独立的经济实体,拥有可靠的物流网络和信息系统,对物流运作进行全程管理和控制,具有高效率的物流专业化能力,通过提供仓储管理、运输管理以及增值物流服务等,从而改善客户运作效率,增强客户企业的核心竞争能力,为客户创造价值。通常,在供应链网络的各节点企业中都会有物流服务提供商进行商品的运输和传递。

### 6.1.2 人工供应链模型的构建

供应链网络是一个典型的复杂自适应系统(Choi et al., 2001; Surana et al., 2005),供应链中的成员企业相互竞争与协作,完成产品的生产、运输和销售,从而实现产品的增值。在供应链中,供应链的组织结构、成员数目、成员构成、成员交互关系等构成了供应链的相对静态的复杂性,而成员决策偏好,运作过程等构成了供应链的动态复杂性。此外,供应链的外部环境也是动态变化的,如政治因素、经济因素、法律因素、技术因素、供应、需求等。这些因素进一步加剧了供应链的动态性与复杂性。

对这一动态的复杂系统,本节利用计算机技术,提出了人工供应链的系统模型,在计算机中构造一个虚拟的人工供应链系统,利用计算机的反复和可控计算对不同条件下的供应链系统进行模拟。

为实现这一方案,需要构造一个描述供应链系统的可计算模型,它应当尽可能地逼近现实供应链系统,同时适合于研究供应链系统中的多层次间要素相互作用和系统宏观层次的问题。下面开始介绍人工供应链模型。

#### 1. 人工供应链系统模型

根据上文对供应链系统中各个角色的分析、提炼,本节利用计算技术构造各类智能 Agent,定义各类 Agent 的属性、行为规则、学习模式、决策规则和通讯接口。设计各类机制的规则库、方法、模型的方法库、模型库,实现对实际的企业和代理间相互关系描述,构建人工供应链,在计算机中模拟实际企业的决策行为及其相互作用。

首先给出人工供应链的系统模型,在张军(2007)提出的人工组织系统模型的基础上,根据本节对供应链系统研究的需要,提出了如图 6.1 所示的人工供应链的系统模型。

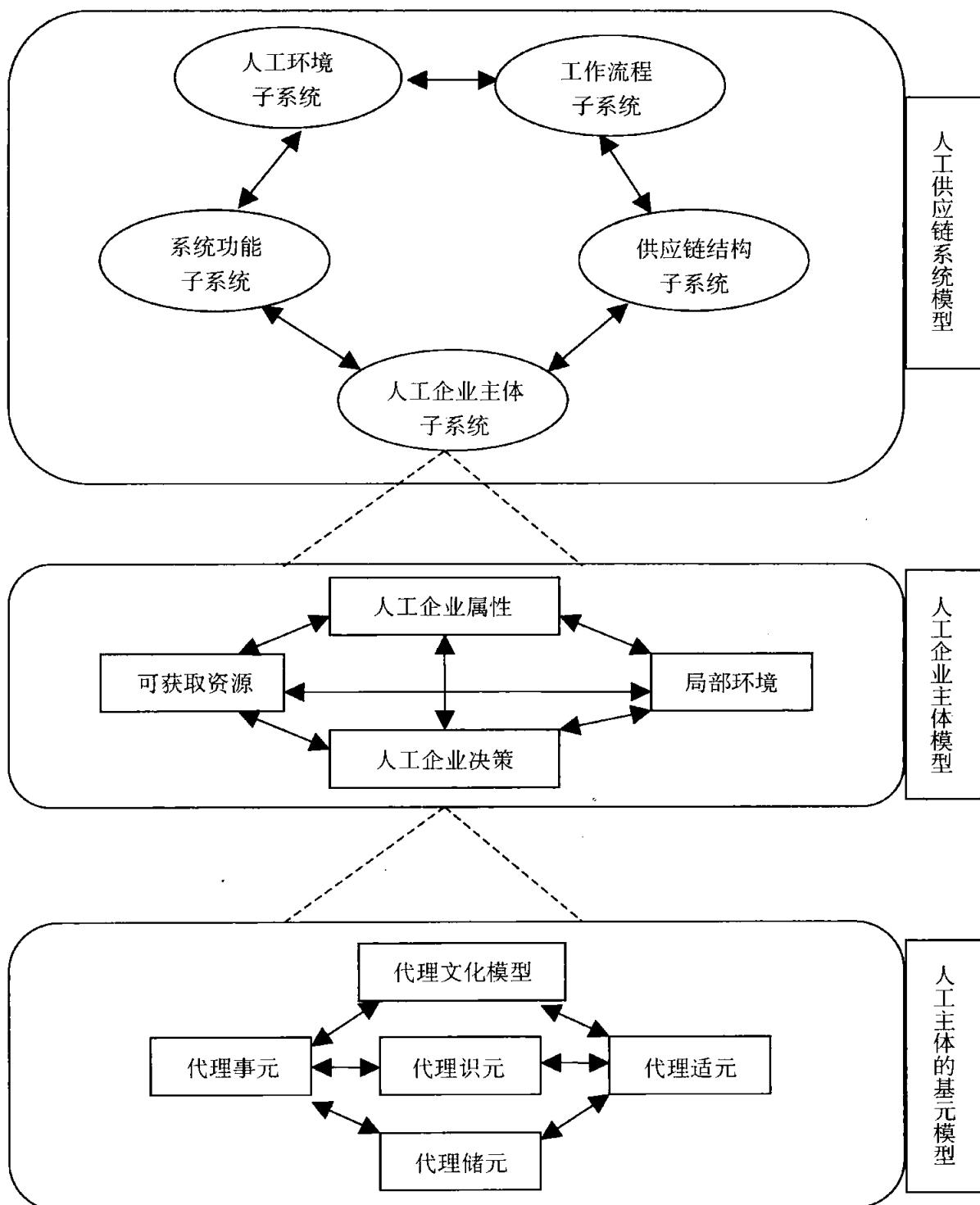


图 6.1 人工供应链系统模型

模型中主要包括五个子系统模块，分别为：

(1) 人工环境子系统模块

人工环境子系统模块包括影响供应链系统变化的各类内外部环境因素，包括市场中的客户的实际需求；引起供应链中供应和需求突变的突发事件；市场中

潜在的投资者；市场中银行的存款利率等。人工环境子系统根据计算的需要模拟现实系统的真实环境。

#### (2) 工作流程子系统模块

工作流程子系统模块涵盖了人工供应链中人工企业的事件处理流程，根据不同的计算需要可以重组人工企业的事件处理流程。此外，工作流程模块还包括描述某个工作任务的层次分解等。

#### (3) 系统功能子系统模块

系统功能子系统模块定义了人工供应链中各人工企业的功能函数，它与工作流程子系统模块有着紧密的联系。根据人工企业实际的事件处理流程，可以详细地定义和划分系统的功能子模块，比如可以包括需求管理功能、订单管理功能、客户关系管理功能、库存管理功能等。

#### (4) 人工企业主体子系统模块

人工企业主体子系统包括整个人工供应链中的参与企业，此处包含两类：人工企业主体的类型和人工企业主体的数目。在人工供应链中可以根据研究目的的不同构建不同类型的人工供应链，从而构造不同类型的人工企业主体，比如在两级供应链中构造人工零售商主体和人工供应商主体，而在四级供应链中可以构造零售商、分销商、制造商、供应商等人工主体。人工主体模型可以详细的划分为：人工主体的属性、人工主体的决策、人工主体可获取的资源和人工主体所处的局部环境。另外，人工主体自身行为的基本演化单位用人工主体的基元模型进行描述，这是研究人工供应链系统层次的最基本演化单位。

#### (5) 供应链结构子系统模块

供应链的结构子模块描述供应链中各个企业代理之间的供应和交互关系，以及从整体上描述在各个“时刻”整个供应链的结构状态。这些结构关系可以包括买卖之间的物流关系、信息流关系、资金流关系等。

在图 6.1 的三层结构中，最底层次，根据对现实系统的分析和抽象，考虑人工主体的记忆、认知、行为、学习、偏好，构建人工供应链的基元层次；中间层次，根据人工供应链的基元模型，考虑局部环境及其相互作用、可获取的资源、信息、目标（追求），构建人工供应链的主体层次；最高层次，根据人工主体模型，考虑供应链系统的环境、结构、系统目标、资源、信息和相互作用等，构建人工供应链的系统层次。在整个三层结构中，下一次要素的活动合成了上一次要素的改变，上一次的变化又影响下一次的演化，从而形成了整个人工供应链的变化。

## 2. 人工企业主体模型

在人工供应链模型中,人工企业主体及相互联系构成了整个人工供应链网络。根据研究目的的不同,可以构造不同类型的人工企业主体,这些人工主体代表实际供应链中的企业,尽管有各自不同的功能,但都是有限理性的个体。它们的决策都是基于有限的可得信息,根据自身的属性、偏好以及历史而做出的,同时受周围环境的影响。

具体说来,人工企业主体模型包括人工主体的属性,人工主体可以获取的资源,人工主体所处的局部环境以及人工主体的决策。人工企业主体模型提供了人工企业生存的环境以及企业决策的依据,同时构成了上一个层次人工供应链系统层次变化。人工企业主体模型的要素详细说明如下:

### (1) 人工主体的属性

对人工主体某些特征的描述,包括一些固有不变的特征,比如主体的标始,各类成本参数等;随时间变化的特征,比如企业主体的持有库存水平、资金量、对某种行为的偏好值等。

### (2) 人工主体可获取的资源

人工主体都是局部地被定义,它们在各时刻获取不同的资源以及信息,包括对交互历史的记忆、上级待选伙伴的供应能力信息、竞争对手的信息、下游买者的需求信息、自己的资金状况等。

### (3) 人工主体的局部环境

人工主体所存在的环境,是人工主体的输入之一,同时它也是人工主体的基元模型处理的依据。包括主体的邻居集合、在供应链网络中所处的地位等。

### (4) 人工主体的决策

人工主体决策是人工主体基元模型的主要组成部分,由事件进行驱动,根据基元模型的计算结果,整合人工主体的属性、人工主体可以获取的资源和环境,共同形成人工主体对人工组织系统的作用(输出)。包括决策的偏好、决策的规则集合和决策满足的约束等。

## 3. 人工企业主体的基元模型

人工主体的基元模型是描述人工主体心理和行为活动的基本元素,是构建人工组织系统研究管理系统演化问题的最基本层次(张军,2007)。人工供应链同样是一个人工组织系统,所不同的是,人工供应链中的企业主体的决策规则更加复杂,并且决策所需的信息更多,但总的来说人工企业作为一个独立的人工经济实体,它的决策也同单个的人类似,同样源于人的心理,受到记忆、偏好等的影响,其决策过程同样包含着人工主体的心理和行为的自我形成和演化。因此,本

节借用张军(2007)关于人工组织系统中人工主体的基元模型进行人工供应链的研究。

人工主体的基元模型就是抽象反映人类行为的自演化机制,它对应单个人工主体的心理和行为在人工组织系统中的演化,人工主体的基元模型包括:储元、识元、适元、事元和人工主体的心智模型。

#### 4. 人工供应链结构子系统

在人工社会中,各要素空间和时序结构可以用图论等数学方法进行描述,一般来讲都采用多维、带权的动态网络结构来刻画要素间的关联关系。根据研究的需要,本节以有序的层级网络表示人工供应链的网络结构,网络中的连接表示供应链中的物流方向。以一个  $k$  层的层级网络结构为例,本节构建人工供应链的结构模型。

在  $k$  层的网络结构中,应用拓扑学相关知识建立供应链网络结构的相关模型,如图 6.2 所示。

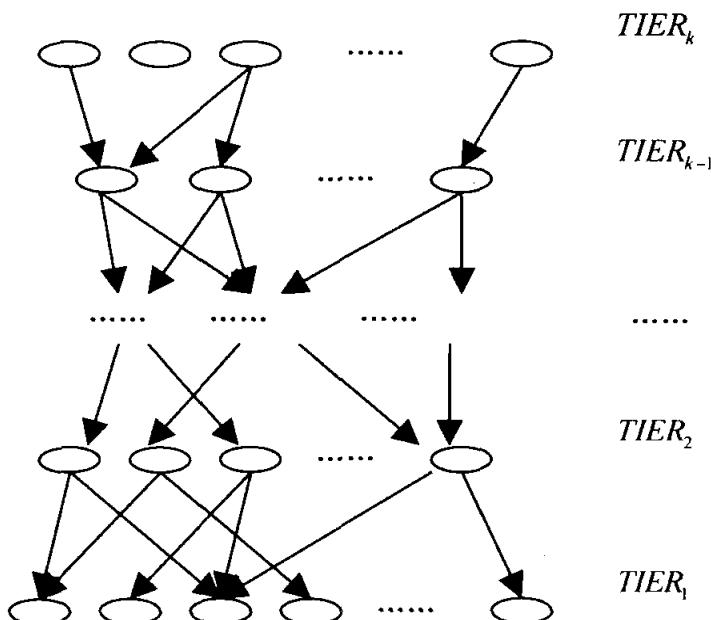


图 6.2 供应链网络结构图

其中每个网络节点表示一个 Agent,每一层用  $TIER_i = (i = 1, 2, 3, \dots, k)$  表示,每一层的 Agent 向它的下一级 Agent 进行供货,这样供应关系形成了一个有向图,记为

$$SCN = (V, A) \quad (6.1)$$

式中  $V, A$  分别表示供应链网络结构图  $SCN$  的点集合和弧集合。

弧集  $A$  中的每一个元素  $a$ (即  $V$  中某两个元素  $v_i, v_j$  的有序对)记为  $a =$

$(v_i, v_j)$ , 称为该图的一条从  $v_i$  到  $v_j$  的弧。同时称  $v_i$  为  $a$  的尾(tail),  $v_j$  为  $a$  的头(head), 并称弧  $a$  为  $v_i$  的出弧(outgoing arc), 为  $v_j$  的入弧(incoming arc)。在实际的供应链中出弧表示上游的供者  $v_i$  到下游买者  $v_j$  之间的供应关系。

点集  $V = \{V_{TIER_1}, V_{TIER_2}, \dots, V_{TIER_k}\}$ , 分别表示供应链网络结构中第一层、第二层、……、第  $k$  层所包含的节点。另外, 记点集  $V$  中的某个元素  $v$  的所有入弧为  $I_v$ , 从节点流出的弧为出向弧, 记为  $O_v$ 。

在这个网络结构中, 各层 Agent 需要满足物流平衡、生产能力限制等几个约束条件, 本节以一个四级供应链网络为例, 网络中  $TIER_0$  表示零售商、 $TIER_1$  表示分销商、 $TIER_2$  表示制造商、 $TIER_3$  表示原材料供应商, 其中制造商和原材料供应商都有有限的生产能力, 在给定的这一网络下, 网络中各 Agent 满足给出以下几个约束条件:

### (1) 物流平衡约束

对网络中的中间层次( $TIER_2, TIER_3, \dots, TIER_{k-1}$ )上的 Agents 而言, 其物流平衡方程为:

$$\sum_{a \in I_v} w(a) = \lambda_v \sum_{a \in O_v} w(a), \quad v \in \bigcup_{i=2}^3 V_{TIER_i} \quad (6.2)$$

其中  $w(a)$  为弧  $a$  的权重, 此处表示弧  $a$  上的流经的原材料数量,  $\lambda_v$  表示节点  $v$  所代表的 Agent 在生产中所对应的物料清单系数(bill of materials), 即输入  $\lambda_v$  个原材料产出一个单位的产品输出(刘希龙, 2007)。

供应链网络中最下层的零售商直接面临终端市场, 因此它所在的网络节点只有入弧没有出弧, 其物流平衡方程为:

$$\sum_{a \in I_v} w(a) \leq \lambda_v D_v, \quad v \in V_{TIER_1} \quad (6.3)$$

### (2) 生产能力约束

在供应链中, 原材料供应商和制造商都有自己的生产能力, 分销商有最大的库存量约束, 因此, 网络结构中各个节点应该满足以下的约束:

对于原材料供应商和制造商, 其所在的网络节点满足:

$$\sum_{a \in O_v} w(a) \leq C_v, \quad v \in \bigcup_{i=3}^4 V_{TIER_i} \quad (6.4)$$

其中:  $C_v$  表示节点  $v$  所代表 Agent 拥有的最大产能。

对分销商而言,  $I$  其每天卖出去的货物应该小于或等于其最大库存容量, 假设其所在节点  $v$  的最大库存容量为  $IC_v$ , 则有:

$$\sum_{a \in O_v} w(a) \leq IC_v, v \in V_{TIER_2} \quad (6.5)$$

### (3) 订货过程中物料约束

从最初的零售商到原材料供应商,在订货的过程中,由于需求、供给等不确定性因素,可能会出现上游供应商无法满足订单需求的情况,本节以  $U_v$  表示节点  $v$  的缺货量,  $Q_v$  表示其订货量,  $D_v$  表示其收到的订单总量。则:

$$\sum_{a \in O_v} w(a) + U_v = D_v, v \in V \quad (6.6)$$

$$\sum_{a \in I_v} w(a) \leq Q_v, v \in \bigcup_{i=1}^3 V_{TIER_i} \quad (6.7)$$

## 6.1.3 程序实现和实验环境

通过上述对现实供应链系统的详细分析和抽象,本节构建一个人工供应链的计算实验软件平台,在这个平台上进行相关问题的研究。通过构建软件平台可以让研究人员从不同的侧面、不同的层次,通过反复、可控的计算研究去认识供应链系统的复杂性,同时可以进行一类供应链问题的研究。

### 1. 实验环境

本研究选择 Java 面向对象语言作为开发语言,这主要考虑的是 Java 语言的跨平台、可移植、分布式、可靠性等优点。另外,用 Java 开发的平台系统和其他系统进行集成时也相对容易。选择 Jbuilder2006 作为开发环境,该软件的界面绘制和系统调试功能相对强大,同时用户界面友好,能够比较容易地嵌入众多的多主体建模的软件工具。

本研究借助于多主体建模软件 RePast3.0 进行人工供应链系统的设计开发。

### 2. 几个人工代理的定义

#### (1) 参与者个体的基类 Agent 定义

根据上文对供应链中角色的划分,在人工供应链中,构建零售商 Agent、分销商 Agent、制造商 Agent 和原材料供应商 Agent,这些人工智能体,拥有相似的个体属性和方法。因此,本节构造一个基类 Agent,其他各 Agent 来源于基类 Agent 的继承,本节称为 Participant,其结构说明如下:

```
Public Class Participant{
    //基本属性
    public int ID;      //Agent 的标识
    public int ID_tiers; //所属的供应链层次
```

```
public int bornDay;      //生成的日期
//数量类属性
double quantity_endInv[];    //每个周期的期末库存
double quantity_back[];     //每个周期的期末缺货
double quantity_add_back[]; //每个周期的期末库存
double quantity_forecastDemand[]; //预测的需求
double INITIAL_INV;        //初始库存
public Point point = new Point(); //在显示窗口中的坐标位置
.....
//费用类
double percost_inventory=0.2; //单位库存成本
double percost_back=0.2; //单位缺货成本
.....
double cost_netprofit[]; //每周期的毛利
double cost_profitMargin[]; //每周期的利润率
.....
//列表类
LinkedList lnklistBuyers_days[]; //每个周期的买者
LinkedList lnklistSuppliers_days[]; //每个周期的供者
LinkedList lnklistOrders_day_received; //每个周期收到的订单列表
LinkedList lnklistOrders; //每个周期发出的订单列表
.....
//交互历史数据类
SuppCreditAgent suppCredit[]; //供应商的信誉评价
int BuyerCredit[]; //买者的客户评价
.....
//偏好类
int len_changePrice=100; //准备改变价格的周期长度
int Len_Contract=100; //准备签订契约的长度
int len_exit=200; //是否退出的考察周期长度
double dieThrehld=0.3; //退出市场的界线值
.....
//方法
public void processing (int day, tiers tier[])
public void changePrice (int day, tiers tier[])
public void changeLenContr(int day,tiers tier[])
public void selectSupplier(int day, int tierSelect)
public void exitDecision()
public void proposedOrders()
.....
```

基类 Agent 的结构分为众多类型的属性和方法。在基类 Agent 的基础上,可以根据研究需要产生众多的子类,在设计具体的子类时,可以增加或更改众多的属性和方法。

### (2) Tier 的定义

本节以层级网络表示供应链的网络结构,因此,供应链网络结构的动态变化被细化到供应链的各个层次,同时动态结构的显示图示也放到网络的各个层完成。

```
public class tiers{
    //属性
    int type;      // 层的类型
    int ID_tier;   // 层的标识
    int totalAgent; // Agent 的总数目
    LinkedList lnklistAgents_day = new LinkedList(); // 每个周期的 Agents
    .....
    //方法
    public void agentBorn(){} // 本层新企业的诞生
    public void agentExit(){} // 本层新企业的推出
    public void makelinkForStr(){} // 画出网络结构
    .....
}
```

## 3. 总体结构

软件系统的处理过程结构包括几个主干模块,为了处理的通用性以及使程序结构更加清晰,本节描述的重点放在各个模块的功能和模块之间的关系上。根据实际计算研究的要求,各个模块还可以进一步细化。

### (1) 主程序模块

主程序模块基于 Repast 的主模型类进行构建,它使模型的结构和设计过程清晰明了。主程序模块的主要功能之一是完成程序的初始化工作,主要包括:供应链层级的定制;供应链中各层 Agent 集合的设定;市场需求的确定;对个体的一些属性进行赋初值;显示窗口和图形界面窗口的初始化。其参数设置窗口如图 6.3 所示。主程序模块的主要功能之二是对整个程序的运行流程进行控制,在适当的时候启动相应的模块完成相关的计算动作。Repast 建模框架提供了控制工具栏,包括开始、暂停、结束、退出等按钮,如图 6.4 所示。主程序模块设计成 Endless(永不自行停止)形式,只有点击结束或退出按钮,或遇到特定的事件或满足特定的条件才停止运行,否则将永远执行下去,这样设计的目的是为了适应计算实验研究方法探究性的需要。

及运算过程中选择的程序产生的数据显示模块。其中第一部分由 Repast 中两个接口——节点和边而建立的,这一显示只是提供了在演化过程中网络结构的变化情况,属于感性认识,而不能对网络进行分析和处理;第二部分是程序计算过程中研究者选择的感兴趣的某些特征值的演化情况,可以根据研究需要进行数据显示模块的添加。

由于显示数据的动态变化,显示模块是模型中运行最慢的一部分,本节还可以利用建模框架提供的快照功能进行图像和数据显示过程中生成快照以及模型运行的影像,同时可以利用数据采集功能对模型运行过程中的实时数据进行采集,存储到本地硬盘中以备后期的再处理。

### (3) 人工主体模块

Agent 模块提供了人工供应链中参与个体的种类和数量,根据对实际供应链角色的划分以及研究的需要,可以对 Agent 模块进行扩充和完善。Agent 模块是建立在 Agent 集合的数据结构基础上的程序段,是处理 Agent 演化过程的基本模块。

在人工供应链中,由于区分了不同的供应链层级以及每个层级中个体的角色,所以 Agent 模块中的各 Agent 是根据层级进行划分的,不同层级 Agents 统一拥有一个所属层级的标识(详见 Agent 的数据结构)。这样,以层级为单位,可以设定各层的 Agent 数量,以及 Agent 的功能。采用面向对象的程序设计方法,以层级为单位,把各层级的 Agent 模块设计成通用的过程,这样设计就可以允许所有 Agent 使用同样的处理程序,由于对应各 Agent 数据结构中的动态值不同,模块执行过程和得到的结果也不尽相同。统一处理过程使程序结构简洁,依据数据的动态值控制处理流程保证了 Agent 的不同质。

Agent 模块的主要功能是区分不同的比较计算方案,在主模块控制下,按离散时间步,分别计算 Agent 从前一步到后一步的演化状态改变。其中包括 Agent 的决策、记忆以及在决策规则集合上的继承、尝试、调整等遗传算法的处理。

### (4) 供应链结构模块

供应链结构模块根据研究问题和假设,动态地生成相应的人工供应链组织结构。同样以供应链的层级为单位,构造人工供应链的结构模块,根据各层 Agent 的决策动态生成。结构模块的构造过程同样采用面向对象的程序设计方法,根据各层 Agent 的决策,设计出通用的处理程序,画出动态的供应链结构。在既定的供应链层级下,统一结构的生成过程,使程序更加简洁。

### (5) 工作流程模块

工作流程模块提供了各类 Agent 进行事件处理时所需的各类流程,它与系

统功能模块紧密相关。由于人工供应链中每层 Agent 的角色各异,它们要完成自己的角色需要执行不同的事件,拥有不同的事件处理流程。然而,实际上某些不同层级 Agent 的事件处理流程还是极度类似的,区别之处在于面向的对象不同。因此,本节将工作流程模块进行统一处理,定义一类 Agent 的处理流程,在处理相应的 Agent 流程时直接调用,使程序的设计更加简洁。另外,根据研究问题的需要,在 Agent 的改变事件处理过程时,可以在工作流程模块中进行修改和完善。

#### (6) 系统功能模块

系统功能模块提供了 Agent 完成事件处理的各项功能,由于在供应链中各类 Agent 的功能各不相同,但总体上可以划分为类似的几大功能。因此,将这些功能进行封装,统一进行处理,在 Agent 需要完成相应的功能时直接调用。此外,还可以根据研究问题的不同情况进行功能的增加和修改,逐步完善功能模块。

#### (7) 环境模块

根据计算研究需要,在人工供应链中将市场的需求、原材料的开发等纳入环境模块,对个体 Agent 而言,其周围的竞争者分布、市场进入壁垒等都属于环境模块。

### 6.1.4 小结

计算实验是一种基于个体的思维方法,其本质是一个计算机模型。随着计算机技术和多代理理论的发展,计算实验开始在社会科学中得到应用。本节在划分供应链网络中的角色后,构建了人工供应链的系统模型,整个模型分为人工环境子系统、工作流程子系统、系统功能子系统、结构子系统以及人工企业主体子系统。而整个人工供应链的系统模型由三层结构构成,最底层次是人工主体的基元层次,包含了人工主体的记忆、认知、行为、学习、偏好等;中间层次是人工供应链的主体层次;最高层次是根据人工主体模型,考虑供应链系统的环境、结构等构建的人工供应链的系统层次。在建立的人工供应链系统模型的基础上,本节简要给出了平台设计的程序实现和实验环境。

本节构建并实现了人工供应链的实验平台,具有以下几个特点:

- (1) 供应链层级的定制:可以根据研究需要设定供应链的具体层级。
- (2) 供应链特点的定制:可以设定包括快速反应、面向订单、面向库存等类型。
- (3) 供应链角色的定制:可以设定不同的供应链角色。
- (4) 供应链功能的定制:包括不同参与者的功能,可以增加和完善系统的

功能。

(5) 供应链流程的定制:包括参与者对于不同事件处理流程的设定和增加。

通过平台的设计和实现,为后面几个实际的供应链问题研究提供了研究的基础。

## 6.2 交货提前期对供应风险的影响分析

### 6.2.1 问题背景

供应链风险对企业来说是一种潜在的威胁,它会借助供应链系统的复杂性给上下游企业以及整个供应链带来损失。在过去的十年间,供应链风险受到国内外学者和企业的重视。一般来说,供应链风险可以分为运作风险和中断风险(Tang, 2006)。运作风险主要是指企业内部的不确定性,例如:顾客需求的不确定、供应数量的不确定、提前期的不确定以及交易成本的不确定等。供应风险作为运作风险的一种,是企业需要经常面对且不可回避的。Zsidisin(2003b)在其文献综述中扩展了供应风险的定义。文献列举了供应风险很多方面的特性,包括能力约束、周转时间、灾难、物流、库存管理、供应商的可靠性等等。在一些文献中提出了供应风险的定义(Harland et al., 2003; Zsidisin, 2003a),这些文献所给出的定义本质上差别很小。本节的研究在已有文献基础上给出供应风险的定义:“由于单个供应商或整个供应市场原因造成的与采购有关的意外事件发生的可能性,这种意外事件导致购买方企业无法满足客户的需求,甚至导致对客户生命与安全的威胁”(赖茂宇和郑建国,2007)。

企业通常采用增加安全或缓冲库存的方法来减弱供应风险所带来的影响(Milgate, 2001)。但是Kull和Closs(2008)利用仿真软件研究了库存水平变化对供应风险的影响。发现增大库存水平不一定能够降低供应风险,反而有增大这种供应风险的可能性。并在未来研究方向中提出了交货提前期是如何影响供应风险的问题。但是目前国内外没有太多文献资料来研究交货提前期和供应风险之间的关系。那么交货提前期对供应风险到底会有怎样的影响呢?基于以上背景,本节将针对以下两个问题进行研究:

1. 交货提前期的长短对下游企业、自身、竞争企业的供应风险会产生什么样的影响?
2. 在不同供应失败事件发生概率、不同交货率的情况下,交货提前期的变化会导致供应风险幅度发生怎样的变化?

货,要求瞬时到货,否则将会失去订单。

(2) 每个零售商、分销商、制造商企业都选择两个供应商,它们的交易关系如图 6.5 所示。两个供应商通过对订单的满足率进行竞争。下游企业将按照供应商对订单的满足率来决定下次分配订单的比例。两个供应商订单比例初始值为 0.5,0.5。下一次将在前一次的基础上对满足率高的企业增加 0.05 个百分点,对满足率低的企业订货量将降低 0.05 个百分点。当对一个供应商的订单比例高于 0.8 或小于 0.2 时,两个企业的订单比例恢复为 0.5,0.5。

(3) 零售商和制造商采用最小—最大库存策略( $s, S$ )。之所以让零售商和制造商选择( $s, S$ )的库存策略(a. k. a., min-max),主要是因为这种库存策略的普及性和其在零售环境下的有效性(Ballou, 2004; Scarfetal, 1962)。 $(s, S)$ 的库存策略是一种连续性检查库存的策略。当库存水平( $IP$ )低于订货点( $s$ )时,就开始订货,订货量是最大库存( $S$ )与发出订单时的库存量的差值。企业对于库存水平的检查是在每次处理完订单后进行的,如果发出一个订单,所订货物经过固定提前期后到达。因此,订货的频率不是固定的,只有库存水平低于订货点时,才发出订货请求。

分销商采用( $T, s$ )库存策略,每隔一定时期检查一次库存,发出一次订货,把现有库存补充到最大库存水平。分销商 1 每三天订次货,分销商 2 每两天订次货。分销商采用周期性库存策略主要是因为已有文献表明在零售商采用( $s, S$ )库存策略条件下,分销商比较适宜采用( $T, s$ )库存策略(Petrovicetal et al., 1998; Gavirneni et al., 1999)。

本节假设供应商没有库存,但有足够的原材料供给制造商。由于企业内部会存在不确定性风险,所以本节假定企业当供应失败事件发生后,供应失败概率和失败后的交货率都是给定的值。

(4) 在文中,每个企业 Agent 都会尽可能去寻找自己最适宜的最大库存量。每个 Agent 都使用经济订货批量模型(EOQ)和自身的库存策略来确定自己的订货量。订货点等于提前期内的平均需求加上安全库存。安全库存则是提前期内需求标准差的若干倍数。文中各企业的安全库存都是直接给定的固定值。最大库存  $S$  的水平就是经济订货批量模型的订货量  $Q$  再加上订货点  $s$  的值( $Q+s$ )。订货点  $s$  可以用(6.8)式计算出:

$$s = L * AVG + st \quad (6.8)$$

在式(6.8)中, $L$  表示交货的提前期,AVG 表示客户的平均需求。 $st$  表示安全库存。经济订货批量模型中的订货量  $Q$  由式(6.9)计算出:

$$Q = \sqrt{2K \times AVG/h} \quad (6.9)$$

每个企业在每次订货时都需要支付一个固定的订货成本  $K$ ;通过预测估计平均需求  $AVG$ ;固定的库存成本  $h$ ;订货量由每个企业自行决定;订货量=最大库存  $S$ —现有库存 Stock。

(5) 每个企业 Agent 都采用移动平均法的预测方法来预测客户需求。移动平均法中每个预测值是在此之前一定数量实际需求的平均值。每个企业的预测时间选用最近五次的实际订单量。

(6) 每个企业 Agent 的服务原则都是先到先服务原则,下游企业将在交货提前期后收到所订货物。

## 2. 供应不确定

本节的研究考虑这样一种情况,即每个企业都会不可避免地面对企业自身所存在的不确定性,而这种不确定性的表现方式就是企业虽然拥有足够多的库存,但供货数量还是不能满足下游企业的订单,这种供应失败事件发生的概率是给定的。当这种情况发生后,企业的交货率也是给定的。

企业接到订单后立刻进行供货,货物经提前期后到达。供应数量不能满足订单的情况主要有两种:当上游企业的库存量小于下游企业的订货量时上游企业将按自己的库存量供货,这时供应数量显然是不能满足订单需求的;当上游企业的库存量大于下游企业的订货量时,由于企业本身所存在的不确定性,也有可能不按订单量供货,供货数量是小于订单量的,而企业发生这种供应失败事件的概率(probability)是给定的。当这种不确定性事件发生后,企业将按订单的一定比例来供货,文中将这个供货比例用交货率(fill-rate)来表示。

文中用供应失败事件发生的概率和在这种条件下的交货率来共同描述企业的不确定性。非常重要的实验性质之一就是允许供应数量的不确定性可以独立于企业的库存而存在。换句话说,当企业拥有足够多的库存时,供应货物的数量也有可能不满足下游企业的订单。如果下游企业收到的货物量没有达到自己订单的 90%,那么,下游企业就会认为上游企业供应失败。通过改变供应失败事件发生的概率及在此条件下的交货率两个参数来观察和分析各种实验结果,从而研究交货提前期对供应风险的影响。

在模型运行中,供应链上所有的交易记录都会作为历史数据被保存。通过和上游企业交易,每个下游企业都会得到上游企业实际发生供应失败的概率。值得注意的是,下游企业获知的供应失败概率不是库存充足而发生供应失败事件的概率,而是由于库存不充足所导致的供应失败和库存充足但是由于不确定性所导致供应失败的概率的总和,是下游企业通过实际交易获知的。这个概率可以表示为所有供应失败次数与所有交易次数的比值。同时,下游企业通过实际交易也会知道上游企业的交货率。每个企业都有一个目标满足率,通过上述

这些值可相应计算出每个企业所面临的供应风险。为了方便计算,每个企业的目标满足率都设为0.95,由于自身不确定性发生供应失败的概率设成0.2。由于不确定性引起的供应失败,除了零售商以外的其他企业供应失败后的交货率为0.8,零售商非常重视客户的服务水平,所以,设为0.95,在后面具体的实验过程中将会相应地更改这些参数值。

### 3. 供应风险

供应风险的概念由Zsidisin(2003a)定义,他给出了一个计算供应风险值的方法。一个企业的供应商对于它的订单发生供应失败( $E$ )和这个企业对其客户的订单发生供应失败( $F$ ),这两个事件同时发生的概率记为 $P(EF)$ ,这个概率就被称为供应风险。所以,供应风险应该是介于0和1之间的值。一般是由于供应商供应失败才会导致企业对其客户供应失败,这两个事件并不是完全独立的,而是有因果关系的,所以 $P(EF)$ 并不等于 $P(E) * P(F)$ 。为了测量出对客户订单没有满足的概率( $F$ ),输出变量服务水平( $SL$ )将会被用到。服务水平是订单得到满足的次数与全部订单次数的比值,这经常被定义为概率(Lindgren, 1976)。相反,供应失败的概率代表着没有满足客户订单的比率,所以 $P(F)$ 就等于 $1 - SLP$ 。计划零售服务水平 $SLP$ 可以用 $P(F' | E')$ 来表示。在最初的供应链配置中,当 $P(E) = 0$ 时, $P(F' | E') = 0$ 就等于 $P(F')$ 。因此,当 $E$ 被加入到模型中时,零售商供应风险 $P(EF)$ 就可以由下列参数计算出来:

$P(E)$ =分销商供应失败事件发生的概率;

$P(F)$ =零售商供应失败事件发生的概率;

$P(EF)$ =分销商供应失败和零售商供应失败共同发生的概率;

$SLP$ =零售商目标服务水平;

$SLA$ =零售商实际服务水平。

$$P(EF) + P(E'F) = 1 - P(F')$$

$$P(EF) = P(F) - P(E'F)$$

$$= [1 - P(F')] - [P(E')P(F | E')] \quad (6.10)$$

$$= (1 - SLA) - [1 - P(E)](1 - SLP)$$

Zsidisin对供应风险的定义只是考虑了一个链条,并且只针对零售商。本节将供应风险的定义扩展到整个供应链网络中,并通过式(6.10)可计算出网络中各节点企业所面临的供应风险。通过程序模拟运行可以得到上游企业供应失败的概率和每个企业的实际服务水平,再结合每个企业的目标服务水平,就可以计算出供应链网络中所有节点企业的供应风险。因此,需要重新定义式(6.10),如下所示:

$P(E)$ =节点企业的上游供应商供应失败事件发生的概率;

表 6.3 四种独立的实验条件

Probability fill-rate	0.2	0.4
0.6	(0.2, 0.6)	(0.4, 0.6)
0.4	(0.2, 0.4)	(0.4, 0.4)

表 6.4 不同条件下的交货提前期对比表

Lead-time	Supplier1	Supplier2	Supplier3	Manufacturer1	Manufacturer2	Distributor1
Manufacturer1	1	1				
Manufacturer2		1	1			
Distributor1				2	1	
Distributor2				1	2	
Retailer1						1
Retailer2						1
Retailer3						1

通过设定上述四种不同的实验条件,来观察两种不同长度的交货提前期在不同的概率和交货率情况下降低供应风险的幅度。两种不同的交货提前期的值在表中给定(表 6.4 和表 6.5);表 6.5 中给出的初始提前期的值在表 6.4 的提前期的值的基础上都增加了 1 天,观察两种交货提前期在不同的供应失败事件发生概率及不同交货率的情况下,各自会引起供应风险幅度多大程度的变化,从而可以揭示出交货提前期与供应风险之间的动力性。

表 6.5 不同条件下的交货提前期对比表

Lead-time	Supplier1	Supplier2	Supplier3	Manufacturer1	Manufacturer2	Distributor1
Manufacturer1	2	2				
Manufacturer2		2	2			
Distributor1				3	2	
Distributor2				2	3	
Retailer1						2
Retailer2						2
Retailer3						2

在四种不同条件下,两种提前期所降低的供应风险的幅度如图 6.9 所示:

本节的研究在以下四个方面进一步扩展了供应风险的理论：

1. 通过构建多主体模型进一步阐述了供应风险的评估机理；
2. 探索了上游企业供应失败的动力机制；
3. 得到一些实验观察结果，可以帮助管理者评估供应风险；
4. 发现一些交货提前期和供应风险之间的关系。

本研究还发现共享库存信息可以在一定程度上降低供应风险，因为信息共享可消除由于库存不足而带来的不确定性，但不能消除企业自身所具有的不确定性。企业要想降低自身的不确定性，就要建立一套系统的风险管理方法。文中所得出的这些结论还表明了未来可能的研究方向：供应链拓扑结构与供应风险之间的关系。另外，应更多关注订货频率在供应失败事件存在的情况下是如何影响客户服务和运输绩效的。而且这样的研究应该与实际的供应风险评估等进行交互对比。在未来的研究模型中，企业的利润绩效与供应风险之间的关系将是一个值得研究的课题。

供应风险的管理是一个复杂的系统工程，在管理过程中，最为关键的是企业在正常运作过程中对供应风险水平的评估以及针对影响供应风险因素的管理，只有深入了解供应链系统中影响供应风险的各要素的动力机制并进行针对性的管理，才能使企业尽量降低由供应风险带来的损失。

## 6.3 供应风险应对策略及其计算实现

### 6.3.1 引言

供应链是在给最终顾客提供产品和服务的不同过程和活动中涉及的上下游互相联系的组织网络。在网络的各个结点上分布着生产厂家、仓储企业、零售商和顾客等。由于供应链这种环环相扣和互相依赖的特点，作为供应链上的一个结点企业，在实际运作过程中会面临大量诸如需求不确定、信息不对称以及供应商不稳定等随机因素，这些因素的存在导致供应链管理中的巨大风险性（雷臻和徐玖平，2004）。除了这些日常风险外，近些年来，一些频发的重大突发事件（如生产事故、自然灾害、恐怖袭击等）使人们意识到我们正处于一个突发事件频发的社会时期，而突发事件对于企业与供应链管理所造成的影响也是巨大的。在上述的供应链风险的应对中，人们采用和借鉴了风险管理的方法和技术解决供应链的风险问题，从风险的识别、评估和管理等角度进行了大量的研究，提出了大量的柔性契约和应急管理措施（吴军等，2006；Tang, 2006）。

在供应链面临的风险中,供应风险是最为平常和突出的,供应风险引发的严重后果引起了企业界和学术界的广泛关注。自从应急管理概念提出以来(Causen et al., 2001),国内外学者从不同的角度对供应链应急管理进行了相关研究。Qi等(2004)针对突发事件造成需求突变情况,首次研究了如何设计数量折扣策略来应对突发事件。其后,众多学者针对不同的假设,研究了突发事件下数量折扣、价格折扣等契约的设计问题(Xu et al., 2003;于辉等,2005(a);于辉等,2005(b);胡劲松和王虹,2007)。另外一些学者从库存控制角度研究供应中断下的最优库存和生产管理策略,这些文献大多把供应不确定表示为连续或离散的Markov过程,模型建立在经典的EOQ, EPQ,(s, S)等模型的基础之上(Moinzadeh and Prabhu, 1997; Parlar, 1997; Arreola-Risa and DeCroix, 1998; Mohebbi, 2003; Snyder, 2006)。除了上述运作方面的问题, Tomlin(2006)研究了存在供应中断风险下的供应商战略选择问题。作者研究发现,供应商的正常运转时间比例以及中断的特性(少但长、频繁但短)是买者最优策略的首要决定因素。其后, Tomlin 和 Snyder(2006)进一步研究了当中断风险随时间随机变化时,买者如何从战略上设置预防性措施以缓解中断带来的后果。

在企业的实际运作中,多源供应方法常常是应对这类不确定性而采取的措施之一。Smeltzer 和 Siferd(1998)指出当组织减少自己的供应者数目时,就会过度依赖于少数的几个供应者供应重要的原材料,这或许会增加他的供应中断的风险,此外,当主要的零部件等外包给这些供应商时,他们对这些供应商的依赖程度增加,这样以来对整个组织甚至整个供应链而言会增加供应的高风险。Bakos 和 Brynjolfsson(1993)用定量模型得出了在非完备合约的情形下,买主应选择的最优供应商数,得出了“在买主为供应商投资提供激励能获得很大收益的情形下,无论选择更多供应商的合作成本多么低,买主选择与少数供应商保持更紧密的合作伙伴关系是一种最优选择”这一重要结论,但其模型没有反映现实中选择供应商应考虑的一些关键因素,如产品市场环境、产品特征、价格稳定程度、供应商的生产能力与边际利润率、买主与供应商相对地位等。钟德强等(2003)在此基础上综合考虑了市场环境、产品特征、价格稳定程度等因素,依据合作竞争理论,建立合作竞争环境下的供应商数量优化模型。分析了合作竞争环境下各种因素对买主应选择的最优供应商数量的影响,以及最优供应商数量随各种条件的变化趋势。Kelle 和 Miller(2001)研究了包含需求分配的单源供应和多源供应,作者以供应商仅能满足小部分订单来表示供应商的不可靠,以最小化缺货库存为目标函数,研究结果表明在提前期的不确定性无法降低的时候,多源供应比单源供应更能使企业获益。类似的研究还有 Gurnani 等(2000), Dada 等(2003), Tomlin 和 Wang(2005)。

上述这些研究中供应不确定性多是运作过程中生产、运输等的不确定引起的,与此不同,另外一些学者研究供应中断导致的供应不确定时,考虑了供应商的数量决策等问题。在单源供应中,如果存在供应中断,买者只能通过库存来缓解相应的供应风险(Song and Zipkin, 1996; Moinzadeh and Aggarwal, 1997; Parlar, 1997; Arreola-Risa and De Croix, 1998)。Parlar等(1996)和Gürler等(1997)是比较早研究在供应中断下的多源采购问题的,这两篇文章都考虑了买者面临两个相同成本、无限供应能力的供应商,供应商有来自于内部的不同的中断概率和恢复时间分布,以数值实验研究买者相对满意的库存订货策略。在供应中断下,Berger等(2004)采用决策树方法研究如何进行供应商数量的决策,作者考虑了两个特殊的情形,即所有供应商都中断和仅有-一个供应商中断,通过建立期望成本函数,采用决策树方法决定最优的供应商数目。在此基础上,Ruiz-Torres 和 Mahmoodi(2007)扩展了Berger等(2004)的模型,假定有任意数目的供应商中断,并构造了相应的成本函数,同时还研究了所有的供应商有相同的中断概率和不同的中断概率两种情况,作者同样采用了决策树方法进行最优供应商数目的求解。但是由于没有考虑需求在所选择供应商中的分配问题,基于此,Ruiz-Torres 和 Mahmoodi(2006)扩展了这一假设,作者同时考虑了供应中断风险以及需求在供应商中的分配问题,进而构造了与中断风险和分配到的订单数量相关的成本函数,另外作者还考虑了供应商的供应柔性约束,同样通过决策树方法进行了供应中断概率、产出柔性、供应商中断成本等一系列灵敏度分析。

以上这些研究都是采用数理分析的手段,通过建立严格的数学模型进行相关分析。值得注意的是,随着计算机模拟方法的发展,一些学者开始采用模拟的手段研究供应链的应急管理。Kull 和 Closs(2008)首次采用仿真软件 Arena (Kelton et al., 2004)模拟供应风险下的库存策略,作者建立一个包括客户、零售商、分销商、供应商等四级的序列供应链模型,研究供应商存在的供应中断风险对零售商库存等的影响,研究结果表明,当第二级供应商存在供应中断风险时,仅仅增加库存水平未必有效,相反可能会进一步增加供应风险。Snyder 和 Shen(2006)采用模拟方法研究了多级供应链中供应不确定性和需求不确定性的区别。作者建立了几组实验模型,分别研究了订货频率、仓库设置和供应链结构等问题,通过数值模拟发现两类不确定情况下完全不同的最优策略,并且讨论了产生这些差异的原因。

由于供应链的成员企业是自主和半自主的主体,他们往往在动态的联盟中追求自身利益的最大化,近些年来快速发展的多代理技术以其分布性、自治性等优点很好的符合了供应链的这些特点,引起了学术界的关注。多代理方法已被证实是一个评价供应链现象的有效工具(Swaminathan et al., 1998; Troy et

al., 1998)。

在上文人工供应链模型构建的基础上,本节采用基于代理的计算实验方法,通过对人工供应链中各个代理功能的详细划分和建模,从合同提前期、购买价格、供应商产能、目标库存、需求不确定性、供应关系的稳定性和供应商最优数目的决策等几个方面分别进行了研究,从人工供应链中不同个体的角度探讨了不同供应风险下的应对策略,以期对现实运作提供一定的指导。

### 6.3.2 问题的描述

在一个既定的供应链网络中,网络的每一层分布一定数量的企业,并且各层的企业有不同的行为属性和偏好。终端的零售商直接面临随机的市场需求,它们根据预测的需求和现有库存水平进行综合决策,向自己的第一级供应者订货,而零售商的第一级供应者向其第二级供应者订货,依此类推。上游的供应者加工生产,有一定的生产能力,且有固定的生产提前期。供应链中的各 Agent 在订货、生产、满足需求等过程中获得利润的同时都会产生订货费用、存储费用、缺货费用和固定运作费用等成本。

在实际运作中买卖双方在供货初期就供货价格、供货提前期等一系列条款签订供货合同。然而,由于自然因素、机器故障和原材料等原因会导致上游供应者的生产中断,从而无法满足下游买者的订单,这些未满足的订单在生产恢复以后优先得到满足。供应链中的各人工主体根据角色的不同,有不同的功能,相应的工作流程系统有所差别。在系统的长期运行过程中,本节试图通过计算实验方法,在前文所建立的人工供应链平台的基础上探讨在面临突发应急事件时,作为下游买者如何采取有效措施来最小化供应风险带来的冲击,以及探讨在不同的供应链系统环境中,相关措施的适用性等问题。

### 6.3.3 供应链模型构建

在本节的研究中,分别建立一个两级供应链系统和一个四级供应链系统,在两级供应链系统中,参与的 Agent 分别是零售商 Agent 和制造商 Agent,其中制造商 Agent 的原材料没有容量限制,但是有生产能力限制;而在四级供应链则包括零售商 Agent、分销商 Agent、制造商 Agent 和原材料供应商 Agent,其中制造商 Agent 和原材料供应商 Agent 都有生产能力限制。下面以四级供应链系统为例,对供应链中各 Agent 进行详细建模:

#### 1. 零售商 Agent 建模

零售商面临的市场需求是随机的,并且每个周期都发生。在每个周期开始时,零售商检查库存到货情况,用于满足客户需求;周期结束时,进行需求预测并

制定下个周期的订货策略。零售商 Agent 的事件处理流程如图 6.10 所示。

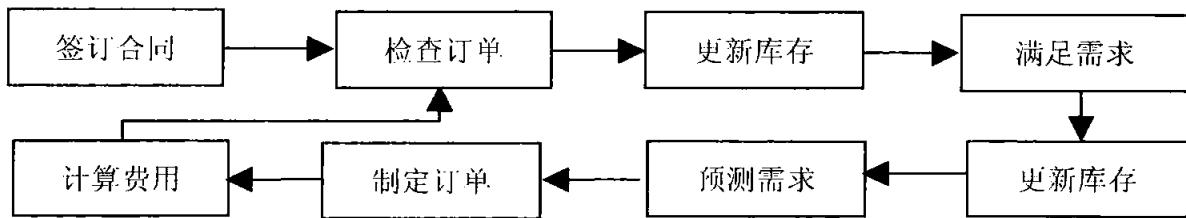


图 6.10 零售商 Agent 的事件处理流程

根据零售商的事件处理流程,本节将零售商 Agent 的功能分为合同管理、库存管理、订单管理、需求管理、成本管理等五大功能,具体说明如下:

**合同管理功能:**在整个销售期开始阶段,零售商选择供应伙伴,并与之签订合同(具体包括合同编号、合同的支付价格、合同的提前期、选择的供应商编号等)。

**库存管理功能:**在每个周期初,检查库存,更新库存水平;在周期末,更新库存水平;决定采用何种库存策略。

**需求管理功能:**在每个周期内用在库品满足客户需求,记录需求的满足情况,包括卖出货物和缺货情况;在期末,预测下个周期的需求量,决定选择何种预测方法。

**订单管理功能:**在期初,根据合同规定,检查应到的订单情况并记录到货情况,同时通知库存管理功能收取货物;根据库存管理传递过来的库存信息以及需求管理传递过来的预测需求,计算下个周期的订货量;将订单信息传递给供应商。

**成本管理功能:**在每个周期结束后,零售商 Agent 计算本周期的销售收入以及成本(包括订货成本、库存成本、缺货成本等)从而获得本周期的利润。

在本模型中,假定市场需求服从  $(\mu, \sigma^2)$  的正态分布,零售商选择供应商 J 签订合同,规定采购价格  $c$ ,订货提前期为  $l$ 。另外,零售商采用传统的 OUT 策略进行订货,并且设定订货到达后的库存量为  $S$ ,且零售商的最大库存能力为  $S_M$ 。在需求的预测中,零售商代理的需求管理功能采用简单的指数平滑法预测下一个周期的需求。以  $t$  表示某零售商的当前周期,在周期  $t$  末对周期  $t+1$  内需求的均值和标准差的预测值为:

$$\hat{\mu}(t+1) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \mu(t-i) \quad (6.11)$$

$$\hat{\sigma}(t+1) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} [\mu(t-i) - \hat{\mu}(t-i-1)]^2} \quad (6.12)$$

其中  $n$  为预测时间窗。

零售商 Agent 的需求管理功能预测出周期  $t+1$  需求的分布后,在周期末,库存管理功能计算本周期结束后的现有存货库  $I(t)$  以及库存水平  $IP(t)$ :

$$I(t) = I(t-1) + R(t) - D(t) \quad (6.13)$$

$$IP(t) = I(t) + O(t) - B(t) \quad (6.14)$$

其中,  $R(t)$  表示在周期  $t$  接受到的来自供应商的供应量;  $D(t)$  表示周期  $t$  的实际需求;  $O(t)$  表示零售商的在途订单;  $B(t)$  表示截至周期  $t$  零售商的累积缺货订单。根据 OUT 规则,库存管理功能确定周期  $t$  订货的目标库存水平为

$$F(t+1) = l \cdot (\hat{\mu}(t+1) + \delta\sigma(t+1)) \quad (6.15)$$

根据当前的库存水平  $IP(t)$ ,确定订货量为

$$Q(t+1) = F(t+1) - IP(t+1) \quad (6.16)$$

并将此信息传递给订单管理功能,并由后者负责传递给供应商进行采购。

之后,零售商 Agent 的费用管理功能根据需求管理功能、订单管理功能、库存管理功能等传递的信息计算销售收人和各项成本,包括订货费用、库存费用、缺货费用。

## 2. 分销商 Agent 建模

分销商 Agent 直接接收来自零售商的订单,然后根据自己的库存、发出订单等信息,向它的供应者订货,其事件处理流程和零售商的类似,所不同的是它接受的订单来自于零售商。

另外,为简单起见,本节同时也将分销商 Agent 的各类功能划分为五类,与零售商类似,并且在需求的预测和目标水平的制定等方面也分别采用指数平滑预测和 OUT 订货规则。

## 3. 制造商 Agent 建模

制造商 Agent 直接接收来自分销商的订单,与前两者不同,制造商 Agent 有两个库存点:产成品库存和原材料库存,而且要进行加工生产,制造商有生产能力限制,并且由于各种不确定性可能会产生中断,无法对下游产生供应。由于制造商的生产和原材料采购,因此对制造商 Agent 功能的划分在原有功能的基础上增加原材料管理功能和生产管理功能。具体说明如下。

**原材料管理功能:** 在每个周期末,将自己的可用库存信息传递给生产管理功能,接受来自产成品库存的信息、生产管理功能的信息,根据原材料库存现状制定订单,然后将此信息传递给订单管理功能,完成订货。

生产管理功能:在每个周期末,接受来自需求管理功能对需求的预测等信息,库存管理功能的产成品信息、原料管理功能的原材料信息等,进行生产计划制定,并组织生产,同时将生产情况告知原料管理功能。

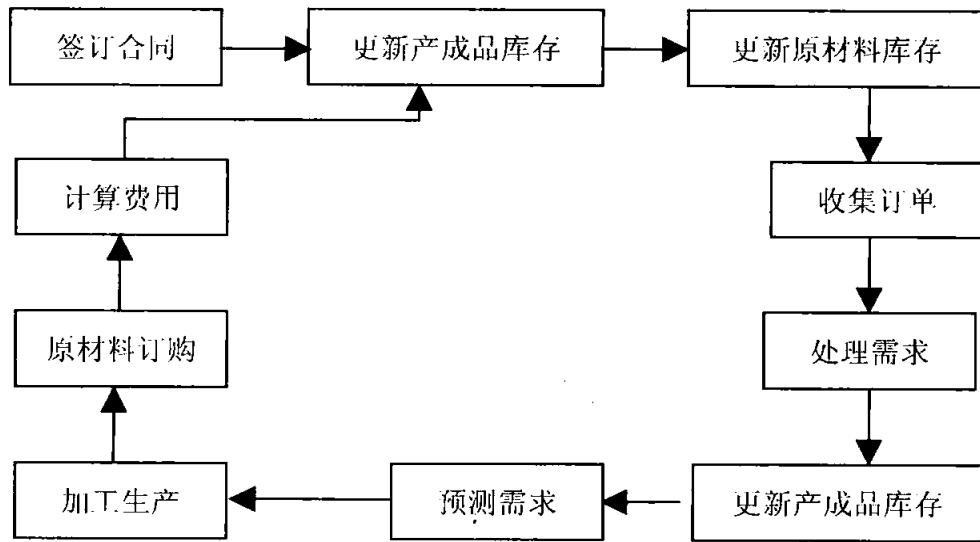


图 6.11 制造商 Agent 的事件处理流程

制造商根据对下游需求的预测和现有产成品库存、原材料库存等信息安排生产,并将这些信息传递给原材料管理功能,由原料管理功能负责完成原材料的出入库等相关操作,制造商 Agent 的相关事件处理流程如图 6.11 所示。

在需求的预测中,本节仍然假设制造商 Agent 采用移动平均法进行预测。

在生产计划制定过程中,制造商采用 OUT 策略进行生产,其目标库存量设定为  $F_M^*(t+1) = L_M(\hat{\mu}_M(t+1) + \delta\sigma_M(t+1))$ ,其中  $L_M$  为制造商的生产提前期。

制造商在  $(t, t + L_M)$  内的期望库存量为:  $I_M(t) + \sum_{\tau=1}^{L_M} P_{t+\tau} - U(t)$ , 其中  $I_M(t), U_M(t)$  为制造商在  $t$  时间结束后的期望库存量和缺货量,  $\sum_{\tau=1}^{L_M} P_{t+\tau}$  为  $(t, t + L_M)$  内累计的生产订单。

由于生产提前期的存在,因此,在  $t + L_M$  结束后的期望库存为:

$$I_M(t + L_M) = I_M(t + 1) + \sum_{\tau=1}^{L_M} P_{t+\tau} - U(t + 1) - \sum_{\tau=1}^{L_M} \hat{D}_{t+\tau} \quad (6.17)$$

据此,制造商可以制订出生产计划,

$$P(t + L_M) = F_M^*(t + 1) - I_M(t + L_M) \quad (6.18)$$

$$0 \leq P(t + L_M) \leq R(t) \quad (6.19)$$

$$0 \leq P(t + L_M) \leq P_M^*(t) \quad (6.20)$$

其中  $P(t+L_M)$  是  $t$  周期末制定出的生产计划产量, 同时是  $t+L_M$  周期末的产出量,  $R(t)$  是  $t$  周期末的原材料库存量,  $P_M^*(t)$  为  $t$  周期末的制造商 Agent 的最大生产能力。

生产计划制定好并且进行生产后, 制造商的原材料管理功能根据现有原材料库存进行原材料订货决策, 具体的决策如下:

原材料管理功能采用 OUT 策略进行订货, 原材料订货到达的目标库存量设定为  $R^*(t+1) = L(\hat{\mu}_M(t+1) + \delta\sigma_M(t+1))$ , 其中  $L$  为原材料的订货提前期。本节以  $IP_M^r(t)$  表示制造商在  $t$  周期末的原材料的净库存量, 同样由公式(6.13)、(6.14)所得, 故原材料订货量为:

$$Q_M^r(t+1) = R^*(t+1) - IP_M^r(t) \quad (6.21)$$

得出原材料订货量后, 制造商根据几种订单分配规则进行订单量的分配, 具体在下文的规则设定中讲解。

#### 4. 供应商 Agent 建模

供应商每个周期都要接受来自下游买者的订单, 它们根据库存水平和库存策略安排生产以满足订单需求。在模型中, 本节假定供应商的生产能力有一定限制, 此外, 由于受到自然因素、机器故障等的影响, 供应商会发生无法生产的情况, 从而导致零售商订单的积压。待生产恢复以后, 由于缺货需要补充, 供应商优先供应累积订单。类似于零售商代理的处理流程, 供应商的事件处理流程如图 6.12 所示:

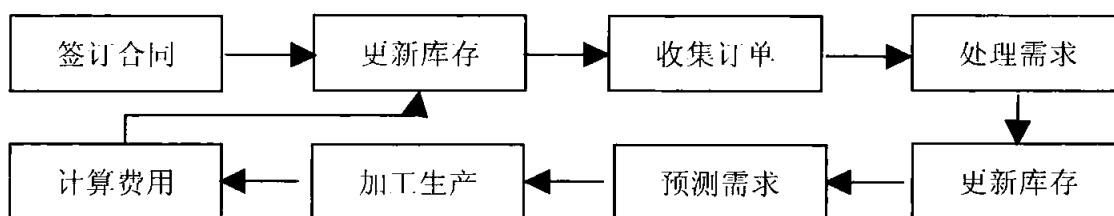


图 6.12 供应商 Agent 的事件处理流程

根据供应商代理的事件处理流程, 本节将代理的功能划分为合同管理、库存管理、订单管理、需求管理、生产管理、成本管理等六大功能。

在周期最初阶段, 供应商代理的合同管理功能完成与零售商关于订货价格和订货提前期等方面达成一致意见, 签订合同。

此后在每一个周期内, 供应商代理首先由其库存管理功能检查前一个周期生产情况, 更新库存水平; 随后订单管理功能收集来自零售商的订单, 计算所有需求总和; 供应商代理的需求管理功能处理订单, 满足需求, 同时记录下来供应情况和缺货情况; 库存管理功能根据订单处理情况更新库存; 根据目前需求情

况,需求管理功能预测零售商下一个周期需求分布;之后,根据需求分布预测值、自身的生产提前期和生产能力,供应商生产管理功能完成生产计划的制定,并组织生产;最后成本管理功能计算本周期的销售收人和各项成本,从而计算出本周期的利润。

在库存更新过程中,供应商代理应用和零售商类似的公式(6.13)、(6.14)更新其库存状态,其中公式(6.13)中  $R(t)$  表示供应商在周期  $t$  的生产量;而供应商的预测也按照公式(6.11)和(6.12)采用移动平均法。另外,本节假设在生产计划制定过程中供应商同样采用 OUT 策略进行生产,而目标库存量设定为  $F_s(t+1) = L_s(\hat{\mu}_s(t+1) + \delta\hat{\sigma}_s(t+1))$ 。

供应商在  $(t, t+L_s)$  内的期望库存量为:  $I_s(t+1) + \sum_{\tau=1}^{L_s} P_{t+\tau} - U(t+1)$ , 其中  $I_s(t+1), U_s(t+1)$  为制造商在  $t$  时间结束后库存量和缺货量,  $\sum_{\tau=1}^{L_s} P_{t+\tau}$  为  $(t, t+L_s)$  内累计的生产订单。因此,  $t+1$  时供应商的生产量为:

$$V = \min \left\{ K_{t+1}, F_M(t+1) - \left( I_M(t+1) + \sum_{\tau=1}^{L_M} P_{t+\tau} - U(t+1) \right) \right\} \quad (6.22)$$

供应商的生产管理功能据此安排生产以满足零售商的需求。

### 6.3.4 计算实现过程

#### 1. 基本假设

(1) 人工供应链中的 Agent 是有限理性的,他们有不同的行为偏好。假定个体决策者理性上追求他们的满意程度、成本收益以及他们所试图寻找的目标函数(或效益)的最大化,但在每一步实际决策中,根据历史行为的结果,受到其认识的局限,知识获取的限制等,往往采取自身认为最优的行为。

(2) 任一时刻,Agent 可获取的信息是有限的,Agent 对信息的处理能力也是有限的,他们的决策只是在有限信息的基础上进行的,通常都是根据自己的信息作出反应。

(3) 在多源供应的选择中,买者 Agent 在任一时刻的行为直接受组织系统中其他相邻 Agent 行为的影响。但是每个 Agent 行为的影响是局部的、有限的,但可能通过 Agent 间的相互作用在系统结构中传播,也就是说组织中每个 Agent 的行为都会对其他成员有影响,比如某个竞争 Agent 选择多源供应可能会导致本来单源供应的个体无法有效取得货物。

(4) Agent 的每一个行为决策取自有限个数的行为规则集合, 在演化中由于外部选择压力而不断淘汰“获利”较小和近期不用(或使用最少)的规则, 新的行为规则可通过学习或自身变异而产生, 并且可以继承(复制、遗传)。

## 2. 几个规则

### (1) 多源供应下的订单分配规则

当买者选择多个供应商的时候, 买者需要给这些供应商分配不同数目的订单量。多供应商环境下的订单分配已有相关的文献进行研究(Kawtummachai and Van Hop, 2004; Geng and Mallik, 2007), 但这些文献大多是基于静态环境的, 即供应商的数目是给定的, 而且多是基于单周期。本节在此处采用如下几个订单分配规则:

#### A. 平均分配原则

即按照所选择的供应商的总数进行平均分配。假定买者(对应于供应链网络结构图中节点  $v$ )选择了一组供应商, 且其总的订货量为  $Q$ , 则分配给某一个供应商(假定对应于网络结构中节点  $i$ )的订单量为  $Q_i = \frac{Q}{|I_v|}$ ,  $i = \{u \mid (u, v) \in I_v\}$ 。

#### B. 根据交互历史的记录分配

按照交互历史中买者对供应伙伴的信誉评价进行分配。假定买者选择了  $n$  个供应商, 在分配订单的时候从供应商管理功能中获取目前选择的供应商的历史交互信誉, 对于一个完全没有交互过的供应商, 买者给他赋予平均值为 0.5 的信誉(详见平台构建中的供应商管理功能介绍)。假设供应链结构图中的节点  $v$  是一个买者, 它的某一个供应商(对应于节点  $i$ )的信誉为  $cr_i$ , 则该买者赋予此供应商的权重为  $w_i = \frac{cr_i}{\sum_i cr_i}$ ,  $i = \{u \mid (u, v) \in I_v\}$ , 最终此供应商得到的订单

量为  $Q_i = \frac{cr_i}{\sum_i cr_i} Q$ 。

#### C. 根据每个供应商提供的价格进行分配

买者偏好价格, 给予价格较低的供应商较高的权重。在买者(对应于网络结构中的节点  $v$ )选择的供应商集合中, 假定某个供应商(对应网络结构中的节点  $i$ )提供的价格为  $P_i$ , 则买者给该供应商赋予的订单分配权重为:  $w_i = \frac{v_i}{\sum_i v_i}$  其

中:  $v_i = 1 - \frac{P_i}{\sum_i P_i}$ ,  $i = \{u \mid (u, v) \in I_v\}$ 。

## (2) 买者选择供应商的规则

根据前文的介绍,买者选择具体的供应商有若干个规则,包括根据价格和信誉进行选择;根据价格和提供的数量进行选择;根据价格、提供的数量和供应商的信誉进行选择。此处本节也用这些规则进行具体供应商的选择。但是重点说明买者更改供应商数目的规则,主要包括增加供应商数目和减少供应商数目。另外,在多智能体环境中,本节要赋予 Agent 一个相对智能的选择机制,使其能够根据周围的环境进行自动的增加和减少供应商数目的相关决策。

假定每个买者 Agent 和供应商所签订的合同都有一定的长度  $len\_contr$ , 如果合同到期了, Agent 计算和当前供应商合作过程中的平均收益  $\sum \pi / len\_contr$ , 记为  $\bar{\pi}_1$ 。之后, Agent 将之与前一个合同的平均收益  $\bar{\pi}_0$  进行比较。如果  $\bar{\pi}_1 < \alpha_{prof\_am} \bar{\pi}_0$ , 则 Agent 决定进行新的供应商选择, 从而签订新的合同。否则保持原来的合作伙伴关系, 继续维持原来的合同。其中  $\alpha_{prof\_am}$  表示在供应商的选择过程中, Agent 对于利润的敏感度。若  $\alpha_{prof\_am} = 1$ , 则表明 Agent 对于利润的下降极度敏感,  $\alpha_{prof\_am}$  的值越小, 表明 Agent 对利润下降的敏感度越低; Agent 重新选择供应商的方式有两种: 第一种, 更改供应商的数目, 具体包括剔除一个较差的供应商、增加一个新的供应商; 第二种, 保持供应商数目不变, 重新更换供应商, 此处具体介绍删除供应商和增加供应商的机制:

### A. 删除一个供应 Agent

在合同周期  $len\_contr$  内, Agent 考察自己的累积缺货和累积需求, 分别记为  $\sum quantity\_back$ ,  $\sum demand$ 。另外, 假定每个 Agent 均有一个表示服务水平的变量, 此处指允许缺货的水平, 记为  $\alpha_{selSupp\_del}$ , 如果累积缺货量  $\sum quantity\_back < \alpha_{selSupp\_del} * \sum demand$ , 则 Agent 决定删除一个信誉最差的供应 Agent。通常信誉的计算有多种, 本节以接收到的供应商实际提供的产品数量与所下达的订货数量的比值表示供应商的信誉值。显然, 若 Agent 接收到的货物与所订的数量相同, 则赋予该供应商信誉值为 1。(下文同)。

### B. 增加一个供应 Agent

在合同周期  $len\_contr$  内, Agent 考察自己的累积缺货和累积需求, 分别记为  $\sum quantity\_back$ ,  $\sum demand$ 。另外, 假定每个 Agent 均有一个表示需求偏差的容忍度变量, 记为  $\alpha_{selSupp\_add}$ , 如果累积缺货量  $\sum quantity\_back > \alpha_{selSupp\_add} * \sum demand$ , 则 Agent 决定增加一个供应 Agent, 具体选择哪一个新

的 Agent 可以根据不同的选择规则进行决策。

### 3. 计算的实现过程

在上文所构建的人工供应链的基础上,构建四层供应链,具体的计算实现采用如下的处理过程:

- (1) 构造一个四级的供应链网络,包括零售商、分销商、制造商和供应商,指定每级的个体总数,并赋予唯一的编码;
- (2) 限定运算的迭代次数,完成人工供应链模型的初始化;
- (3) 基于人工供应链模型,根据各个 Agent 的不同行为,完成他们满足需求、递交订单、安排生产、计算成本等一系列工作流程;
- (4) 在演化计算过程中,根据各 Agent 的输入和输出及其变化,综合计算各个企业 Agent 和本行业的一些状态变量的变化,形成下一步计算的输入;
- (5) 在各个 Agent 不断交互和竞争过程中,计算各 Agent 不断的学习和适应性的变化;
- (6) 在每一步的演化过程中,对 Agent 的有关属性和行为偏好及 Agent 所在行业的有关属性等参数进行统计、存储以便输出。

### 6.3.5 实验结果与分析

#### 1. 基本设置

根据上述模型,本节首先研究两级供应链系统,分别为零售商和制造商,其中制造商的原材料管理功能拥有无限的原料供应,但生产能力有限,且存在中断行为。零售商代理和制造商代理均根据上述各自的事件处理流程进行循环运算。给定零售商的初始库存为 200,制造商初始库存为 500,其生产提前期为 10 天。需求服从于均值为  $\mu$ ,方差为  $\sigma^2$  的正态分布,零售商和制造商签订的合同主要包括购买价格  $w$  以及提前期  $l$ ,在实验中,根据不同的实验目的,分别设定不同的  $w$  值与提前期  $l$ ,除特别说明外,实验中  $w = 9$ ,  $l = 6$ 。另外,零售商的市场零售价  $p_r = 16$ ,其缺货成本  $c_b = 2.0$ ,库存成本  $c_h = 0.2$ 。制造商的生产成本  $c = 6$ ,其最大的生产能力为  $K$ ,由于众多原因,制造商代理的中断概率为  $p$ 。本节进行了五组实验,从零售商的角度分别探讨制造商不同中断概率下,制造商的产能、合同的提前期等对零售商平均利润以及零售商客户服务水平的影响。所有实验均运行 5000 个周期,除去最初的 2000 以及最后的 1000 个周期,取中间的 2000 次运行结果进行平均当作零售商的平均利润和零售商客户服务率的平均水平,另外,为尽量消除随机因素的影响,所有实验在相同的条件下运行 500 次,取平均值作为最终的评价结果。

## 2. 二级供应链系统中供应风险应对

### (1) 制造商不同的产能下,零售商的平均收益

为研究存在供应风险下,制造商产能对零售商平均利润的影响,分别取制造商的最大产能  $K = 150, 200, 250, 300$ , 通过实验得出零售商面临不同的供应风险下的平均利润,如图 6.13 所示。在低供应风险下,制造商的产能对零售商的平均盈利没有显著影响,而随着供应风险的增大,选择高产能的制造商能够给零售商带来更多的利润。而且选择高产能的制造商作为合作伙伴能够使零售商有效抗击中断风险,如图所示,当  $K = 300$ , 即使制造商中断概率为  $p = 0.3$  仍能保持较高盈利。为进一步分析在不同的中断概率下制造商产能的增加对零售商的影响,以制造商产能  $K = 150$  为基准,分别计算  $K$  每增加 50 时,零售商平均利润的变化值,然后进行平均,以此作为  $K$  增加 50 时零售商的平均利润增加量,记为  $\Delta\pi$ ,通过实验得出  $\Delta\pi$  在不同的概率  $p$  下的变化曲线如图 6.13(b) 所示。可见,随着  $p$  的增加,在制造商提高相同程度的产能时,零售商利润的增加量  $\Delta\pi$  总体呈现上升趋势,但是也并不是  $p$  越大  $\Delta\pi$  越大。图 6.13(c) 描述的是以  $K = 150$  时零售商的平均利润为基准,利润变化量所占的基准值的比例(即  $\Delta\pi/\pi$ )。由图可见,虽然  $\Delta\pi$  并不是随着  $p$  的增加而增加,但是  $\Delta\pi/\pi$  与  $p$  的变化趋势一致。由此,零售商在选择制造商时,除了考察传统的诸如价格、服务率等,还要注意当存在供应风险时,要重点考虑制造商的供应能力,这一点可以从制造商的规模反映,当供应风险很小时,制造商供应能力的评价权重可以适当降低,而当供应风险很高时,应该加大供应能力的评价权重。

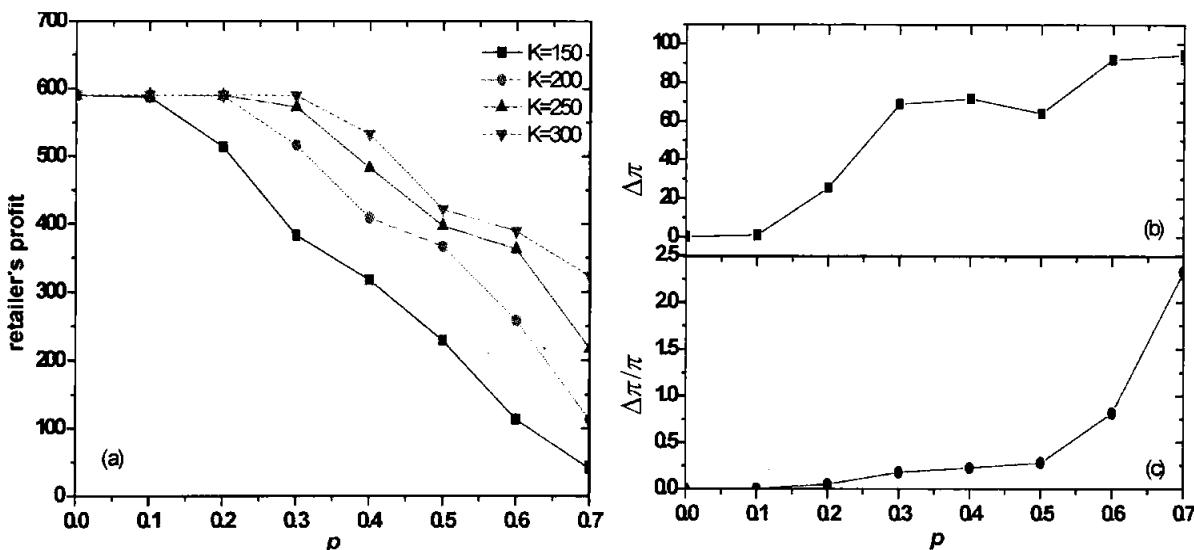


图 6.13 不同中断概率下制造商产能对零售商平均利润的影响

### (2) 不同的中断概率、不同的合同提前期设定对零售商利润的影响

为研究提前期对零售商利润的影响,本节设定制造商的产能  $K = 200$ ,需求服从  $\mu = 100, \sigma = 30$  的正态分布。在不同的中断概率下,提前期的变化对零售商的平均利润的影响如表 6.6 所示。

表 6.6 不同中断概率下,合同提前期的变化对零售商平均利润的影响

中断概率 提前期\ 提前期	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
2	590.24	590.41	590.76	525.1	433.7	382.06	265.85
4	590.1	590	590.05	528.23	417.08	370.74	261.14
6	590.59	590.33	589.49	516.23	409.06	366.76	258.63
8	590.13	589.84	587.73	513.26	396.23	358.1	249.62
10	590.55	589.22	586.89	504.79	387.5	355.76	238.89
12	590.66	589.59	583.38	501.48	380.44	347.74	232.85

由表 6.6 可见:A. 在给定的合同提前期下,随着制造商中断概率的增加,零售商的平均利润总体上呈现出下降的趋势。只有当  $l$  很小以及制造商的中断概率很小的情况下,零售商的平均利润随着中断概率的增加呈现不规则变化。B. 当制造商的中断概率较低时,从系统运行长远的角度分析,双方合同的提前期的设定对零售商的利润的影响很小。从表中,当制造商的中断概率为 0, 0.1 时,对于不同的合同提前期,零售商的平均利润变化很小,尤其是制造商平稳运行时,零售商的平均利润均稍大于 590。C. 当制造商有较高的中断概率,如表 6.6,当  $p > 0.1$  时,在给定中断概率下,随着合同提前期的增加,零售商的平均利润出现下降趋势,尤其是当中断概率较大时,下降幅度更加明显。

### (3) 合同周期长度的影响

通常情况下,长期合同由于保证了稳定的供应,可以使零售商获得更高的收益,在中断存在情况下,长期合同是否还能够带来这样的优势?在多制造商环境下又有会带来什么样的影响?本实验研究在中断风险下,零售商签订长短期不同的合同,探讨合同长度在供应风险下对零售商平均利润的影响。本节以  $CL$  表示零售商和制造商签订合同的长度,由于系统总运行为 10000 次,故本节设定  $CL = 10000$  为最长的长期合同,即在整个过程中零售商不再更换合作伙伴;而以  $CL = 200$  表示最短的合同,同时又取  $CL = 1000, 2000, 5000$ ,计算在这五组不同的合同长度下,零售商的平均利润。本节首先研究零售商选择一个制造商的情形,同时假定制造商的中断概率为 0—0.45,通过仿真计算,得到如表 6.7 所示结果。

表 6.7 存在中断风险时,不同合同长度下零售商的平均利润

合同长度 \ 中断概率	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
200	587.65	586.35	583.96	542.91	464.76	417.66	404.08	396.39	395	385.25
1000	586.53	586.08	584.89	582.28	570.5	531.76	476.06	423.07	397.02	385.05
2000	586.44	586.14	585.62	584.85	576.91	550.98	502.08	439.55	398.94	384.33
5000	588.38	588.56	588.17	587.29	583.91	557.68	512.26	450.24	400.55	385.98
10000	590.02	589.94	589.93	589.77	586.83	564.19	517.71	455.32	407.2	389.26

根据上表,A. 在双方签订的合同中,在同一长度的合同下,随着中断概率的升高,零售商的平均利润呈现下降趋势。针对不同长度的合同,其下降幅度也呈现不同变化,在所有长度的合同中,随着制造商中断概率的增加,零售商利润的下降幅度总是先增后减,呈现类凹函数的变化趋势;并且随着合同长度的增加,使零售商平均利润下降幅度达到最大的中断概率也有增加的趋势,如图 6.14 所示;B. 在低中断概率下,合同长度的变化并没有使零售商的平均利润产生较大影响,而随着中断概率的进一步升高,合同长度的增加可以使零售商获得更高的收益,如表 6.7 示,当  $p = 0.1, 0.4$ , 合同长度的增加使零售商的平均利润明显上升;而随着中断概率的进一步升高,当  $p = 0.45$ , 合同长度变化带来的影响又无明显的趋势。

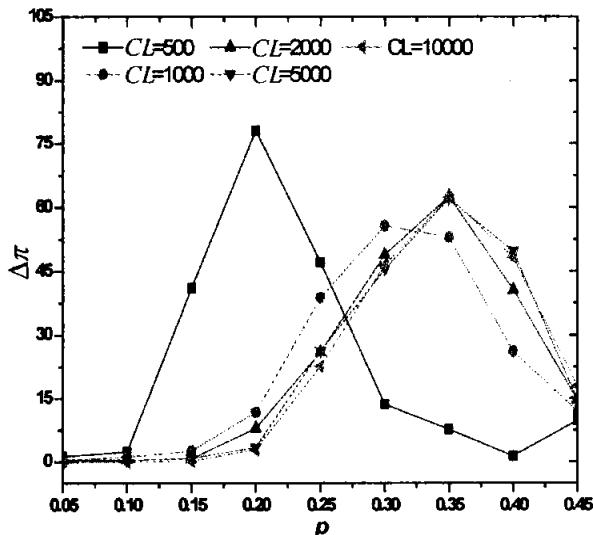


图 6.14 不同的合同长度下,中断风险变化带来的零售商平均利润下降幅度趋势

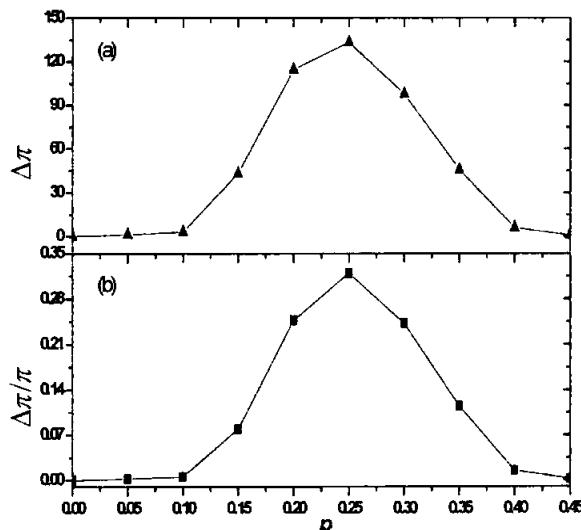


图 6.15 中断风险下,合同长度增加对零售商利润变化的影响

为了更加明显的表示不同中断概率下合同长度的作用,以最短合同下的平均利润为标准,分别计算其他类型合同下的收益与其之差,然后取平均值,记为  $\Delta\pi$ ,得出  $\Delta\pi$  随中断概率的变化趋势,如图 6.15(a)所示。另外,为表示相对变化的情况,图 6.15(b)描述了基于最短合同下收益的相对变化比例(以  $\Delta\pi/\pi$  表

示)。由图示,  $\Delta\pi$  与  $\Delta\pi/\pi$  的变化也类似于一个凹函数, 均呈现先增后减的趋势, 且在  $p = 0.25$  时达到最大值。因此, 在制造商存在中断风险的情况下, 对零售商来说, 很低和很高的风险下合同的长短对其影响很小, 而只有当风险在有限的范围内, 合同长短带来的影响才会非常明显, 本节姑且称在这一范围内的风险为有效风险, 在有效风险内零售商更应该选择长期合同。

本节随后研究了两个制造商的情形, 根据实验(1), 零售商只有在中断概率很高时才选择两个制造商。因此, 在实验中, 本节设定制造商的中断概率为 0.35~0.7。在零售商决定的合同长度到达后, 零售商同时终止和两个制造商的合作, 转而选择新的合作伙伴, 此时采用随机选择的方法。由图 6.16 所示, 当零售商选择两个制造商时, 在给定合同长度下, 随着中断概率的升高, 零售商的平均利润出现大幅下降。与仅有一个制造商情况时不同的是, 在本节实验的八个中断概率中, 多数情况下合同的长度对零售商平均利润的影响很小, 只有中断概率  $p$  在 0.45, 0.65 变化的过程中, 最短合同下的收益明显少于其他类型的合同, 而其他情况下零售商合同长短对平均利润没有明显影响。此外, 最长的长期合同在所有的中断概率下并非总是使零售商的平均收益最高, 尽管其收益与最优收益相差很小。

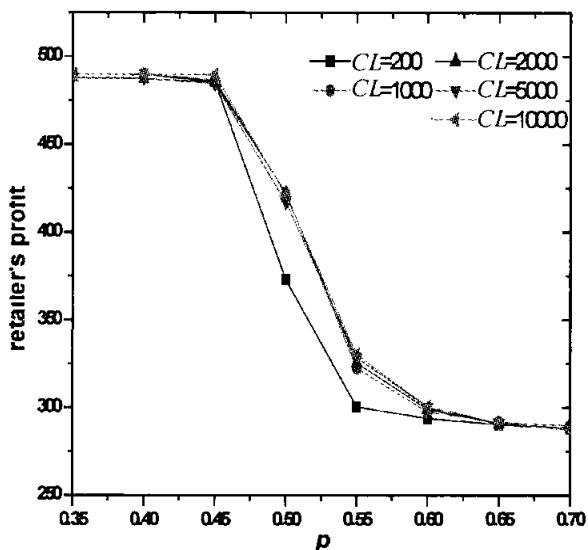


图 6.16 选择两个供应商时, 不同中断风险下零售商的平均利润

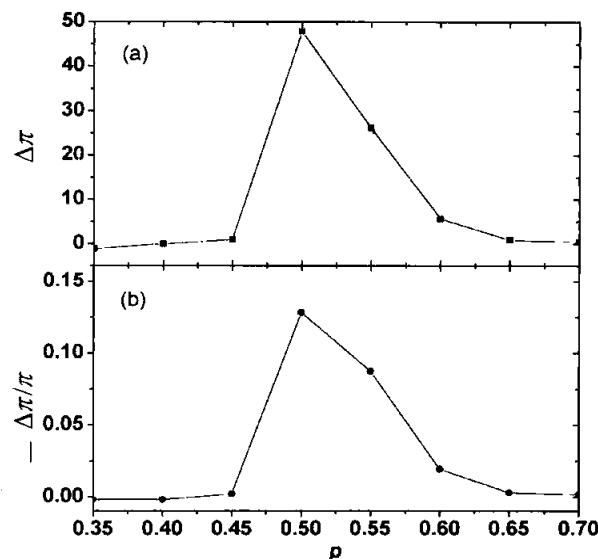


图 6.17 选择两个供应商时, 不同中断风险下合同长度增加对零售商利润变化的影响

与图 6.15 相似, 图 6.17 表示的是当零售商选择两个供应伙伴时, 不同供应中断概率下合同长度变化对零售商平均利润的影响, 其中图 6.17(a)表示合同长度变化带来的零售商平均收益的增幅变化情况, 而图 6.17(b)表示变化的相对比例, 即相对增幅, 同样以最短合同下的零售商平均收益作为基准。图 6.17 显示的结果和图 6.15 类似, 零售商平均收益的绝对增幅和相对增幅的变化趋势均类似于凹函数曲线。与仅有一个制造商相比, 在两个制造商情况下, 零售商的

有效风险变大,  $p$  由 0.1 增加到 0.45, 而且有效风险的范围有减小的趋势, 由  $(0.1, 0.4)$  变为  $(0.45, 0.65)$ 。另外一个明显不同是, 在两个制造商情况下, 合同变化带来的平均收益的绝对增幅和相对增幅都明显小于一个制造商的情形, 这一结果更加证实了高中断风险下多制造商的抗风险性。

#### (4) 不同中断概率下的多源供应选择

面对不同的供应商中断概率, 零售商为了保持较高的客户服务水平和平均利润, 是否需要选择数目不同的供应商? 本实验假定零售商面临的需求服从  $\mu = 100, \sigma = 30$  的正态分布, 和每个供应商订货发生的固定费用为 100; 另外, 为了更加清楚的表示中断概率的大小与零售商平均利润和客户服务率的关系, 本节设定供应商的生产能力为 200, 远大于实际的市场需求, 这样本节可以设定较高的中断概率(0—0.8), 从而更加清楚的表示两者的关系(当然可以设定较小的供应商生产能力以及较小的中断概率, 但是从比较两者关系的角度不影响最终的结论)。在供应和需求都存在不确定情况下, 零售商可以选择多个供应商, 在本实验中, 本节设定最多可以选择 4 个供应商, 得到如图 6.18 所示的零售商平均利润和客户服务水平。

由图 6.18(a)可得: 当中断概率较小时, 零售商选择一个供应商带来的利润最高, 而随着中断概率的上升, 选择两个供应商可以获取更高的平均收益, 当中断概率进一步增大, 三个供应商成为最佳选择。然而由于供应商的维持费用和固定的订货费用, 进一步增加供应商的数目反而导致费用的上升。如图, 在已有条件下, 如果选择四个供应商, 零售商的平均收益仅在高中断概率下高于一个供应商下的平均收益; 选择多个供应伙伴可以有效地抗击供应风险, 随着供应伙伴的增加, 零售商的抗风险能力显著加强。由图 6.18(a), 当零售商分别选择 1—3 个供应商时,

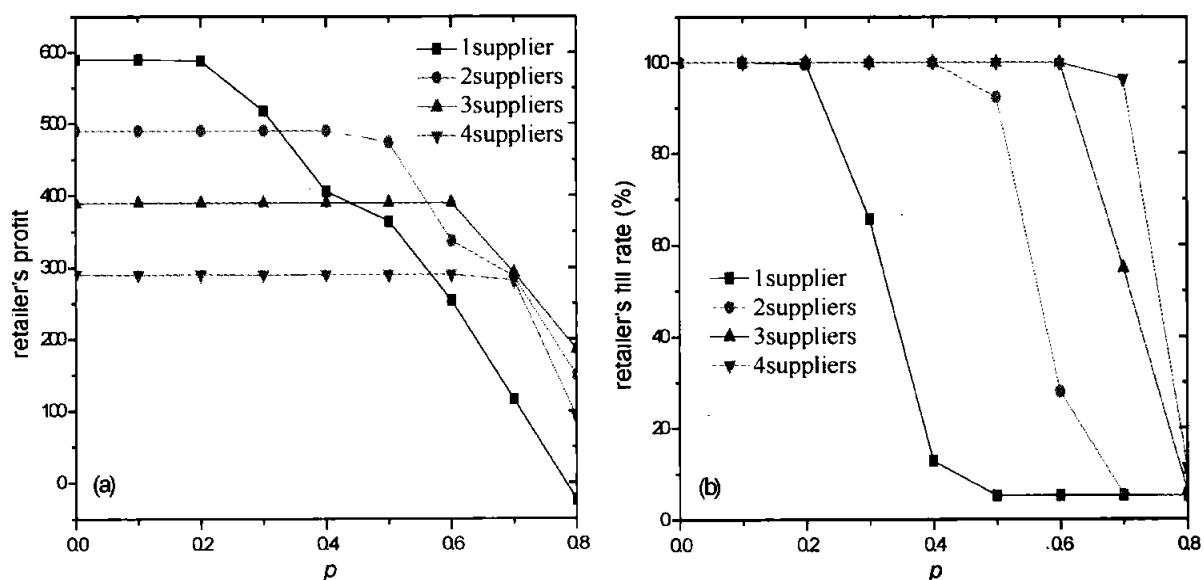


图 6.18 中断风险下, 选择不同数目供应商时的平均利润和客户服务水平

其平均利润曲线的下降点位置逐渐延长,也即其抗风险能力逐渐加强。

图 6.18(b)表示的是零售商的客户服务水平的变化趋势,尽管在图 6.18(a)中,当零售商选择较多供应商时,由于固定订货成本等的影响导致平均利润出现不规则变化,但是其客户服务水平却呈上升趋势。由图 6.18(b),当零售商有四个供应伙伴时,在中断概率  $p = 0.6$  时仍然可以维持接近 100% 的客户服务水平。

以上讨论的是供应不稳定下多源供应的情况,下面讨论在需求突变的情况下,零售商选择多源供应的利润和客户满意率的变化情况。假设供应商的产能分别取 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200 不同的值。而需求在第 500 个周期的时候发生突然变化,需求的均值变为原来的 2 倍,并且持续到第 1500 个周期。通过如此设定,本节试图研究在需求突变的情况下买者的多源供应策略。图 6.19 表示的是当零售商选择数目不同的供应商时,在供应商不同的产能下,零售商的客户满意率和利润。由图可见,当需求激增,而供应商的产能无法满足激增部分的需求时,或者供应商产能的增加相对较困难时,在单源供应下零售商的客户满意率和利润都变得很低,而选择多源供应时候这两项指标都达到很高的水平;另外,在零售商选择多源供应策略,选择两个或三个供应商时,随着供应商产能的增加,零售商的客户满意率和利润的变化幅度很小,而当零售商仅选择一个供应伙伴,此时随着上游供应商产能的增加,其利润和客户满意率都有大幅度的上升。因此,在需求发生突变情况下,如果供应商的产能很小,零售商应该选择多源供应的策略,以保证获得较高的利润和客户服务水平。因此,在信息不共享的情况下,零售商无法获知供应商的产能,零售商可以采用多源供应策略来缓解需求突变带来的压力。

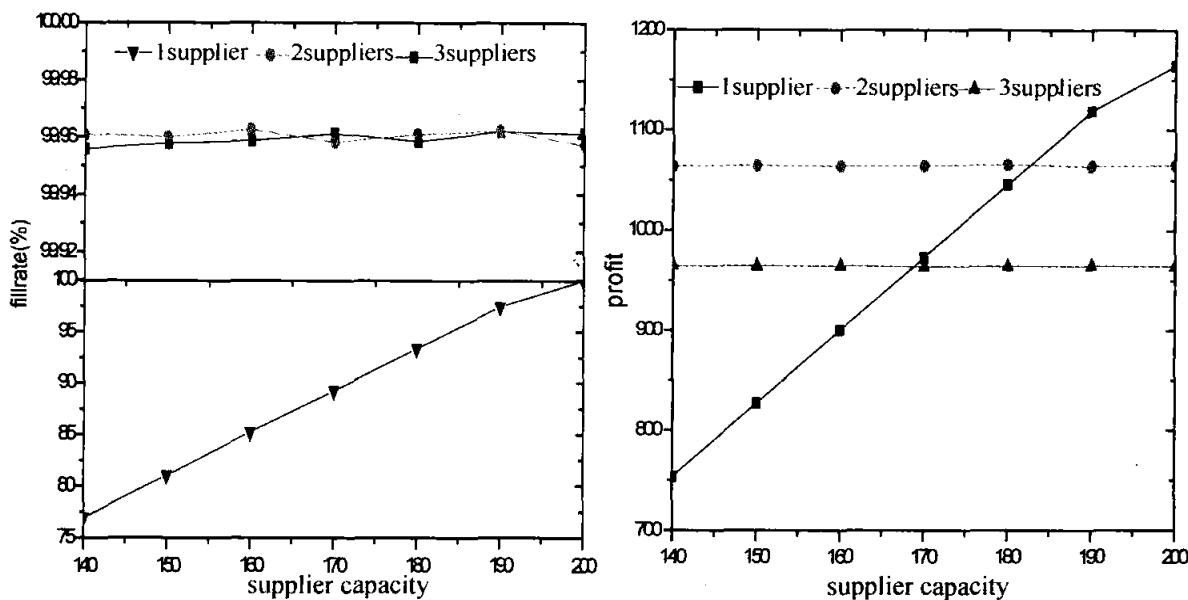


图 6.19 需求突变时,不同供应商产能下选择不同数目供应商的平均利润和客户服务水平

这一实验表明,对零售商而言,越靠近自己的上游制造商发生中断,自己受到的影响越大,而相比较而言层级越高的供应者存在供应风险对自己的影响较小。

### (2) 不同供应关系稳定性下的多源供应问题

本实验研究多级供应链环境下上游供应商的不稳定对下游零售商多源策略的影响。从零售商的角度出发,本节分别构造了三级供应链和四级供应链。为表述方便,下文统称零售商的直接供应商,即供应链网络中  $TIER_2$  为零售商的第一级供应商,而  $TIER_3$  为零售商的第二级供应商,  $TIER_4$  为零售商的第三级供应商。本节从两个方面刻画针对零售商而言的供应不确定性:第一,零售商的各级供应商频繁更改自身的供应伙伴而带来的供应不确定性;第二,零售商的第二级供应商(制造商)和第三级供应商(原材料供应商)面临不确定的中断风险导致下游零售商的供应不确定性。

本节研究三层供应链中的情况。构造三层网络结构,分别代表零售商、分销商、制造商,其中制造商有不同生产能力,生产所需的原材料不受限制。

假定零售商面临的需求和各成本与实验(1)相同,  $TIER_3$  层所代表的供应商的中断概率取 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 分别代表从低到高的中断风险。 $TIER_2$  层的分销商与其上游供应商签订的合同有一定的长度,记为  $len\_contr$ , 本节以合同长度的长短表示供需双方关系的稳定程度。另外,由于此处主要研究分销商与其上级供应商的合作关系变化对零售商的影响,所以本节假定零售商与其第一级供应商的关系是长期稳定的。在供应链网络中,下游的买者选择供应商时都是基于供应商的价格和提供的产量,而供应商的订单分配遵循的是价格优先的策略。

首先研究零售商的第一级供应商与第二级供应商之间合作关系对零售商的影响,得到如图 6.21 所示的不同合作稳定程度下的平均利润和客户服务水平。

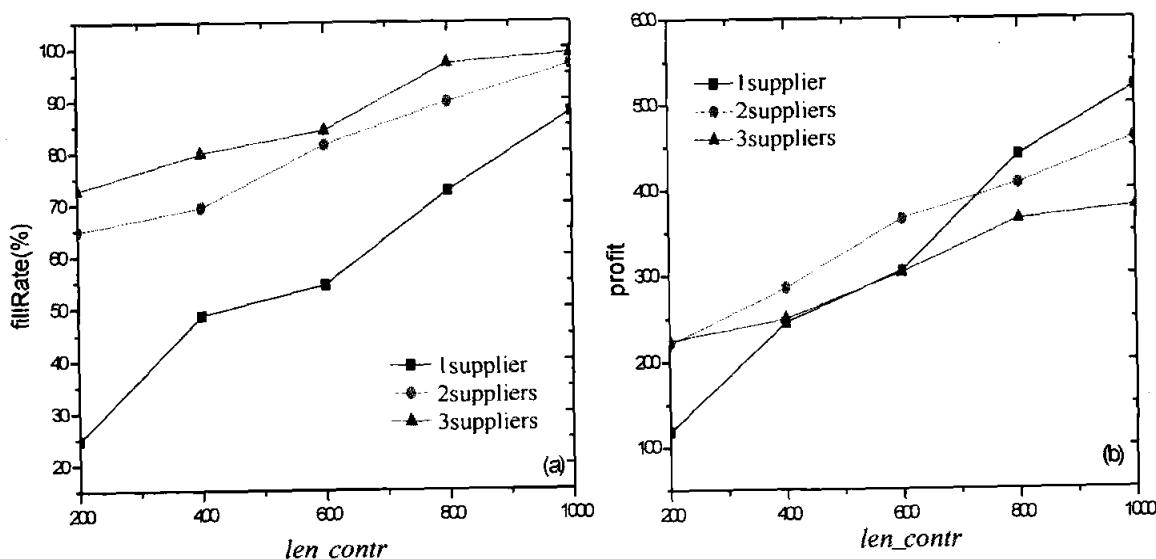


图 6.21 不同供应关系稳定程度下零售商平均客户服务率和平均收益

由图 6.21(a)可见零售商的第一级供应商和第二级供应商之间买卖关系的稳定程度对零售商的客户满意率和利润会产生重要的影响。当分销商和供应商之间买卖关系的稳定程度较高时,如  $len\_contr = 800, 1000$ , 零售商的客户服务率达到较高的水平,即使零售商选择一个供应伙伴其客户满意率也达到 70% 以上。此外,由图可见,上游的供应商之间买卖关系的稳定程度很大程度上影响了零售商的供应商数目选择决策,当上游的供应关系很不稳定时,零售商选择多个供应伙伴能够获得较高的客户满意率。如图,  $len\_contr$  取 200 时,零售商如果仅选择单个供应商,其客户满意率才为 25% 左右,而选择三个供应商时其客户满意率可以达到 75% 左右。图 6.21(b)显示的是利润的相应变化,可见,由于多源供应导致固定成本的增加,因而零售商选择多源供应并非总是带来自身利润的增加,当分销商和供应商的买卖关系相对稳定,  $len\_contr$  取 800, 1000 时,零售商的利润随着采取多源供应策略而变得下降,此时采取单源供应获益最大。随着上游供应者买卖关系稳定性的降低,多源的优势逐步显现出来,当  $len\_contr \leq 600$ , 零售商选择两个供应商可以带来更高的收益,当  $len\_contr$  取最小值 200 时,零售商选择三个供应伙伴能带来较高收益,尽管与两个供应伙伴相比优势不是非常明显,但还是远远大于仅有一个供应伙伴时的收益。

### (3) 不同供应能力下的多源供应问题

本节建立一个 4-4-4 的供应链网络模型,当供应商的产能是 100 和 150 时,供应商的中断风险分别为 0.1—0.4 时,市场供应量没有增加的情况下,本实验试图研究多源供应的适用情况。

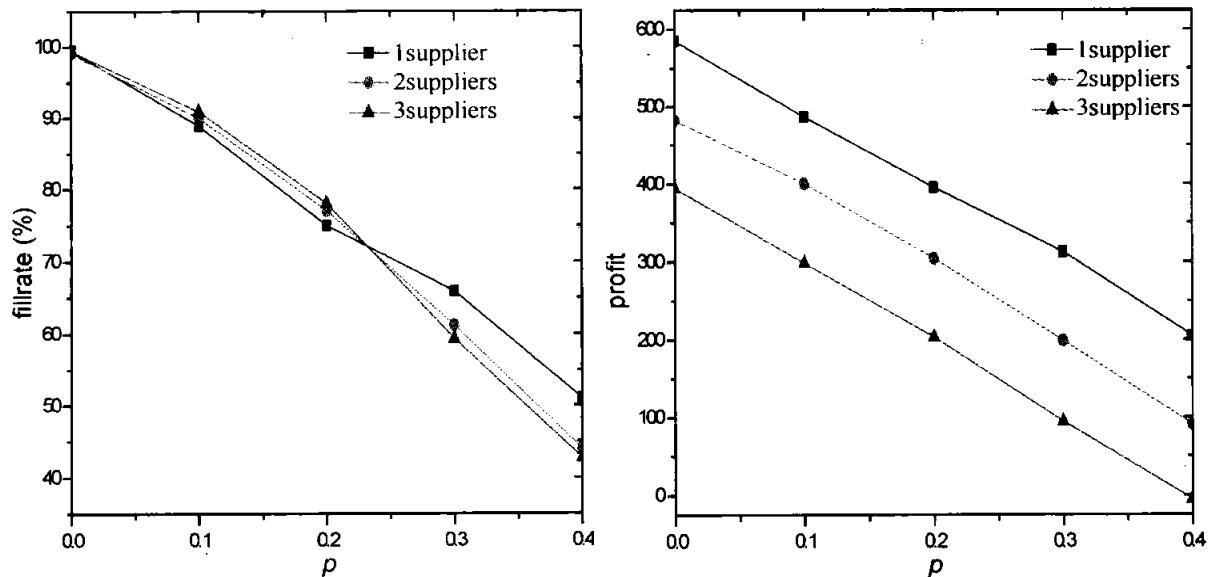


图 6.22 供应商的产能是 100 时,不同中断概率下的多源供应结果

由图 6.22 可见,当市场上供应量很少,远远达不到需求时,此时零售商采取多源供应策略反而进一步损害自己的利益。从获利角度讲,由于选择多个供应伙伴需要较多的供应商维持成本、订货成本等,故在市场供应不足时,零售商选择多个供应伙伴会使自己的利润大幅下降,而且随着供应失败概率的增加,利润也呈现直线下降趋势。在此种情况下,客户服务率情况则呈现较复杂的变化,由图 6.22 在供应失败概率较小的时候,  $p \leq 0.2$ , 零售商选择多源供应能够小范围的提高客户服务率,而当供应失败率增加,当  $p = 0.3, p = 0.4$  时,多源供应反而使客户服务率变得更为低下。

以上研究的是供应商的最大供应能力是 100 的情况,进一步扩大供应商的供应能力,设定为 150,而保持供应链的结构不变,得到如图 6.23 所示的不同供应商中断概率下的零售商采用多源供应的客户服务率和利润变化趋势图。

当供应商的生产能力达到 150 时,市场的供应增加,此时,零售商选择多源供应可以提高其客户服务水平,与供应商的产能是 100 时不同,随着供应失败率的增加,零售商的客户服务率没有呈现直线式下降,其供应商的较大产能起到了重要的缓冲作用。此外,零售商选择多个供应伙伴能够显著的提高自己的客户服务水平。右图反映的是当供应商的生产能力是 150 时,多源供应下的零售商利润。可见,由于和每个分销商建立伙伴关系需要花费大量的成本(程序中设为固定的 100),因此当零售商采用 2 个和 3 个供应商时,利润呈现大幅下降趋势。

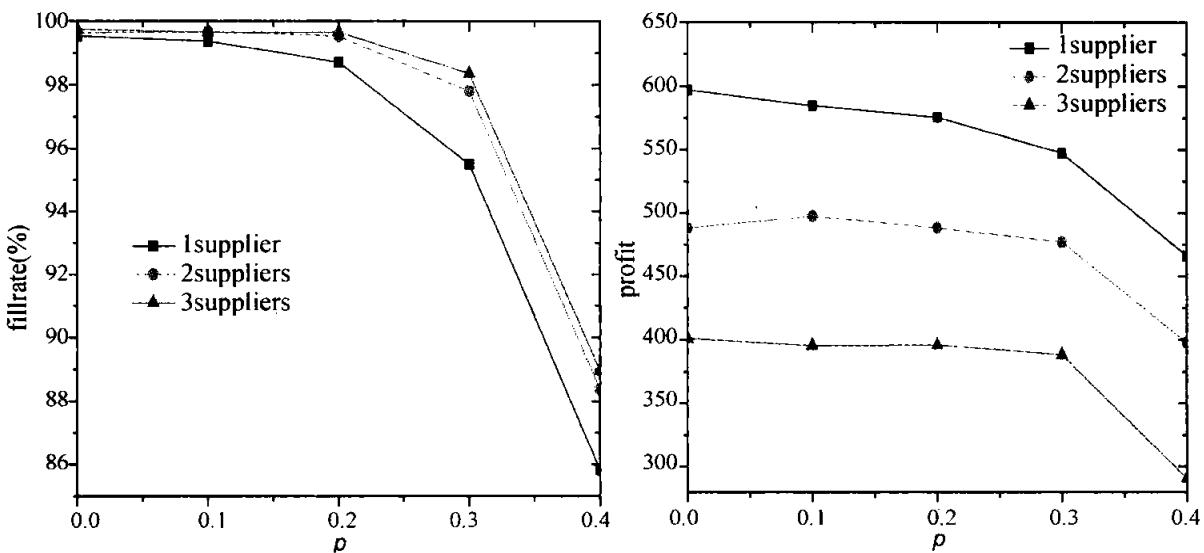


图 6.23 三级供应链中,供应商的产能是 150 时,不同中断概率下的多源供应结果

为进一步研究多源供应的适用情况,本实验在三层网络的基础上构造了四层网络结构,分别表示零售商、分销商、制造商和原材料供应商。其中  $TIER_1$  层有四个个体,而其他的各层均有六个个体。制造商和原材料供应商的最大生产

能力都是 100, 原材料供应商存在生产过程的中断风险, 制造商是稳定无风险的。本节研究市场容量固定且可以满足市场需求的情况下, 零售商的多源供应策略。

在四级供应链中, 首先设定所有个体在选择供应伙伴时均采用单源供应策略; 进而设置零售商选择两个供应商, 研究仅零售商采用多源策略下的客户服务率和利润; 然后保持零售商选择两个供应伙伴不变, 让供应链网络中  $V_{TIER_1}$ ,  $V_{TIER_2}$ ,  $V_{TIER_3}$  均选择两个供应伙伴, 然后计算零售商的客户服务率和利润。经过数值实验得到如图 6.24 所示的计算结果。

根据图 6.24, 可以得出如下结论:

A. 当零售商选择单个供应伙伴时, 其客户服务水平随着上游供应伙伴失败率的增加而呈直线下降, 利润量也呈现类似的直线下降趋势。

B. 在供应链网络中, 当零售商仅选择两个供应伙伴时, 零售商的客户服务率相比单源供应时有大幅的提高, 总体趋势也随着上游中断概率  $p$  的增加而呈直线下降趋势, 此时零售商的利润水平也随着  $p$  的增加而呈现直线下降趋势。当原材料供应商的中断概率  $p$  较小的时候, 单源供应策略下的利润远高于多源下的盈利。而随着  $p$  的进一步增加, 当  $p > 0.2$  时多源供应下的盈利开始超越单源供应下的盈利。

C. 当供应链网络中所有的买者都采用多源供应策略, 零售商的客户服务率达到三种状况下的最高水平, 并且当上游中断概率  $p$  较小时仍能保持很高的客户服务率(接近 100%), 即使  $p$  达到 0.4, 零售商仍能达到高于 85% 的客户服务水平。在这种结构下零售商利润变化如图所示, 当中断概率高于 0.1 时, 零售商

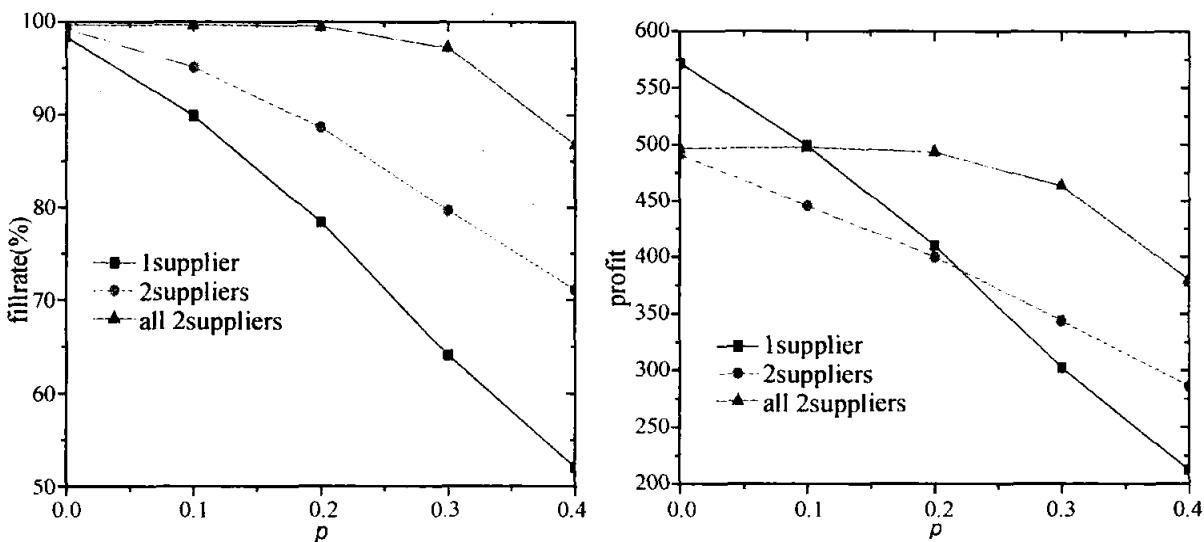


图 6.24 四级供应链中, 供应商的产能是 150 时, 不同中断概率下的多源供应结果

的利润开始超过单源供应策略下的利润,而随着  $p$  的进一步增加,这种趋势变得更加明显。此外,当  $p \leq 0.2$  时,零售商的利润变化不是非常明显,只有当中断概率进一步增加,零售商的利润才有明显的下降趋势。

### 6.3.6 小结

供应中断是近几年供应链领域的一个研究热点,现有研究大多采用数理模型分析中断发生后的恢复策略。本节采用基于代理的计算实验方法研究不同供应链结构中当存在供应中断风险时零售商的应对策略,并且探讨了不同市场环境下各类参数对零售商的影响。本节从合同提前期、制造商产能、制造商最优数目的决策等几个方面分别进行了实验。文中考虑了制造商的生产能力限制以及基于交互历史的零售商订单分配策略,同时各个制造商的中断是完全独立和随机的。

实验结果表明:(1)在中断频发的情况下,零售商更应该选择规模较大的制造商进行合作而降低风险,此外,在高中断风险下,制造商产能的增加能够带来零售商平均收益的相对增加量同步上升;(2)在系统运行平稳状态下,当中断概率较小时,合同提前期对零售商的平均收益无较大影响,而当中断概率较高时,零售商更加倾向于小的提前期。

在中断风险下零售商的长短期合同决策问题的研究中,本节提出了“有效性风险”的概念。研究结果表明:(1)中断概率升高的情况下,适当增加制造商的数量可以有效地降低零售商的风险,而过多的制造商却会降低制造商的平均收益,但是可以维持较高的客户满意率。(2)当零售商面临较低和较高风险时,合同长度变化对零售商的平均收益的影响很小,而当中断风险介于较大风险和较小风险之间时,长期合同可以明显改善零售商的收益,本节称这些风险是零售商的有效风险。当选择两个供应伙伴时,有效风险的值变大,同时范围有减少的趋势。

在多级供应链中环境中,针对零售商而言,第一级供应商和第二级供应商之间买卖关系的稳定程度对零售商的客户满意率和利润会产生重要的影响。同时,上游的供应商之间买卖关系的稳定程度很大程度上影响了零售商的供应商数目选择决策。对零售商而言,越靠近自己的上游制造商发生中断,自己受到的影响越大,而相比较而言,层级越高的供应者存在供应风险对自己的影响较小。

# 基于计算实验的供应链 网络设计问题研究

## 7.1 基于计算实验的逆向 物流网络优化设计

### 7.1.1 引言

随着科学技术的快速进步和全球经济的快速发展,产品生命周期日渐缩短,更新换代的速度也随之加快。而由高经济增长和产品快速更新换代导致的废弃物污染也引起了各国政府和学者重视。20世纪90年代以来,循环经济(Circular Economy)思想受到了政府和社会的认可。一种与环境和谐、充分运用“资源——产品——再生资源”的反馈式模式的减量化的循环经济发展模式逐步受到各国政府重视与运用(岳辉,2007)。而我国在2004年的中央经济工作会议上提出了大力发展循环经济的决议,把发展循环经济、建立循环型社会看作是实施可持续发展战略的重要途径和实现方式。

作为循环经济的重要理论支撑,逆向物流理论的研究和完善也在欧美学者的带动下逐步兴起。国际权威组织美国后勤管理协会在其公布的《供应链全景——物流词条术语2003年9月升级版》中对逆向物流给出如下解释:“由于修理和信誉问题,对售出及发送到顾客手中的产品和资源的回流运动实施专业化的物流管理。”在《中国国家标准物流术语》则将逆向物流分解为两大类:“回收物流(Returned Logistics):不合格物品的返修、退货以及周转使用的包装容器从需

方返回到供方所形成的物品实体流动。废弃物物流(Waste Material Logistics):将经济活动中失去原有使用价值的物品,根据实际需要进行收集、分类、加工、包装、搬运、储存,并分送到专门处理场所时所形成的物品实体流动。”

在国内外有关逆向物流的研究中,逆向物流网络的设计、混合库存管理策略以及生产计划与调度、再制造产品定价策略问题等等都是逆向物流研究的热门领域(Krikke et al., 1999; 马祖军和代颖, 2005; 何波等, 2006),而其中逆向物流网络是产品回收循环的载体。在逆向物流中,无论采用什么样的回收分类方法,都必须基于一个优良的逆向物流网络,因此对逆向物流网络结构的研究非常有意义。

目前对于逆向物流网络结构的研究,早期以定性分析居多,近几年在定性分析的基础上,一些学者通过运用简化、假设的手段,用建立数理模型的方法定量研究分析了在特定情形下回收系统网络结构的优化设计,其研究重点主要集中在逆向物流网络层级的构建,成员的确定以及成员选址定位上(达庆利等, 2004)。大多数学者运用的数理模型通常是多级的混合整数线性规划(MILP)模型。其目标函数主要考虑模型运行周期中平均成本最小,模型的约束条件一般为库存容量、设备数量、运输能力以及生产处理能力等约束条件。

通过简化和假设,以数理模型来进行定量分析的研究方法在研究具有不确定性、复杂性很强的对象的情况下往往受到很大制约。随着计算机技术的不断发展,仿真模型的研究方法逐步受到一些学者的重视(李永先等, 2007)。仿真技术对于一些不确定性因素影响下的复杂性系统的研究非常有效。逆向物流网络系统具有高度的系统复杂性与“从多到少”的特性(达庆利等, 2004),因此非常适合运用仿真技术来进行研究。我们主要运用仿真模型来研究逆向物流系统中固体废弃物逆向物流网络的建立与结构优化。

### 7.1.2 逆向物流网络的功能、类型与研究内容

#### 1. 逆向物流网络的功能界定

从目前对逆向物流网络的各类研究来看,逆向物流活动根据产品类型和回收用途的不同,其活动的差别很大。但在不同的逆向物流网络中主要存在以下五类活动(Fleischmann et al., 2000):回收(collection)、检测/分拆(inspection/separations)、再处理(reprocessing)、再配送(re-distribution)和处置(disposal)。这五类活动可以说是逆向物流网络结构最基本的构建要素,在每一类具体的逆向物流网络中,这些活动或多或少会有差异。具体而言,回收活动是逆向物流网络第一层次的主要活动,其包括购买、运输和临时存储等一系列的子活动;检测/分拆活动一般发生于逆向物流网络的第二或第三层次,产品回收质量的不确定性决定了这一活动是逆向物流网络构建要素中的关键要素之一;再处理活动一

划分而言,根据研究者研究角度的不同,逆向物流网络的划分会有不同,但是从逆向物流产品回收处置流程而言,逆向物流网络的类型可以划分为再制造与再利用两种类型。不管是运作主体还是服务对象的不同,都不会影响到逆向物流网络的基本系统构架。因此,本节主要从产品处置流程来定义逆向物流网络类型。

### (1) 再制造逆向物流网络

再制造逆向物流网络中再制造节点获取原材料的来源主要是经过产品处置中心对可利用废弃产品处理后获取的整个产品、部件、零件或者其他可利用原料。由于其回收的部件不配套,获取的原材料的品类、数量质量具有不确定性,对于生产企业而言,无法事先做需求预测。而生产出来的产品由于二手部件的存在,在产品定价策略与顾客需求方面也体现出不同。再制造逆向物流网络进行设计时,回收产品的去向可能是原材料生产企业,二手市场、制造企业,其网络结构比较复杂。在研究该类逆向物流网络时,应主要关注再制造节点的布局,如何降低再制造产品原材料持续供给的不确定性以及再制造产品质量的不确定性。

### (2) 再利用逆向物流网络

再利用逆向物流网络针对的对象是经过简单处理后可以再次投入使用的己用物品,集装箱、托盘、可再罐装的玻璃瓶等产品都是可以再利用的产品。而玻璃瓶等商业包装的再利用类似于再制造逆向物流网络,前者是进行简单的清洗和检测,而后者则是需要进行检测、修复、拼装和再加工。再利用逆向物流网络的回收产品路线相对固定,网络呈闭环结构,产品的回收基本由生产产品的公司负责,产品经过简单处理后不存在与原产品质量上的差异问题。研究该类逆向物流网络时,应主要关注该网络中各个节点之间的库存平衡的问题。同时,再利用逆向物流网络可以同正向物流网络结合起来考虑,其中需要多少产品来维持整个系统的运作需求也是可以关注的问题。

## 3. 逆向物流网络的研究内容

基于前文所述逆向物流网络的功能与类型的定义,逆向物流网络的研究可以从研究逆向物流网络的结构特征与系统关联因素两个方面进行(申成霖,2004),所有的研究都因回收产品类别的不同而具有其独特性。

对结构特征的研究可以从逆向物流网络的网络层次、节点数量、网络关联度、合作模式等方面进行研究。

(1) 网络层次。网络层次的研究主要是对逆向物流网络的纵向深度的研究。回收、检测/分拆、再处理、再配送和处置等逆向物流网络基本构建要素如何分布,相互关系如何,该由何种设施进行何种活动都是可以研究的问题。

(2) 节点数量。节点数量的研究主要是对逆向物流网络横向深度的研究。

在一个特定的逆向物流网络中,各种类型的活动如何安排,各个节点在一定区域内如何布置,如何共享资源,如何节约人力物力等都是可以研究的问题。

(3) 网络关联度。网络关联度的研究需要和正向物流结合起来,在对再利用逆向物流网络的研究中,网络关联度的研究非常重要。集装箱、托盘、可回收商业包装在网络的哪一个环节清洗、简单加工、再回收利用,整个过程中正向物流与逆向物流之间的运输、仓储环节如何优化都是可以研究的问题。

(4) 合作模式。合作模式的研究主要是对逆向物流网络的构建主体进行研究。逆向物流网络的建设与运营主体的不同对于整个逆向物流网络的性质与运行效率有很大影响。企业构建逆向物流网络为自己服务,是全部自建,还是部分外包或者全部外包,运作模式的不同对于今后产生的效益会带来很大影响,这些都是可以研究的问题。

对系统关联因素的研究可以从逆向物流网络的产品、市场以及相关资源方面进行研究。

(1) 产品因素研究主要是针对特定逆向物流网络产品的自身特征与经济属性进行研究。产品的回收价值,回收模式(再利用、再制造)会对整个逆向物流网路构建产生重大影响。产品回收流程中各类设施的建设,回收设备的投资,产品回收率以及产品回收后面对的市场等等与产品自身息息相关的各种要素都是可以研究的问题。

(2) 市场因素研究主要是针对从废旧产品回收到再制造、再利用到最后重回市场整个流程中参与该流程的各类成员获取利益以及相互关系的研究。市场因素的研究对于逆向物流网络参与者意义重大,市场因素的变化会导致整个逆向物流网络结构的变化。参与成员之间的利益分配,合作与竞争都是可以研究的问题。

(3) 相关资源因素研究主要是对参与逆向物流网络的设施资源、运输资源、人力资源、环境资源以及相关法律和合同约束等方面进行研究。各项资源之间如何合理调配,如何在特定逆向物流网络所处环境、法律、合同约束下实现效益最大化都是可以研究的问题。

### 7.1.3 逆向物流网络问题描述

逆向物流网络设计的内容一般包括逆向物流网络中处理节点(回收点、再处置中心、再制造工厂、配送中心等)的选址、库存控制、运输路径优化、逆向物流网络组织结构优化等。在逆向物流网络中,其产品流是反向的,一般存在多个供给点和少量需求点,在多个不确定因素(回收时间、回收点需求量、回收质量等)的影响下,逆向物流网络设计变得非常复杂。产品回收流程中的复杂性,逆向物流网络处理节点的层次性及其相互关系以及各处理节点的服务能力限制条件都是

逆向物流网络设计中需要着重考虑的问题。

由于逆向物流网络根据回收产品类别的不同,在网络构建时会有很大的区别,因此目前的研究都是基于某一特定产品来对逆向物流网络进行研究。基于此,本节将以某一类固体废旧产品的回收为研究背景。本节的研究将运用计算实验的方法研究固体废弃物逆向物流网络系统的构建、网络中各类设施的数量、选址以及相互关系。

### 7.1.4 基本模型构建

#### 1. 基本模型描述与条件假设

假设在一个区域内有很多固体废弃物产生点存在,根据固体废弃物产生点的区域范围在其附近设置废弃物回收站,废弃物通过回收站的收集统一送至固体废弃物处置中心进行处理。处置中心负责对废弃物进行检测、分拆。能够利用的部分进行回收,不能够利用的部分送至废弃物焚烧、填埋点集中处理。

在建立模型之前,给出以下的基本假设和说明:

- (1) 固体废弃物类型可设,产生的数量与时间不确定,服从随机分布;
- (2) 废弃物产生(收购)成本可设定,根据废弃物生成点到回收站的距离远近设置不同的回收成本;
- (3) 废弃物回收按照产生点—回收站—处置中心—回收(销毁)的设定流程运作;
- (4) 考虑到废弃物处置过程的特殊性,各个备选地址已知;
- (5) 废弃物的运输费用与距离成线性关系;
- (6) 废弃物回收站、处置中心可以设置处置能力限制;
- (7) 废弃物处置成本约束包括收购成本、运输成本、检测成本、处置(分拆)成本、销毁成本。

模型建立的目标为:逆向物流系统运行周期内满足选定区域内固体废弃物处置平均成本最小。按照模型建立目标,我们建立模型运作流程如图 7.2 所示:

#### 2. Agent 基本模型构建

根据基本模型的组成要素,我们构建了三类 Agent,分别为回收点 Agent,处置中心 Agent 与再制造企业 Agent。

##### (1) 回收点 Agent

根据基本的模型假设,回收点 Agent 负责从废弃物生成点获取废弃物产品,对于废弃物产品进行第一次筛选,获取废弃物的方式为由回收点 Agent 去废弃物生成点自取货物,并将货物送至处置中心 Agent 进行回收处理。回收点 Agent 有选择不同处置中心 Agent 的权利,但是并没有选择废弃物生成点的权

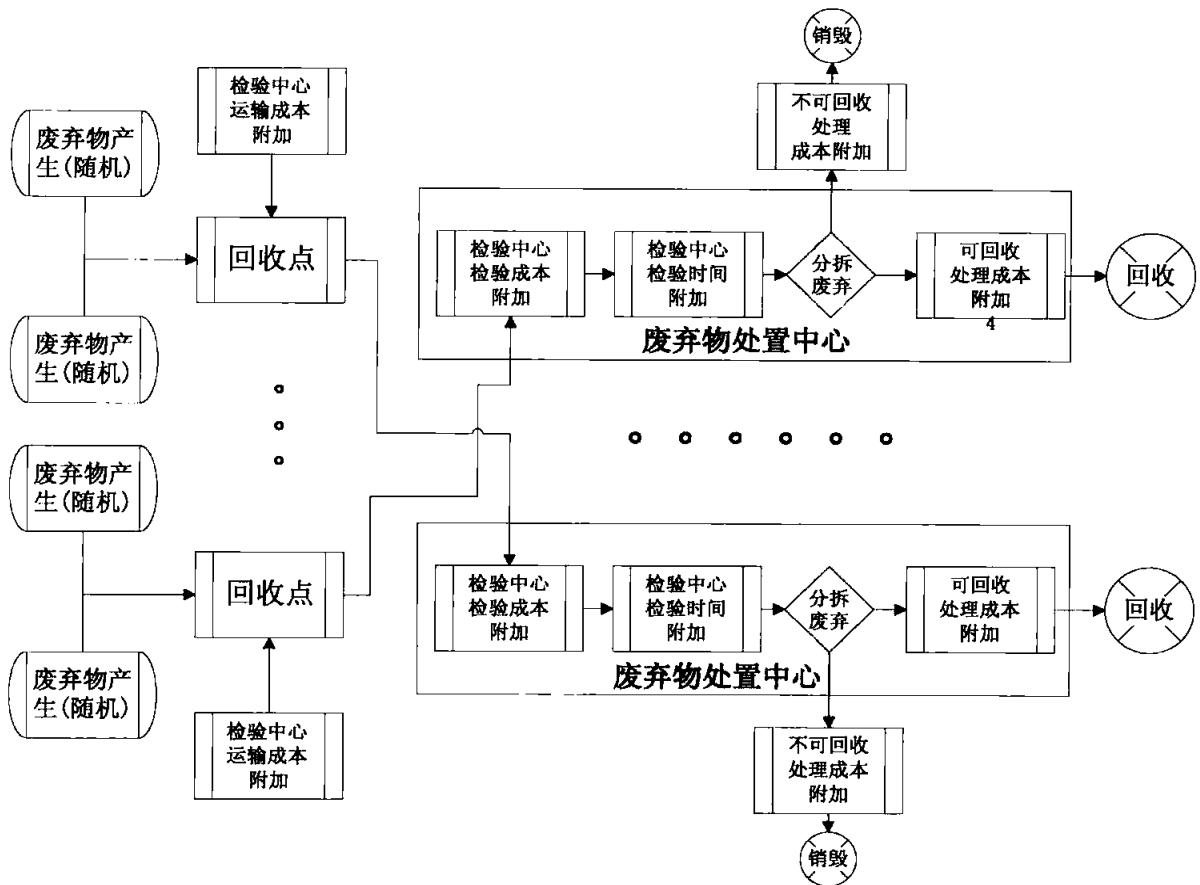


图 7.2 固体废弃物回收网络运作流程

利。回收点 Agent 具体的基本事件处理流程如图 7.3 所示：

回收点 Agent 可具体定义为：

$Agent\_CollectionPoint = (TYPE\_item, StorageC, Price\_Item(A), Price\_TransFrom(A), Price\_TransTo(A), Rate\_Check, Trans\_Limit, Cyc\_Time, Cyc\_Cost, Destory\_Cost, CycLowBdy, CycUpBdy, Cal\_TimePoint)$

各个参数含义如下：

$TYPE\_item$ : 回收物品类型, 在基本模型中回收物品为单一类型, 在进阶模型中回收类型可设;

$StorageC$ : 回收点库存;

$Price\_Item(A)$ : 回收物品价格, 进阶模型中可根据回收物品类型设定不同价格, 以  $Price\_Item(B)$ ,  $Price\_Item(C)$ , ... 为区分;

$Price\_TransFrom(A)$ : 回收物品运输价格一, 具体指回收物品从生成点至回收的点运输价格。根据回收点与生成点远近设定不同价格;

$Price\_TransTo(A)$ : 回收物品运输价格二, 具体指回收物品从回收点至处置中心的运输价格。运至不同处置中心价格不同;

(2) 在系统中每个 Agent 个体的行为受到与其有关系的相邻 Agent 的影响。每个 Agent 对系统的影响是局部的、有限的,但也有部分 Agent 所做的行为会通过 Agent 之间的相互作用影响到整个系统中的 Agent 个体。

(3) Agent 个体的行为规则可以通过学习或变异而产生,并且可以继承(复制、遗传)。

(4) Agent 个体的行为受到系统规则的约束,Agent 无法对系统规则进行改变,但是可以在系统规则约束下改变其自身的行为偏好。

### 7.1.5 随机环境下固体废弃物逆向物流网络基础设计

#### 1. 基本模型运作规则与实现过程

在本节中,我们依据基本假设建立一个四层的逆向物流网络,参与其中的 Agent 分别为回收点 Agent,处置中心 Agent 与再制造企业 Agent。其中回收点 Agent 有库存容量限制,而再制造企业 Agent 与处置中心 Agent 没有库存容量限制,在本节的模型中,我们主要研究在没有再制造企业需求计划影响的前提下,逆向物流网络中处置中心的选址问题以及处置中心与回收点之间的相互配对问题。

基于前文所述的计算实验平台,我们对逆向物流网络进行建模。模型建立之前,设置模型相关的外部约束条件如下:

- (1) 由于废弃物收集需要考虑环境影响,故各备选地点确定;
- (2) 废弃物产生的数量与产生时间服从随机分布;
- (3) 废弃物生成点数量按照区域划分共设置 20 个;
- (4) 废弃物产生点按照离回收点距离的不同分为近中远三类;
- (5) 废弃物回收点按照废弃物生成点集聚区域划分设置 8 个;
- (6) 废弃物回收点只送至距离该点最近的 2 家处置中心;
- (7) 废弃物处置中心按照选定地点设置,最大容量为 5 家;
- (8) 废弃物(单位)运输成本、回收成本、销毁成本已知;
- (9) 废弃物检测、处置成本、废弃物处置中心构建成本各点不同。

根据设置好的外部约束条件,模型的建立符合一定的运行规则,具体的计算实现采用如下的处理过程:

Step1:建立一个四层的逆向物流网络,分别表示废弃物生成点、回收点、处置中心再制造企业与销毁点。

Step2:根据初始假设,生成 20 个废弃物生成点,废弃物生成点位置随机分布,废弃物生成点每个运作周期内服从( $\mu, \sigma^2$ )正态分布随机生成可回收废弃物。

Step3:设定模型运行周期,限定运算的迭代次数,完成逆向物流网络模型中各个实体的参数设置,初始化模型。

废弃物产生点根据其离开废弃物回收点的距离不同运输成本按近、中、远计算可以折算成1、2、3。

废弃物回收点的单位物品回收成本为5,检测成本为2,初次检查合格率为80%,各废弃物回收点至处置中心和焚烧点的运输成本数值假设如表7.1所示:

表7.1 废弃物回收点成本假设

废弃物回收点		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
运 输 成 本	至处置中心 A	6	11	—	—	—	—	—	—
	至处置中心 B	—	7	5	12	—	—	—	—
	至处置中心 C	—	—	7	6	10	—	—	—
	至处置中心 D	—	—	—	—	4	5	3	10
	至处置中心 E	10	—	—	—	—	7	6	4
	至焚烧点	11	16	11	14	13	12	9	8

废弃物处置中心成本可以分为:检测成本、单位处置成本(资源、时间)与运输成本,各个废弃物处置中心备选方案的基本参数假设如表7.2所示:

表7.2 废弃物处置中心基本参数假设

备选废弃物处置中心	中心 A	中心 B	中心 C	中心 D	中心 E
检测成本	2	3	2	4	1
单位处置成本(资源)	14	9	8	10	13
单位处置成本(时间)	6	7	8	7	9
运输成本(至焚烧点)	12	7	8	8	13
运输成本(至再制造企业)	10	12	17	20	21
分拆产品利用率	85%	80%	83%	84%	87%

在本模型中,不考虑处置中心产品产量问题对再制造企业回购产品价格的影响,因此再制造企业的对产品的回购价格固定为100。

所有参数设置好以后,将模型进行初始化操作,然后开始运行模型,来观测回收点Agent与处置中心Agent之间的运作关系。在模型开始阶段,我们可以看到,各个废弃物生成点按照预设的随机时间产生废弃物品,各个回收点有序的将周边的固体废弃物回收,检测后将合格产品均匀地送入最近的两家处置中心,不合格的产品送入焚烧点。处置中心在收到回收产品后经过检测、分拆等步骤将合格产品送入再制造企业,并将分拆完的不可利用物送入焚烧点。为了观测回收点Agent对处置中心Agent的选择,我们设定模型运行时间以3000(量纲可自定义)为一成本核算周期,经过成本核算,各个回收点Agent对处置中心进

废弃物处置中心成本可以分为:检测成本、单位处置成本(资源、时间)与运输成本,各个废弃物处置中心备选方案的初始参数假设如表 7.4 所示:

表 7.4 废弃物处置中心基本参数假设

备选废弃物处置中心	中心 A	中心 B	中心 C	中心 D
检测成本	2	3	2	4
单位处置成本(资源)	14	9	8	10
单位处置成本(时间)	6	7	8	7
运输成本(至焚烧点)	12	7	8	8
运输成本(至再制造企业)	10	12	17	20
分拆产品利用率	87%	80%	83%	86%

在本模型中,再制造企业回购产品的价格受到处置中心产量的影响,因此再制造企业的对产品的回购价格假设初始值为 100。

一些增加或改变的数据假设定义如下:

废弃物处置中心 Agent 根据竞价策略的调整,每次提高或者降低处置中心处置价格的调整幅度为  $\theta\%$ ;废弃物处置中心设置库存容量限制,当库存容量达到限制值的 60%后,库存每提高 5%,处置价格提高  $\theta\%$ 。处置价格的提高影响到回收点 Agent 对处置中心的选择问题。

再制造企业 Agent 在每个周期对处置中心 Agent 提供产品的数量进行比较。根据提供数量的排名进行收购价格的调整,调整幅度为  $\delta\%$ ,调整价格设置上限,上限为初始价格的 110%,下限不设。具体为:排名第一的收购价格提高  $\delta\%$ ,排名第二的收购价格不变,排名第三的收购价格降低  $\delta\%$ ,排名第四的收购价格降低 2 $\delta\%$ 。

所有参数设置好以后,将模型进行初始化操作,然后开始运行模型。在模型开始阶段,我们可以看到,各个废弃物生成点按照预设的随机时间产生废弃物,各个回收点有序的将周边的固体废弃物回收,检测后将合格产品均匀地送入最近的两家处置中心,不合格的产品送入焚烧点。处置中心在收到回收产品后经过检测、分拆等步骤将合格产品送入再制造企业,并将分拆完的不可利用物送入焚烧点。我们设定模型运行时间以 2000(量纲可自定义设定)为一运行周期,经过一个周期后,各个回收点 Agent 对处置中心进行了优先送入的选择,模型运行第一阶段结果如图 7.12 所示:

从图 7.12 我们可以看到,第一阶段每个回收点 Agent 在成本核算周期内对自己送入的两家处置中心 Agent 进行成本核算,并在核算周期结束时进行选择处置成本最低的处置中心在下一周期送入废弃物。其中,处置中心 A 接受来自

从图 7.15 我们可以看到,最终处置中心 A、B、D 获得了所有市场份额,而处于处置中心 A、B、D 边界的回收点 Q3、Q4、Q11、Q12 成为了处置中心 A、B、D 竞争的回收点,三家处置中心的最终收益维持在了一个相对稳定的状态。

### 7.1.7 小结

作为循环经济的重要理论支撑,逆向物流理论的研究和完善获得了国内外学者的广泛关注,逆向物流网络的系统构架设计研究是逆向物流网络研究的基础,目前对于逆向物流网络设计的研究一般包括逆向物流网络中处理节点(回收点、再处置中心、再制造工厂、配送中心等)的选址、库存控制、运输路径优化、逆向物流网络组织结构优化等。由于逆向物流网络是一个产品在时间、数量和质量上具有高度不确定性,成员结构具有高度复杂性,并且模型的构建目标具有复杂多样性的系统。对这样的系统进行研究,运用常规的数理方法一般会受到多因素的制约而使得构建的数理模型不具备对研究问题的很好抽象。由于现代计算机技术的快速发展,运用计算机技术来研究管理问题,逐渐成为一种可能,本节的研究运用了计算实验的方法,运用多 Agent 建模方法,构建了四层的逆向物流网络模型。在模型中,我们着重研究了在设定目标与交互规则下,回收点 Agent、处置中心 Agent 以及再制造企业 Agent 如何相互作用,通过模型的不断演化运行,获取了一些有用结论。

研究结果表明,在不考虑再制造企业需求计划对市场影响的情况下,回收点根据送入处置中心处置成本最低的原则选取处置中心,而处置中心由于没有受到再制造企业收购价格变化的压迫,在处置价格上并没有进行调整,市场完全根据各处置中心的地理位置以及与周边回收点的远近关系来确定区域内需要的处置中心数量以及处置中心负责区域的划分。在考虑了再制造企业需求计划对市场影响的情况下,由于各处置中心受到再制造企业价格调整的压迫,其中的一些处置中心被迫压低处置价格,与别家处置中心进行竞争以提高本中心处置收益。由于处置中心参与市场竞争,导致了产品回收市场在一定时期内出现了波动,经过一段时间的调整,有的处置中心因为种种不利因素退出了市场竞争,而最终剩下的处置中心获得了较稳定的市场份额。由于竞争的原因,各处置中心的处置收益相比较于没有再制造企业影响的情况下,降低了很多。整个逆向物流网络维持在一个相对稳定的状态。

## 7.2 供应链网络动态演化及其计算实现

### 7.2.1 引言

供应链网络是由数目众多的零售商、分销商、制造商、原材料供应商以及物流服务商等企业或部门组成的一个网状系统,供应链网络系统是比单个供应链更加复杂的系统,是由数目众多的供应链相互连接而成,是一类典型的复杂网络。众多学者从网络的规划与设计、网络的稳定性、给定网络下的契约设计等问题进行了众多研究(Snyder et al., 2006; Nagurney et al., 2002; 张铁柱等, 2005; Gong et al., 2008; Shen, 2006)。但这些研究无论是采用数理模型还是仿真手段,都是基于一个重要的假设:即供应链网络是静态不变的。

然而,实际的供应链网络是一个典型的动态系统(Simchi-Levi et al., 1999)。供应链的参与成员是自主或半自主的个体,分别处于供应链网络的不同位置,完成不同的业务活动,根据自己获取的信息而相对独立的进行决策。供应链个体之间通过物流和信息流而联结起来,相互合作与竞争,它们之间的关系是不确定的,其中某一成员在某些方面的稍微调整都会引起供应链网络结构的变动。另外,市场的原材料供应以及客户需求的变化也是不确定的,供应链成员之间以及供应链之间也常常由于顾客需求的变化而经常做出调整,从而使成员的目标、状态和行为偏好也随着时间的变化不断变化。这些变化促使了供应链系统更加复杂和动态变化。

除了上述供应链成员自身状态和目标的调整引发的供应链的动态性之外,供应链所处的环境也是动态变化的:首先,供应链成员企业在运作过程中常常需要大量的资金,这些资金通过各种渠道进行融资,资金的来源无疑受到金融部门政策的影响;其次,在一个竞争的市场环境中,供应链的外部市场中会存在大量的潜在进入者,他们持有资金或技术,由于供应链中某一行业利润较高,这些潜在进入者会进行考察进而投资,以开办工厂等方式参与行业的竞争;再次,现有供应链的一些企业由于信息获取的严重滞后、管理经营的不善、买卖关系的恶化、资金的短缺等原因而使经营日趋困难,在长期的利润低下状态下,他们可能会入不敷出,直至退出供应链系统,这样一来新企业的加入、旧企业退出进一步的加剧了的供应链网络的动态性变化,使供应链网络更趋复杂。近年来,由于多Agent方法的成熟,一些学者开始采用多以代理方法研究供应链网络的动态性。比较典型的有Allwood 和 Lee(2005),作者以多代理方法建立了一个竞争的动

态供应链模型,证实多 Agent 方法在网络动态的研究中是非常有效的。

在动态的供应链网络结构中,无论是企业自身状态、属性的调整还是供应链网络中企业数目的增减,都对供应链中的企业经营产生严重冲击,供应链的参与个体必须重视供应链的动态变化带来的复杂性和不确定性,根据周围动态变化的环境不断调整自己的经营策略,从企业的经营理念、供货的敏捷性、客户管理等各方面进行调整和改进,从而使企业的决策面临更多的不确定性,也使决策更加复杂。

### 7.2.2 问题的描述

我们将研究一个四级的供应链系统的形成和演化,供应链中的参与企业有零售商、分销商、制造商和原材料供应商。最初市场中的供应链由一个零售商、一个分销商、一个制造商和一个原材料供应商组成。

在系统演化的同时刻会诞生数目不等的潜在投资者,它们持有一定的资金  $capital\_invest$ ,从诞生日  $bornDay\_invest$  开始,这些潜在投资者开始考察市场,准备投资,它们的投资考察时间长度为  $len\_invest$ 。在投资考察的时间长度内,如果投资者所考察的某个行业的平均利润率高于自己的投资期望利润率  $profMrg\_invThrehld$ ,则进入该行业,进行推销产品、订货、生产等流程操作。一般来讲,潜在进入者的投资期望利润率  $profMrg\_invThrehld$  常受银行利率  $bankrate$  的影响。在新企业进入市场后,作为一个全新的面孔,它们常常通过降价来吸引顾客订单。

在供应链网络演化的过程中,网络中的各企业在演化的每个周期都进行客户需求的满足、合同的签订、成本的核算等操作,并最终计算自己的利润率,依此作为企业考察自身经营的状况,并最终作为企业退出与否的衡量标准,我们将供应链中各类企业 Agent 考察利润率的周期记为  $len\_exit$ ,在考察周期内,如果某个企业的平均利润率低于企业自身的容忍度界限  $profMrg\_dieThrehld$ ,则企业终止当前业务,退出供应链系统。

在一个竞争的环境中,供应链网络如何从最初的单链演化形成一个供应链网络?在供应链网络的形成和演化过程中受到哪些因素的影响?供应链网络成员之间各种行为与供应链网络的形成与演化有什么影响?我们试图在前文所建立的人工供应链平台的基础上进行这些问题的研究,同时将平台的一些功能作简单的介绍。

### 7.2.3 模型的构建与计算实现

#### 1. Agent 模型构建

在本节中,我们构建了五类 Agent,分别为零售商 Agent、分销商 Agent、制

造商 Agent、原材料供应商 Agent 和潜在投资者 Agent。下面我们分别构建这几类 Agent 的相关模型。

### (1) 零售商 Agent

零售商 Agent 直接面临终端市场需求,市场需求是随机的,并且每天都发生。在每个周期,零售商都要完成收集订单、满足客户需求、管理库存、制定订单等一系列操作。零售商 Agent 每隔固定的周期  $len\_exit$  统计一次周期平均利润率,作为退出与否的标志。此外,零售商 Agent 还要完成与上级供应伙伴,即分销商的契约签订等操作,具体的流程图如图 7.16 所示。

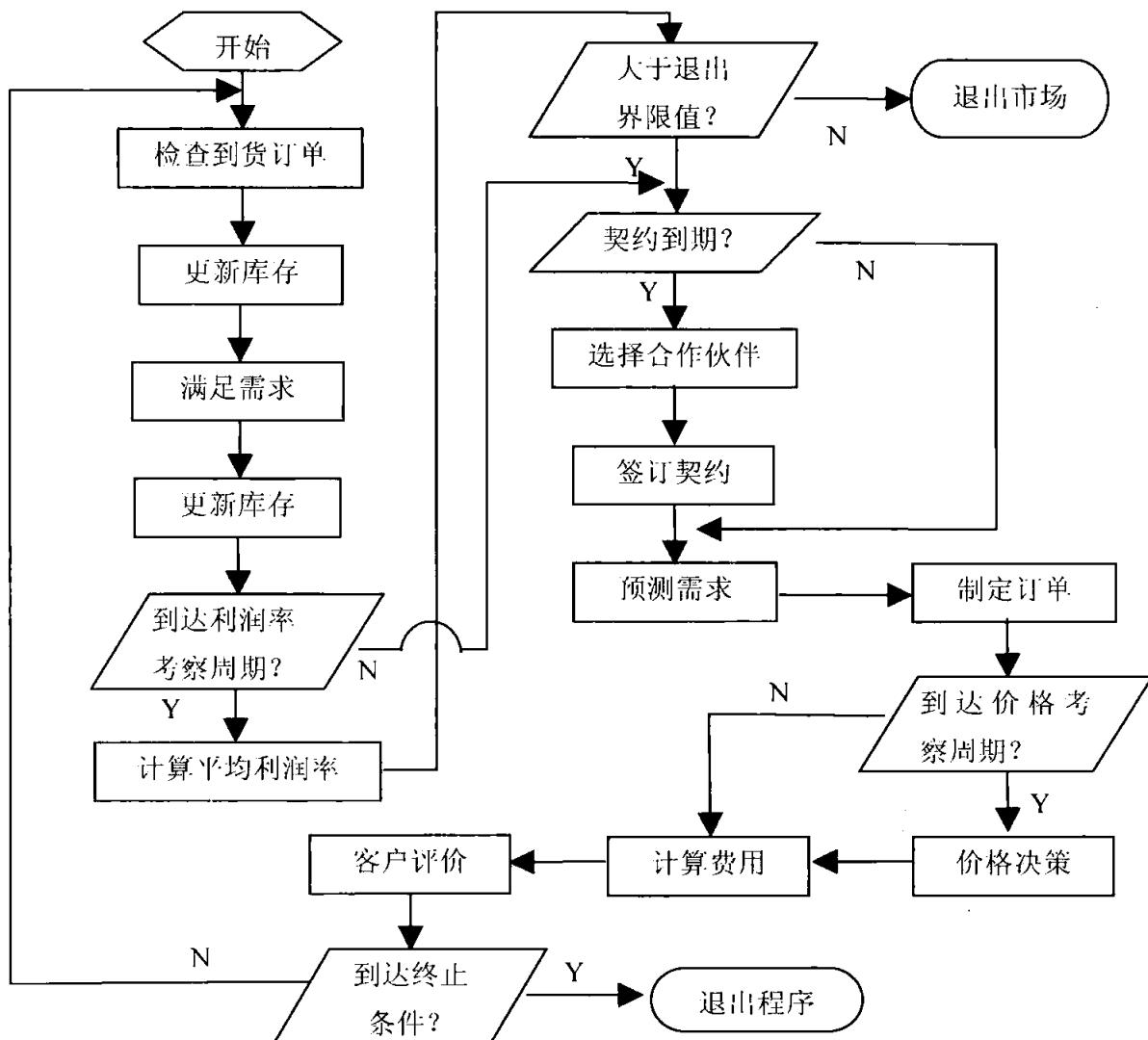


图 7.16 零售商 agent 的事件处理流程

根据零售商的事件处理流程,我们将零售商代理的功能分为合同管理、库存管理、订单管理、需求管理、成本管理、客户关系管理功能等六大功能。详细的功能介绍在前文中有详细介绍,此处不再叙述。

### (2) 分销商 Agent

分销商 Agent 直接接收来自零售商的订单,然后根据自己的库存、发出订单等信息,向它的供应者进行订货,其事件处理流程和零售商的类似,所不同的是它接受的订单来自于零售商,并且它在每个时间步 *tick* 结束时接受来自下游的零售商 Agents 的订单,而在第二天处理这些需求,其详细的事件处理流程如图 7.17 所示。

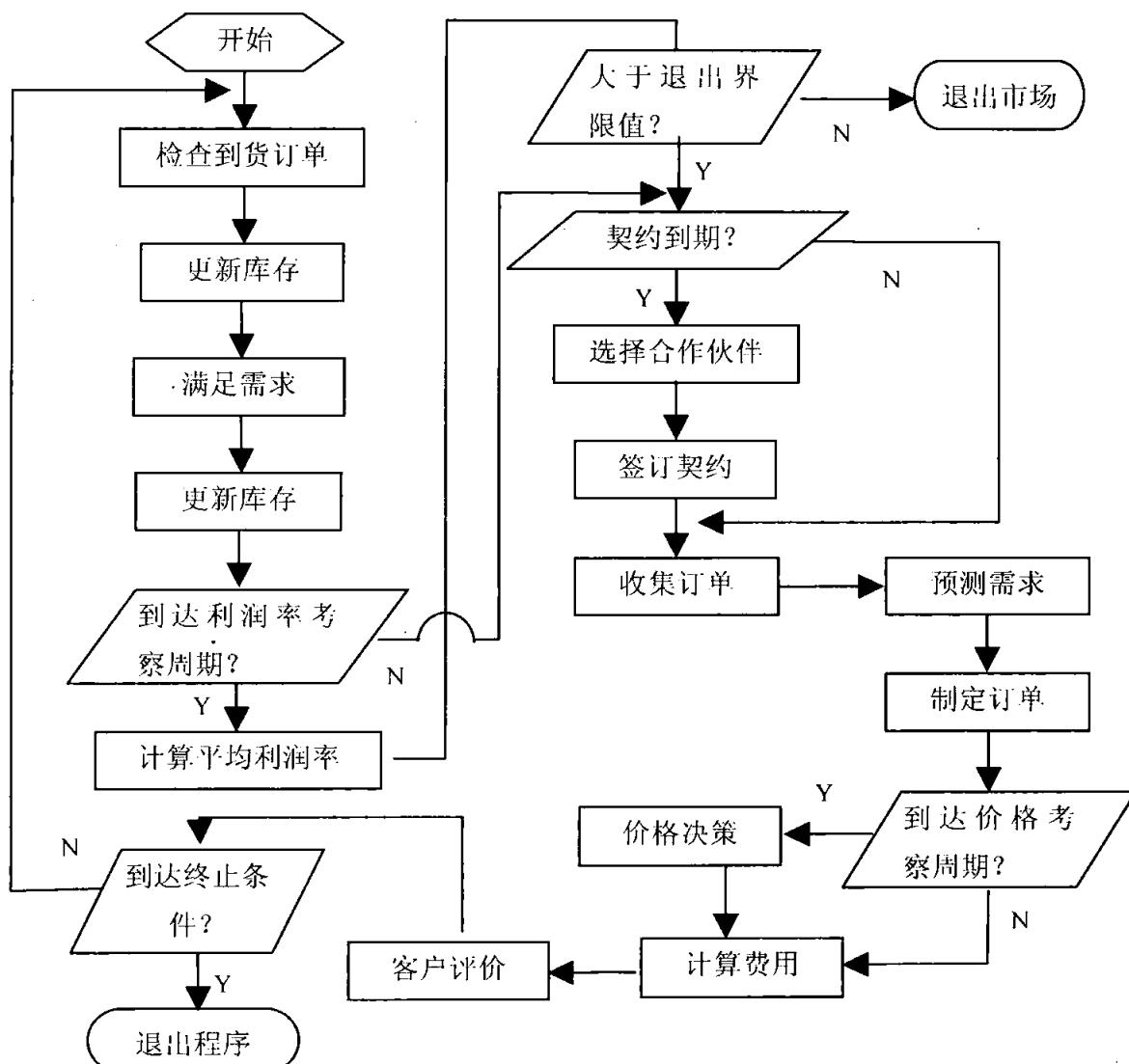


图 7.17 分销商 agent 的事件处理流程

根据分销商 Agent 的事件流程图,我们将分销商 Agent 的功能划分为六类:合同管理、库存管理、订单管理、需求管理、成本管理、客户关系管理。

### (3) 制造商 Agent

制造商 Agent 直接接收来自分销商的订单,与前两者不同,制造商 Agent 有两个库存点:产成品库存和原材料库存,而且要进行加工生产,其事件处理流

程如图 7.18 所示。制造商有生产能力限制,并且由于各种不确定性可能会产生中断,无法对下游产生供应。

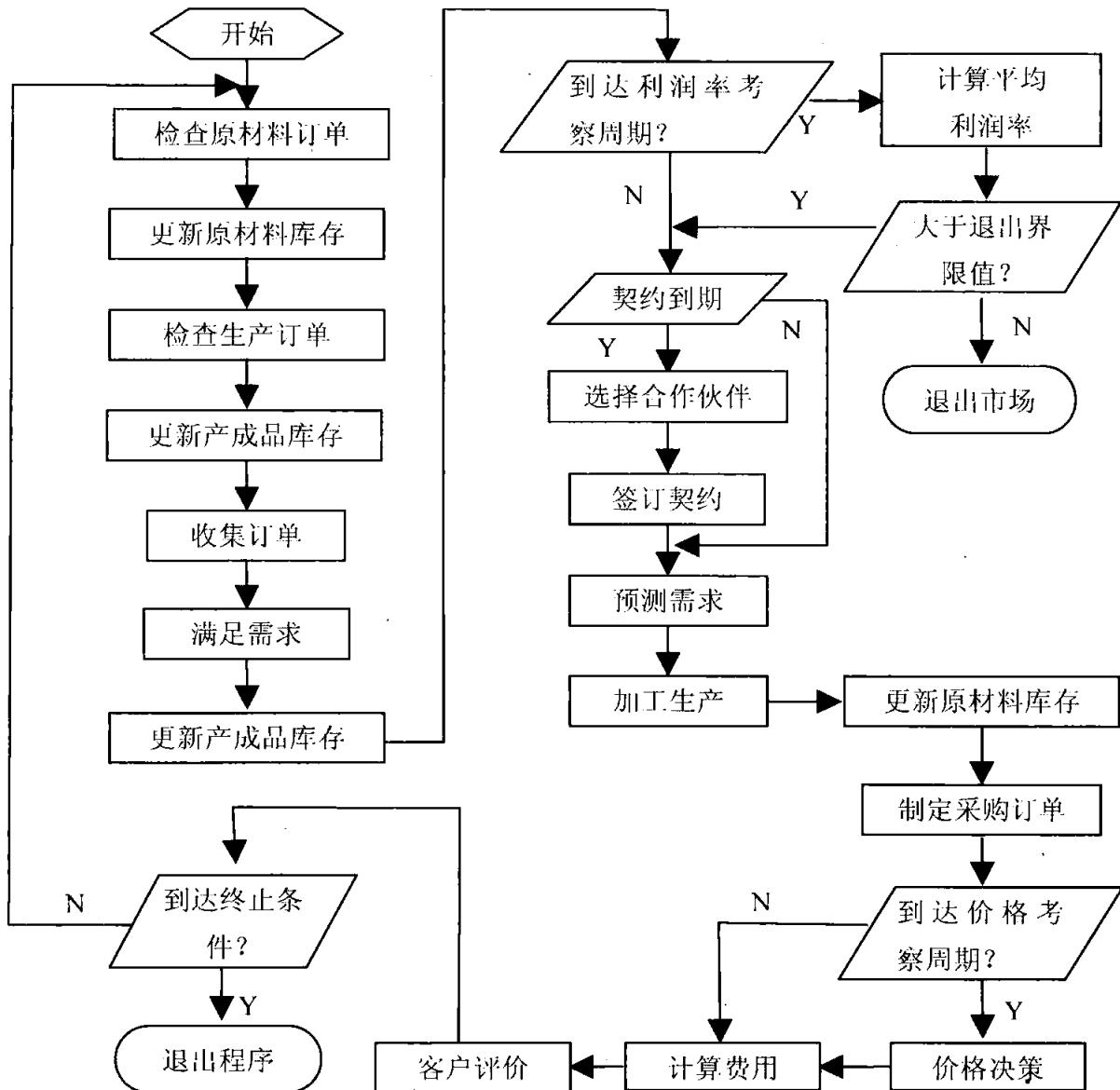


图 7.18 制造商 agent 的事件处理流程

由于制造商需要进行产品的生产和原材料的采购,因此,对制造商 Agent 功能的划分在上述两类 Agent 所具有的功能的基础上,增加原材料管理功能和生产管理功能。

#### (4) 原材料供应商 Agent

原材料供应商每个周期都要接受来自下游买者的订单,它们根据库存水平和库存策略安排生产以满足订单需求。在模型中,我们假定原材料供应商的生产能力有一定限制,此外,由于受到自然因素、机器故障等的影响,原材料供应商

会发生无法生产的情况,从而导致下游订单的积压。待生产恢复以后,由于缺货需要补充,原材料供应商优先供应累积订单。原材料供应商 Agent 的事件处理流程如图 7.19 所示。

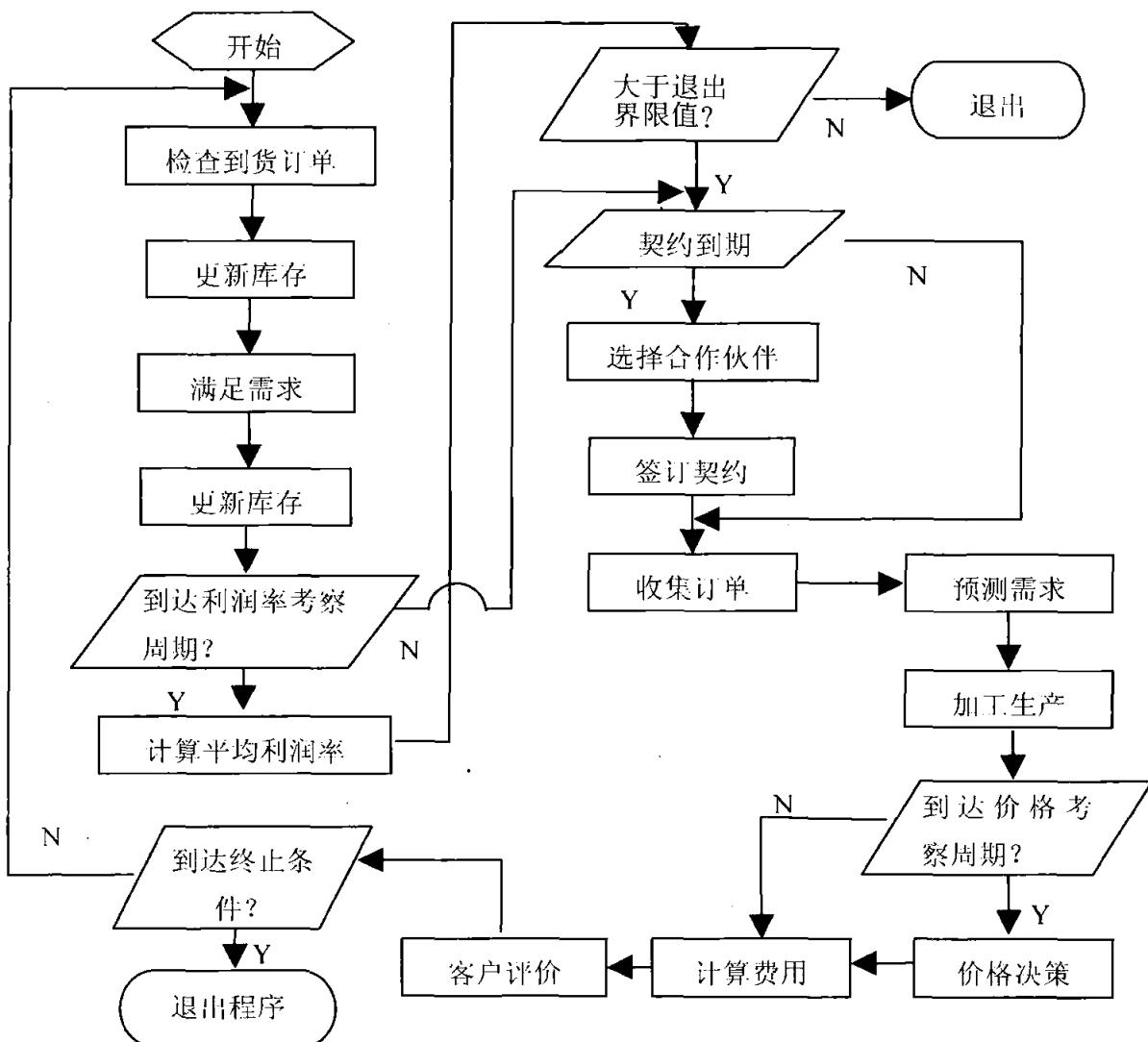


图 7.19 供应商 agent 的事件处理流程

根据其事件处理流程图,我们将原材料供应商 Agent 的功能划分为七类:合同管理、库存管理、订单管理、需求管理、生产管理、成本管理、客户关系管理。

#### (5) 潜在投资者 Agent

市场中有数目众多的潜在进入者,它们形成于不同的演化时刻,即在不同的 tick 会诞生数目不等的潜在投资者,它们有自己的投资偏好。假定银行利润率为  $bankrate$ ,而潜在投资者 Agent 的投资所期望的最低收益率界限  $profMrg\_invThrehld = \alpha_{invest} * bankrate$ ,其中  $\alpha_{invest}$  表示投资者 Agent 的投资谨慎程度,一般来讲  $\alpha_{invest} \geqslant 1$ 。

潜在投资者 Agent 有一个固定的投资考察周期  $len\_invest$ , 在投资考察周期内, 潜在投资者 Agent 考察供应链中各行业的平均利润率, 如果某个行业中的平均利润率高于自己的投资门槛  $profMrg\_invThrehd$ , 则潜在投资者进入该行业, 成为供应链网络中的一员, 否则, 继续考察, 其事件处理流程如图 7.20 所示。

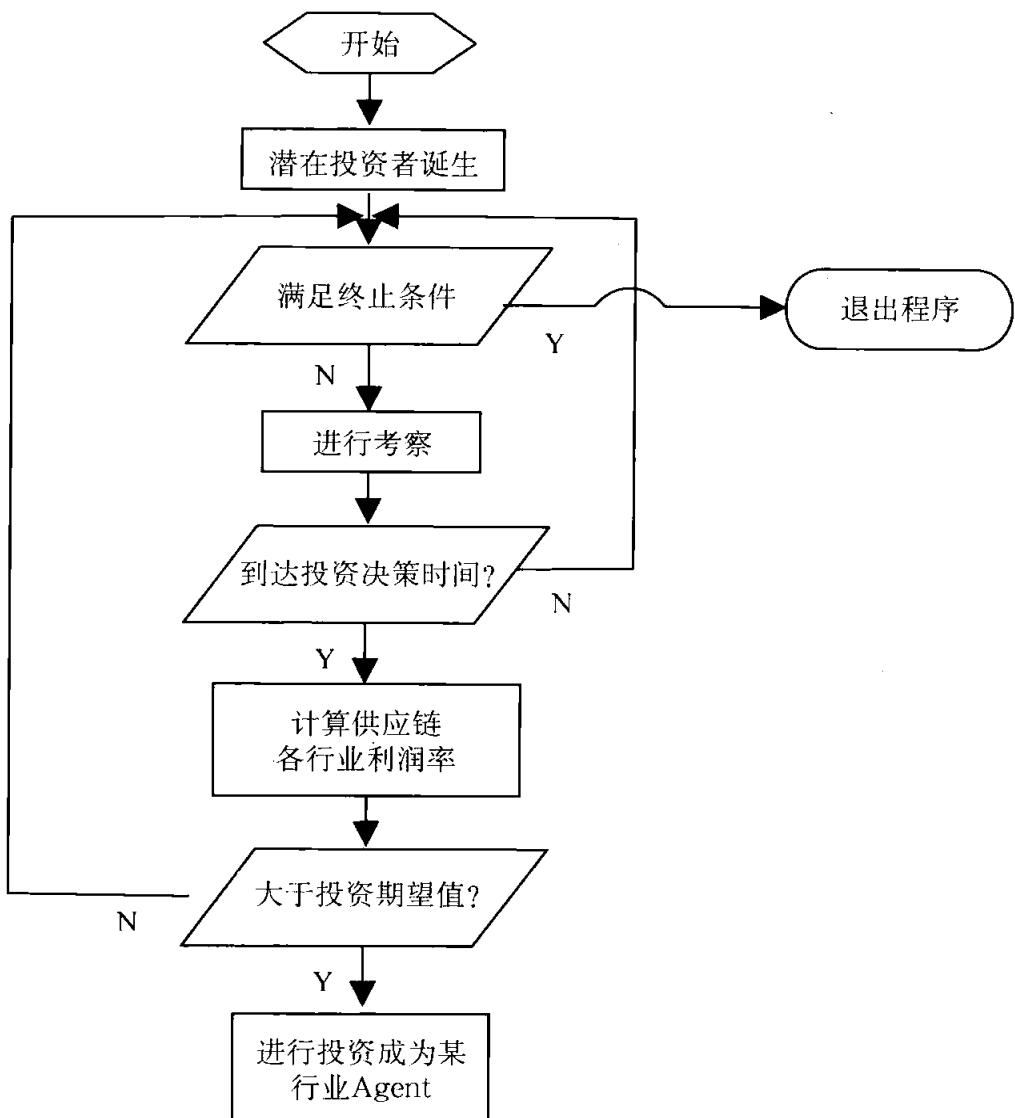


图 7.20 潜在投资者 agent 的事件处理流程

潜在投资者进入某行业后, 开始按照该行业的事件处理流程进行事件的处理和流程的操作, 从而转化为该行业的新的 Agent。

## 2. 网络模型构建

我们主要研究四级供应链网络的形成和演化, 因此, 我们构建四级的供应链系统, 分别表示零售商 Agent、分销商 Agent、制造商 Agent 和原材料供应商 Agent。在供应链网络模型中, 自底向上分别记各层为:  $TIER_0$ 、 $TIER_1$ 、

$TIER_2$ 、 $TIER_3$ 。

在供应链网络中,每个层级的企业 Agent 在订货与满足客户需求等的过程中,分别满足前文所介绍的几个约束:物流平衡约束、订货过程物料约束以及生产能力约束(详见前文介绍)。

计算运行的最开始,我们设定供应链网络中各层 Agents 的数目分别为 1,即  $|V_{TIER_1}| = |V_{TIER_2}| = |V_{TIER_3}| = |V_{TIER_4}| = 1$ 。在此后的演化过程中,根据不同的研究背景和问题,由于外部投资者的进入和内部企业的退出,整个供应链网络中各层的 Agents 数目发生不同的变化,从而供应链结构在不断变化,但是整个供应链网络始终限定在四层。

### 3. 基本假设

在多 Agent 系统中,Agent 是针对现实个体进行的某种抽象,通常基于众多的假设条件。本节所建立的人工供应链中的各 Agent 基于如下的假设:

(1) 人工供应链中的 Agent(智能个体)是有限理性,它们有不同的行为偏好。任一时刻,Agent 可获取的信息是有限的,Agent 对信息的处理能力也是有限的,它们的决策只是在有限信息的基础上进行的,通常都是根据自己的信息作出的反应。

(2) 在供应商的选择中,买者 Agent 在任一时刻的行为直接受组织系统中其他相邻 Agent 行为的影响。每个 Agent 行为的影响是局部的、有限的,但可能通过 Agent 间的相互作用在系统结构中传播,也就是说组织中每个 Agent 的行为都会对其他成员有影响。

(3) Agent 的每一个行为决策取自有限个数的行为规则集合,在演化中由于外部选择压力而不断淘汰“获利”较小和近期不用(或使用最少)的规则,新的行为规则可通过学习或自身变异而产生,并且可以继承(复制、遗传)。

(4) 外部的影响因素是客观存在的,Agent 无法对其进行改变,但是 Agent 可以根据历史经验等进行判定和认识。

### 4. 规则的设定

#### (1) 改变价格的规则

##### A. 降低价格

Agent 每隔一定的周期  $len\_chgPrice$  考察一次:如果在这个周期内自己的缺货次数很少,小于  $len\_chgPrice * \alpha_{chgPrice}$ ,并且周期  $len\_chgPrice$  内盈利出现下滑趋势,则 Agent 决定进行降价,每次降价为 0.2。

##### B. 提高价格

Agent 每隔一定的周期  $len\_chgPrice$  考察一次:如果在这个周期内自己的缺货次数很多,大于  $len\_chgPrice * \beta_{chgPrice}$ ,则 Agent 决定进行降价,价格每次提

高 0.2。

此处 Agent 有几个偏好,不同的个体对应的偏好值不同:

(a) 考察周期  $len\_chgPrice$  的不同偏好,激进型的 Agent 每隔很短周期就考察一次;

(b)  $\alpha_{chgPrice}$ ,  $\beta_{chgPrice}$  的不同,两者分别表示是改变价格的决心程度;

(c) 降价时候的利润比较中,对利润下滑趋势的敏感度。如果利润的下降在自己的可承受范围内,则继续保持原来的价格,否则就要降价。

## (2) 买者 Agent 的供应商选择规则

每个 Agent 和供应商签订合同,合同有一定的长度  $len\_contr$ ,如果合同到期了,Agent 计算和当前供应商合作过程中的平均收益  $\sum \pi / len\_contr$ ,记为  $\bar{\pi}_1$ 。之后,Agent 将之与前一个合同的平均收益  $\bar{\pi}_0$  进行比较。然后决定进行供应商的选择与合同的重新签订,具体的计算过程用如下的算法语言描述如下:

(a) 合同结束时,计算合同周期内的平均收益  $\sum \pi / len\_contr$ ,记为  $\bar{\pi}_1$ 。同样,计算上个合同长度内的平均收益,记为  $\bar{\pi}_0$ ;

(b) 比较  $\bar{\pi}_0$  与  $\bar{\pi}_1$ ,如果  $\bar{\pi}_1 < \alpha_{prof\_con} \bar{\pi}_0$ ,则 Agent 决定进行新的供应商选择,转到步骤(c),从而签订新的合同。否则保持原来的合作伙伴关系,继续维持原来的合同。其中  $\alpha_{prof\_con}$  表示在供应商的选择过程中,Agent 对于利润的敏感度。若  $\alpha_{prof\_con} = 1$ ,则表明 Agent 对于利润的下降极度敏感,  $\alpha_{prof\_con}$  的值越小,表明 Agent 的对利润下降的敏感度越低;

(c) Agent 进行供应商的重新选择,包括两类:第一类,更改供应商的数目,具体包括剔除一个较差的供应商、增加一个新的供应商。删除供应商的标准包括:删除信誉最差的;第二类,保持供应商数目不变,重新更换供应商。具体的更换方案包括:根据待选供应商提供的价格和信誉进行选择、根据待选供应商提供的价格和可供产品数量进行综合评定再进行选择、根据待选供应商提供的价格、可供产品数量以及供应商的信誉进行综合评定,然后选择。这三种方案同样适用于增加新的供应商。

下面分别给出各个供应商选择的算法描述:

### A. 删除一个供应 Agent:

经过步骤(b),在合同周期  $len\_contr$  内,Agent 考察自己的累积缺货和累积需求,分别记为  $\sum quantity\_back$ ,  $\sum demand$ 。另外,假定每个 Agent 均有一个表示服务水平的变量,此处指允许缺货的水平,记为  $\alpha_{selSupp\_del}$ ,如果累积缺货量  $\sum quantity\_back < \alpha_{selSupp\_del} * \sum demand$ ,则 Agent 决定删除一个信誉最差

的供应 Agent(关于供应 Agent 的信誉计算与上文同)。

### B. 增加一个供应 Agent

经过步骤(b),在合同周期  $len\_contr$  内,Agent 考察自己的累积缺货和累积需求,分别记为  $\sum quantity\_back$ ,  $\sum demand$ 。另外,假定每个 Agent 均有一个表示需求偏差的容忍度变量,记为  $\alpha_{selSupp\_add}$ , 如果累积缺货量  $\sum quantity\_back > \alpha_{selSupp\_add} * \sum demand$ , 则 Agent 决定增加一个供应 Agent,具体的选择哪一个新的 Agent 可以根据不同的选择规则进行决策,具体的方案详见前文所建立的人工供应链模型中的系统功能子系统,子系统中的供应商管理功能包括了几类供应商的选择规则。

### (3) 制造商 Agent 和供应商 Agent 的扩大再生产决策

每个制造商 Agent 和供应商 Agent 经过一定的时期  $len\_makeReprd$ , 进行扩大再生产的决策,具体的算法描述如下:

- (a) 计算截至目前为止自己的利润总和,记为  $\sum cost\_netProfit$ 。
- (b) 考察自己在时间步  $len\_makeReprd$  内的累积缺货量以及累积需求量,分别记为  $\sum quantity\_back$ ,  $\sum demand$ 。另外,假定每个制造商 Agent 和供应商 Agent 都有一个扩大再生产的风险偏好变量,记为  $\alpha_{reprd}$ , 如果累积缺货量  $\sum quantity\_back > \alpha_{reprd} * \sum demand$ , 则 Agent 决定进行扩大再生产。
- (c) 假定扩大再生产的量以 10 为单位,即每次扩大再生产的生产能力增量是 10 的整数倍,每个单位的再生产费用为定值。具体的扩大再生产量根据其累积总利润、缺货量等进行综合决策,最终确定扩大再生产,增加的生产能力为  $\Delta capacity$ 。
- (d) 更新生产能力为  $capacity = capacity + \Delta capacity$ 。

### (4) 潜在进入者的投资决策

市场中会存在大量的潜在竞争者,他们拥有大量的资金或技术,不断地寻找投资机会,一般来讲,潜在进入者的投资依据主要包括行业的平均利润、自己的投资偏好等。在供应链环境下,我们假定市场中存在大量的潜在进入者 Agent,成为投资者 Agent,构建了投资者 Agent 的模型,其投资决策的算法语言描述如下:

- (a) 给每个投资者 Agent 的这些属性赋值。每个投资者 Agent 拥有一个表示投资的投资收益率的最小期望值,以  $threhld\_invest$  表示;另外有一个进入市场的时期  $day\_born$ ,投资的考察周期  $len\_invest$ ,投资的准备金  $reserve\_invest$ ;
- (b) 在投资者 Agent 的考察周期内,Agent 确定考察对象,考察市场中供应

链某一行业企业(比如分销商、制造商等)或者所有行业企业。根据考察企业的范围又分为全面考察和局部考察,全面考察是指考察同一行业的所有企业,而局部考察是随机的选择本行业的部分企业进行考察;

(c) 选择好投资考察的目标后,Agent 搜集信息,计算在其投资考察周期内所考察目标行业  $k$  的平均投资收益率,记为  $avgPI_k$ 。假定供应链中每个行业的进入门槛为一个定值,表示初期投资所花费的固定费用等,以  $(threhld\_industry)_k$  表示。在所考察的行业中,投资者 Agent 选择  $(threhld\_industry)_k \leqslant reserve\_invest$  并且  $avgPI_k \geqslant threhld\_invest$  的那些行业加入准备投资的行业集合;

(d) 投资者 Agent 根据自己对投资收益率和投资金额的偏好情况进行加权决策,构造待选行业选择权重为:

$$W_i = \alpha_{invest\_PI} * avgPI + (1 - \alpha_{invest\_PI}) * threhld\_industry$$

其中,  $\alpha_{invest\_PI}$  表示投资者 Agent 对投资收益率的偏好权重;

(e) 确定所有待选行业选择权重后,选择综合权重最大的行业作为投资目标,然后加入该行业,生成行业内的个体 Agent,随后进行该 Agent 的相关事件流程处理操作。

#### (5) 各个 Agent 的退出策略

企业的退出取决于两个因素:企业实际的投资收益率和企业关于投资收益率的最小承受能力。算法语言描述如下:

- (a) 个体 Agent 在每个时间步结束后,计算自己的投资收益比率;
- (b) 个体 Agent 将该投资收益比的值  $PI_i$  与自己期望的投资收益率  $threhld\_exit$  进行比较,并且记录下来  $PI_i < threhld\_exit$  的次数  $len_{PI < threhld}$ ;
- (c) 判断时间步的累计次数是否到达准备退出而考察的周期长度  $len\_exit$ ,如果到达则转向下一步,否则转步骤(a);
- (d) 比较  $len\_exit$  和  $len_{PI < threhld}$  的值,如果  $len_{PI < threhld} \geqslant \alpha_{exit} * len\_exit$ ,转向下一步,个体 Agent 准备退出;否则转步骤(a);其中  $\alpha_{exit}$  表示个体 Agent 对实际投资收益率低于理想投资收益率的最大容忍限度;
- (e) 个体 Agent 退出市场。

#### (6) 需求在零售商中的分配规则

在供应链网络中,零售商直接面临终端市场,与供应链网络中其他层 Agents 不同,我们设定零售商所面临的需求与其价格成反比例变化。

假设整个市场需求服从  $(\mu, \sigma^2)$  的正态分布,零售商提供的产品是无差异的。零售商个体 Agent\_R<sub>i</sub> 接到的实际终端市场需求仅受他的产品定价的影响。

假定零售商  $Agent_{-R_i}$  的产品价格为  $P_{Agent_{-R_i}}$ , 则它所占有的市场份额为  $\frac{1}{P_{Agent_{-R_i}}} / \sum_i \frac{1}{P_{Agent_{-R_i}}}, i \in V_{TIER_0}$ 。

### 5. 计算的实现过程

在上文所构建的人工供应链的基础上,根据以上几节提出与限定的四级供应链网络中的事件处理流程与功能划分,构建动态的四层供应链,具体的计算实现采用如下的处理过程:

- (1) 构造一个四级的供应链网络,分别表示零售商、分销商、制造商和供应商,初始设定每层的个体数为 1,并根据网络中的层数赋予各个 Agent 唯一的编码;
- (2) 构造市场环境中的潜在投资者 Agent,赋予投资者 Agent 编码;
- (3) 限定运算的迭代次数,完成人工供应链模型的初始化;
- (4) 基于人工供应链模型,根据供应链网络中各层 Agent 的不同行为,完成他们从满足需求、递交订单、安排生产、计算成本等一系列工作流程;
- (5) 在不同的演化时刻,当投资者 Agent 作出决策后,将其加入投资行业,并赋予投资者 Agent 在所投资的行业中一个全新的编码,加入供应链网络中表示该层企业的 list 列表中,同时所投资行业的企业总数目加 1;
- (6) 当有企业退出时,在供应链网络中该层的 list 列表中删除此企业 Agent,使所在行业的总企业数目减 1,并更新整个供应链网络;
- (7) 在演化计算过程中,根据各 Agent 的输入和输出及其变化,综合计算各个企业 Agent 和本行业的一些状态变量的变化,形成下一步计算的输入;
- (8) 在各个 Agent 不断交互和竞争的过程中,计算各 Agent 不断的学习和适应性的变化;在每一步的演化过程中,把 Agent 的有关属性和行为偏好,Agent 所在行业的有关属性等参数进行统计、存储以便输出;
- (9) 将供应链网络结构的变化输出到控制平台的网络结构显示窗口进行,同时将准备输出的数据输出到硬盘或到数据窗口显示。

#### 7.2.4 实验结果和分析

通过上述模型的构建和算法实现,本节进行下述几个实验,重点探讨动态供应链网络的形成和影响网络结构形成的一些因素。

##### 1. 给定需求下供应链网络的形成和演化

###### (1) 动态供应链网络结构的显示机制

结合前文提出的人工供应链模型,我们首先在建模实现的基础上进行演示供应链网络的动态变化图示。在所建立的网络模型基础上,借助于 Repast 平台,设计并实现人工供应链网络结构的动态实时变化显示图。与实际的网络结

数目表示实际供应链网络的动态性。供应链中各个参与 Agents 的详细的相关参数如表 7.5 所示：

表 7.5 需求不变下供应链网络中的费用参数

	零售商	分销商	制造商	供应商
买价	19	10	3	/
卖价	30	19	10	3
固定订货费用	50	50	50	/
存储费用	0.2	0.2	0.1+0.1	0.2
缺货费用	2.0	0.5	1.0	1.0
生产费用	/	/	1.8	1.2
运作费用	18	20	20	20
价格考察的周期长度	在[80, 130)上服从均匀分布	在[80, 130)上服从均匀分布	在[80, 130)上服从均匀分布	在[80, 130)上服从均匀分布
退出市场的界线值	0.3	0.2	0.2	0.1
退出考察的周期长度	200	200	200	200
进入门槛	0	0	0	0

另外,市场中潜在进入者的投资考察周期  $len\_invest = 100$ ,银行的利息率  $bankrate = 0.1$ ,初始的市场需求  $demand$  服从均值( $\mu$ ,  $\sigma^2$ )的正态分布。

在上述的假设和费用参数的基础上,我们进行了两组实验,分别取  $\mu = 100$  和  $\mu = 200$ ,同时假定市场上最初的供应链由一个零售商、一个分销商、一个制造商和一个供应商组成,制造商的生产和原材料供应商的生产能力都为 100,并且在整个演化过程中不再发生改变,市场上共有 20 个潜在的进入者,他们分别在不同的时刻开始考察市场,并且独立对是否投资和投资哪类企业进行决策。在整个演化过程中,由于供应链是动态变化的,每个企业的存活时间也是动态的,因此在演化过程中,我们将每个时间步( $tick$ )中供应链网络中各个层级企业的价格值进行平均,然后取平均值作为本行业的平均价格,以此反映出行业价格的变化。

图 7.22 和图 7.23 分别显示的是当其他参数保持不变时,需求的均值  $\mu$  分别取 100 和 200 时,动态供应链网络形成过程中每个层级企业的平均价格水平。

由图 7.22 可见,对供应链网络中的底层零售商而言,由于整个上游的供应能力只有 100,如果此时供应链是保持静态不变的,则整个市场的供需基本平衡,可以达到供应链效益的最大化。然而,由于社会中大量闲置资本的存在,形成了潜在的进入者。因此在需求没有增加的情况下,由于潜在进入者的加入,在

16;之后,随着企业的大量进入,导致行业利润水平的大幅下降,从而导致部分企业退出市场,最终整个市场在企业总数为 10 个左右时达到相对稳定的状态。

由图可知,当需求较大时,随着供应链网络中个体 Agent 纷纷提高价格,使网络中各层级的平均价格上涨(如上图 7.23 示),从而使行业的利润率上升。在这种市场环境下,潜在进入者在获取此类信息后大量涌入市场,促使了整个供应链的动态变化,这一动态性又进一步加剧企业价格的变化。由于终端市场需求没有发生根本性变化,从而在大量企业进入市场导致行业利润率降低后,会有一部分企业由于利润率太低而退出市场,使供应链网络中企业数目开始下降。

## 2. 不同契约长度下供应链网络的形成和演化

与前文类似,我们以下游买者和上游供者之间的契约长度表示买卖双方之间关系的稳定程度,在本实验中我们取契约长度  $len\_contr = 300$  和  $len\_contr = 100$ ,分别表示买卖 Agents 之间的长短期契约,并且约定,当  $len\_contr = 300$ ,所有的买卖双方都采用长期合同,而当  $len\_contr = 100$ ,所有的买卖双方都采用短期合同。我们假定市场需求服从均值为 150,方差为 10 的正态分布。市场中的潜在进入者总数为 20,银行利率为 0.1。供应链网络中各层级 Agents 的费用参数的详细设置如表 7.6 所示:

表 7.6 不同契约下的费用参数设置

	零售商	分销商	制造商	供应商
买价	19	10	3	/
卖价	30	19	10	3
固定订货费用	50	50	50	/
存储费用	0.1	0.2	0.1+0.1	0.2
缺货费用	0.5	0.5	0.5	0.5
生产费用	/	/	1.5	1.2
运作费用	20	15	20	20
$len\_Invest$	在[80, 130)上服 从均匀分布	在[80, 130)上服 从均匀分布	在[80, 130)上服 从均匀分布	在[80, 130)上服 从均匀分布
$len\_ChgPrice$	在[50, 100)上服 从均匀分布	在[50, 100)上服 从均匀分布	在[50, 100)上服 从均匀分布	在[50, 100)上服 从均匀分布
$len\_exit$	100	100	100	100
$dieThrhld$	0.4	0.3	0.2	0.1
$bornThrhld$	0	0	0	0
$len\_Contract$	100/300	100/300	100/300	100/300

通过编码实现,我们设定 6000 次演化迭代计算过程,与实验(1)不同,在本

较明显,此时网络中的企业总数逐渐增加然后开始减少,而当  $bankrate = 0.4$  时,企业总数的增减幅度很小,没有出现前两个情形下的企业数目先增后减的变化趋势。此外,随着利润率的增加,在演化到达同一个时间步时,供应链网络中企业的总数目明显下降。

由于银行利率的提高,市场中的潜在投资者开始改变其投资的预期收益,从而使部分投资者进行其他业务投资,减少了实际的市场进入者数量。投资者进入市场数量的降低一方面降低了供应链网络演化的动态性,使企业总数维持相对稳定的数目,另一方面由于竞争者相对数量的减少,从而提高了供应链网络中各层级企业的平均利润率。

### 7.2.5 小结

供应链网络是由一系列自主程度不同的业务实体所构成的,这些实体之间互为上下游企业,它们通过物流和信息流而联结起来,这些联结的关系是不确定的。在供应链内部,企业是一个自主或半自主的主体,多数情况下,它们从自身情况出发独立作出决策,各个体之间互相依赖、互相影响,其中某一成员某些方面的稍微调整都会引起供应链网结构的变动。企业经营管理不善,会降低企业收益,直至退出市场,进而影响供应链的结构变化。此外,市场外部大量潜在投资者会不断的进入市场,参与竞争,并最终改变供应链网络的结构。

供应链动态的特性增加了企业决策的复杂性和风险,本节着重探讨了动态供应链网络的形成和演化,并从几个角度分析了影响网络结构形成和演化的一些因素。在介绍了基于 Repast 平台系统的显示机制后,本节重点分析了不同需求下供应链网络中各层企业平均价格的形成和演化以及网络结构的演化、不同契约长度下供应链网络的形成和演化、利润率考察周期、银行利润率对动态网络结构的影响。

研究结果表明在起初供小于求的市场中,供应链网络中各行业的价格先增加,随着大量新企业的进入,而逐渐降低,企业的总数也出现先增后减的变化;契约长度的大小可以显著地改变供应链网络中各层级企业的平均利润率,在动态的供应链网络中,仍然能够提高行业的平均利润率并且可以在一定的程度上阻止潜在竞争者的进入,保持供应链的相对稳定;企业的利润率考察周期越长,其所在行业的平均利润率越高,考察周期越长,使企业 Agent 能够更加全面的了解市场信息,作出更加合理的决策;银行利率的提高,减少了实际的市场进入者数量。投资者进入市场数量的降低一方面降低了供应链网络演化的动态性,使企业总数维持相对稳定的数目,另一方面由于竞争者相对数量的减少,从而提高了供应链网络中各层级企业的平均利润率。

## 7.3 基于计算实验的供应链 网络结构突变管理研究

### 7.3.1 引言

随着供应链管理理论和应用研究的日益深入,供应链突变管理研究日益成为供应链管理者关注的焦点之一。近几年,对供应链系统突发事件问题的研究得到了很大的发展。Qi等(2003)研究了在线性需求价格的报童环境中需求发生突变时的供应链协调问题,发现了由于产量变化所引起的偏差费用的存在和原生产计划具有一定的鲁棒性,并且当突发事件发生后,只有应用应急管理策略才能使得供应链的利润达到最大,否则就会出现双边边际效应现象。Xu等(2003)将该模型推广到非线性需求价格的情形,发现当需求变动较小时,零售价格与需求的变化成线性关系;但是当需求变动较大时,零售价格维持在一定的水平保持不变。而Xiao等(2005)则考虑了一个供应商和两个零售商的供应链,两个零售商进行投资竞争以促进销售,供应商以一定的补贴率对两个零售商的投资进行补贴,运用博弈论方法进行分析,得到了竞争环境下供应链突变时的协调策略。Xu和Gao(2005)研究了当生产成本为生产数量的凸函数时,线性价格需求关系下需求发生突变时的集成化决策和如何在突发事件发生后设计新的供应链协调策略的问题。Xu等(2006)进一步研究了生产成本发生突变后的情形,分别针对线性和非线性的价格需求关系得出突变发生后的集成化最优决策和分散式决策时的供应链协调策略。

供应链是围绕核心企业,通过对信息流、物流、资金流的控制,从采购原材料开始,制成中间产品以及最终产品,最后送到消费者手中的,将供应商、制造商、分销商、零售商,直到最终用户连成一个整体的功能网络结构模式。供应链网络中的企业覆盖范围已经越来越广(Thadakamalla et al., 2004),由众多跨国企业组成的全球供应链网络比比皆是。在供应链网络中,将每个成员企业视为一个行为主体,这些行为主体具有自主判断和行为能力,受环境影响。与此同时,每个成员企业会根据其他成员的行为以及环境变化不断修正自身的行为规则,以便与整个供应链网络和环境相适应。因此供应链不应是由各个节点企业的线性组合而成的简单系统,而是一个复杂自适应系统(Surana, 2005),会涌现出许多单个企业所不具有的特性。对于这样的一个复杂自适应系统,系统内部存在着广泛的错综复杂的物质、信息和资金的交换。这些交换关系形成一个复杂网络。

网络也必然受到各种不确定的内外部的干扰或攻击,这种干扰或攻击,从危害性角度来说,小则影响系统的运行和效率,大则沿整个供应链系统扩散,导致供应链系统的部分或全部功能丧失(系统崩溃)。例如,一些专家指出,目前美国的电力输送已经成为整个电力行业中最为薄弱的一环,一旦出现事故,落后的电力输送设备将是电力系统陷入瘫痪的第一块“多米诺骨牌”,这种由点及面影响供应链的功能和结构的行为,被一些学者(刁力和刘西林,2007;钟波和谢挺,2005)称为供应链网络脆性。

在经济全球化、信息化及大量不确定性问题背景下,供应链作为一个复杂网络,大多缺乏抵御不确定性甚至不能抵御风险。因此,加强供应链网络的脆性及鲁棒性研究,分析不同干扰情况下供应链网络的脆性及鲁棒性表现形式和特点,对于提高供应链的运作绩效和鲁棒性都具有十分重要的意义。供应链网络的鲁棒性问题的研究,已经引起了国内外的广泛关注,理论方面和实证方面都取得了一定的进展。Thadakamalla 等(2004)运用复杂网络对供应链网络的存活性进行了分析,Snyder 等(2005)就供应链的鲁棒性和可靠性建立了数学模型,给出了相应的算法;徐家旺(2007)等建立了市场供求不确定条件下的供应链多目标鲁棒运作模型;黄小原等(2007)就供应链鲁棒性问题作了综述研究。总的来说,关于供应链的鲁棒性研究主要集中在供应链面对环境不确定性下的企业的应对措施,偏向供应链的微观运作层面,研究方法也主要为数学规划或定性分析,而关于供应链整体的宏观层面(如网络结构等)的研究却很少。因此,在供应链管理中研究供应链整体层面问题(如系统鲁棒性等)具有十分重要的理论和实践意义。本文在给出基于复杂网络的供应链稳定鲁棒性和性能鲁棒性定义的基础上,采用基于代理的计算实验方法设计了供应链网络结构,将广义进化论的思想融入其中,实际模拟了供应链的结构变化过程,分析了该供应链网络在受到不同干扰(随机/有意)以及有无局部联盟的情形下稳定鲁棒性和性能鲁棒性表现。

与已有供应链系统的风险和应急管理研究不同,本节的研究主要集中于分析供应链网络的结构稳定性及有效性对大规模突发性事件的管理策略。与已有供应链突发事件的研究方法不同,采用复杂网络模型来研究供应链网络的结构稳定性。首先我们给出一些建模过程中使用的基本概念,然后结合影响供应链网络结构演化过程的一些关键因素,给出一个供应链网络结构的动态演化模型,然后在此基础上分析供应链网络的结构稳定性。本节主要致力于回答如下问题:

- (1) 供应链网络具有怎样的宏观统计特征?
- (2) 供应链网络具有怎样的结构稳定性?
- (3) 成员企业的决策规则对结构稳定性有何影响?

(4) 如何有效提高供应链网络应对大规模突发性事件的能力?

### 7.3.2 问题描述

供应链网络结构稳定性是指供应链系统在遭遇突发事件、企业之间供应关系频繁变化等因素的影响,供应链系统的某些主要宏观统计量(如最大连通子图的大小、平均最短路径和最大距离等)的波动幅度仍然保持在某一设定的目标范围内;显然,在一定时间内,若这些宏观统计量快速下降,此时系统的结构稳定性显然较低;反之,若下降速度较慢,系统的结构稳定性就较高。

基于供应链系统结构演化过程的内在动态机制以及一些主要影响因素,运用复杂网络模型分析供应链系统的宏观统计特征,识别供应链系统的网络特征。然后根据突发事件对供应链系统结构的影响,借助于复杂网络模型来探讨供应链系统的结构稳定性。在供应链管理中,主要存在以下几类突发事件:

(1) 随机性突发事件:此类突发事件随机地破坏供应链中企业的生产、企业之间的供应关系或运输线路,如非典、禽流感;

(2) 蓄意攻击性突发事件:此类突发事件蓄意破坏供应链网络中的核心企业或关键供应关系或关键运输线路,如 9·11 恐怖事件;

(3) 混合性突发事件:此类突发事件同时具有随机性和蓄意攻击性的特征,即突发事件不仅随机破坏供应链中企业的生产、企业之间的供应关系或运输线路,同时也蓄意破坏供应链网络中的核心企业或关键供应关系或关键运输线路,如 1999 年 9 月 21 日台湾大地震;

当然,突发事件的类型根据不同的企业类型而又会有所不同,一些突发事件对于某些企业可能为蓄意攻击性的,而对于另外一些企业可能为随机性的,比如,1999 年 9 月 21 日台湾大地震对于全球生产计算机的供应链系统来说为蓄意攻击性的,因为世界范围内大多数计算机制造商需要的很大一部分主板来自于台湾的主板制造商,而对于另外一些类型的企业来说则为随机性突发事件。运用复杂网络模型分析供应链系统的结构稳定性,主要是运用去点、去边或混合去边去点方式来模拟突发事件对供应链系统稳定性的影响,观察整个供应链网络结构稳定性和响应性随着去点(或去边)数目的增加会产生怎样的变化。根据突发事件类型,本文将供应链系统结构稳定性分析中的去点和去边方式分为以下几类:

(1) 随机性去点:每次随机删除供应链网络中的节点(成员企业),即此类突发事件任意破坏供应链中成员企业的生产运营;

(2) 蓄意性去点:每次删除供应链网络中势最大的节点,即此类突发事件蓄意破坏供应链中核心企业的生产运营;

(3) 随机性去边:每次随机删除供应链网络中的边,即此类突发事件任意破坏供应链中企业之间的供应关系或运输线路;

(4) 蓄意性去边:每次删除供应链网络中权最大的边,即此类突发事件主要破坏供应链中企业之间的核心供应关系或核心运输线路;

(5) 随机混合型:每次按照一定比例分别随机删除供应链网络中的任意节点和任意边,即此类突发事件同时破坏供应链中企业的生产运营和企业之间的供应关系或运输线路;

(6) 蓄意混合型:每次按照一定比例分别删除供应链网络中势最大的节点和权最大的边,即此类突发事件同时蓄意破坏供应链中核心企业的生产运营和网络中核心的供应关系或运输线路;

(7) 随机性去点—蓄意性去边混合型:每次按照一定比例随机删除供应链网络中的任意节点,并同时删除权最大的边,即此类突发事件随机性破坏供应链中企业的生产运营,并同时破坏网络中核心供应关系或运输线路;

(8) 蓄意性去点—随机性去边混合型:每次按照一定比例分别删除供应链网络中势最大的节点和随机删除网络中的任意边,即此类突发事件同时破坏供应链中核心企业的生产运营,并任意破坏网络中的供应关系或运输线路。

本文主要侧重于运用随机性去点和蓄意性去点两种去点方式进行研究,即运用随机性去点和蓄意性去点来模拟突发事件对供应链系统结构稳定性和响应性等一些重要宏观结构特征的影响,观察整个供应链网络的结构稳定性和响应性随着去点数量的增加出现怎样的变化,以此来分析供应链网络的结构稳定性特征,并识别提高结构稳定性的一些有效策略和管理建议。当然,运用上述其他类型的去点或去边方法研究突发事件对供应链系统的结构稳定性问题也很有意义,但本文暂不作研究。在运用去点方法分析突发事件对结构稳定性的影响时,主要分析最大连通子图的大小即最大连通子图中包含的节点企业总数,随着去点数目的增加如何变化;如果最大连通子图大小在较短的时间内快速下降,甚至急剧下降到零,则表明此时供应链网络的结构稳定性很低,反之,若最大连通子图的大小在较长时间范围内不变或下降速度非常缓慢,则表明此时供应链网络具有较高的结构稳定性。而在分析突发事件对响应性的影响时,主要观察最大连通子图的平均最短路径和最大连通子图的最长距离随着去点数目的增加如何变化;如果最大连通子图的平均最短路径和最长距离快速下降,则此时供应链系统在遭遇到突发事件后,响应性比较低,否则供应链系统具有较高的响应性。

### 7.3.3 模型构建及结构突变分析

#### 1. 几种常见网络模型

网络常常被人们用来表示人与人之间的社会关系、网络之间的网络连接等复杂的系统关系。常见的网络有规则网络、随机图、小世界网络和无标度网络等。在对供应链的研究中,常用一些网络图,比如层级网络,表示供应链的结构关系,层级网络能够较为清晰的标示出供应链网络中各层级之间的买卖、物流等关系。另外,还有学者采用小世界网络和无标度网络等复杂网络对供应链进行研究。我们简单介绍规则网络和随机网络、小世界网络、无标度网络,这些网络可以进行供应链结构的描述,同时这些网络的构成原理也可以作为供应链网络形成和演化的一种依据和参考。

在网络中常用到度分布、平均最短路径、集聚系数等统计量和概念。度分布是复杂网络的一个重要统计特征量。这里的度指的是与该节点连接的边数。度在不同的网络中所代表的含义也不同,在社会网络中,度可以表示个体的影响力和重要程度,度越大的个体,其影响力就越大,在整个组织中的作用也就越大,反之亦然。度分布则表示节点度的概率分布函数  $P(k)$ ,它指的是节点有  $k$  条边连接的概率。平均最短路径指网络中所有节点对之间的平均最短距离。这里节点间的距离(Distance)指的是从一个节点到另一个节点所要经历的最少边数,平均最短路径和直径衡量的是网络的传输性能与效率。集聚系数衡量的是网络的集团化程度,单个节点的聚类系数被定义为它所有相邻节点之间连边的数目占可能的最大连边数目的比例。类似的,网络的聚类系数是所有节点聚类系数的平均值。这部分的内容读者可以从汪小帆等的著作(汪小帆等,2006)中进一步了解。

##### (1) 规则网络和随机网络

人们通常把一维链,二维正方晶格等称为规则网络。规则网络是指平移对称性晶格,任何一个格点的近邻数目都相同。随机网络是另一个极端,由  $N$  个顶点构成的图中,可以存在  $C_N^2$  条边,我们从中随机连接  $M$  条边所构成的网络就叫随机网络。规则网络与随机网络的典型几何性质包括:度分布,平均集聚程度与平均最短距离。

##### (2) 小世界网络模型

随着计算机存储与处理数据能力的增强,人们对大量的真实网络的数据进行了统计分析,发现真实网络具有较大的集聚系数和较小的平均最短距离,而随机网络的集聚系数很小。为了再现真实网络的基本特性,1998 年, Watts 和 Strogatz 提出了小世界网络模型,简称 WS 模型(Watts and Strogatz, 1998)。

WS 模型结合了规则网络较大的集聚系数和随机网络较小的平均最短距离的特征,很好地描述了真实网络的小世界特性。

### (3) 无标度网络模型

ER 模型和 WS 模型的度分布与许多现实网络都不相符,用它们来描述这些现实网络具有很大的局限性。因此科学家们只好寻求外模型来更好地描述现实网络。1999 年,Barabasi 和 Albert(1999)通过追踪万维网(World Wide Web, WWW)的动态演化过程发现了许多复杂网络具有大规模的高度自组织特性,即多数复杂网络的节点度服从幂律分布,并把具有幂律度分布的网络称为无标度网络(Barabasi and Albert, 1999)。Barabasi 和 Albert 认为,增长和择优连接是无标度网络形成的两种必不可少的机制。

## 2. 供应链网络构建

供应链网络是一类典型的复杂经济网络。特别是基于 IT 技术的电子商务的出现,更加剧了供应链网络结构的复杂性。与传统销售方式不同,通过电子商务,每个企业可以与其他任何企业进行信息交流和贸易往来。有效的供应链管理需要充分协调各成员企业之间的相互关系,因此研究者经常运用多代理系统(multi-agent system)来描述供应链网络,进而可以将此多主体系统描述为复杂网络。本节根据影响供应链网络结构演化的一些重要因素,运用复杂网络理论建立了一个供应链网络结构演化的动力学模型,进而考虑此复杂供应链网络的结构稳定性,即供应链网络中的企业在遭遇到突发事件时对整个供应链网络稳定性的影响。在分析供应链网络的结构稳定性时,采用复杂网络稳定性研究中的常用方法:蓄意攻击和随机攻击,并且分析成员企业在供应关系建立过程中使用的不同策略对整个供应链网络结构稳定性的影响。

在供应链网络不断发展变化的过程中,每个成员企业在选择自己的目标企业并与之建立供应关系时,通常考虑的是一个企业的综合能力,包括产品质量、价格、交货的准时性、成本、企业的声誉和财务状况等综合因素,而非简单的依据一个企业供应关系的多少。而且通常每个企业在一些关键领域,通过与生产关键零部件的供应商建立共享信息、共担风险、共同获利的长期合作伙伴关系,降低供应链的总成本、降低总的库存水平、降低缺货的风险,产生了更大的竞争优势。而在一些非关键领域,则经常通过竞标等方式来选择短期供应商,这样可以将总成本保持在一个较低的水平。同时,每个企业在选择其他相关企业建立供应关系时,经常会考虑地域因素。在通常情况下,较长的空间距离意味着更高的采购和运输成本,甚至还必须支付高额的关税。因此,在目标企业实力大致相当的条件下,大多数企业都倾向于与距离较近的企业建立供应关系。这样一系列的因素交织在一起强烈地影响着每个企业供应关系的选择策略。

运用复杂网络来描述供应链系统,复杂网络中的节点  $u$  表示供应链中的企业,边 $(u, v)$ 则表示供应链中企业  $u$  和  $v$  之间的供应关系,当然,这些关系包括传统意义上的分销和供应关系,也包括电子商务模式下的网络销售方式。根据以上描述,一个企业在选择其他目标企业并与之建立供应关系时,通常会考虑以下主要因素的影响:

- (1) 首先分析每个目标企业的综合能力,包括价格、质量、交货准时性、财务状况等,然后在综合评价的基础上进行选择,并与之建立供应关系。在下面的复杂供应链网络模型中,用势  $s_i$  来表示企业  $i$  的综合能力,而且运用权  $w_i$  来表示具有供应关系的两个企业之间的交易量(可转换为同一衡量标准,如美元等);
- (2) 每个新加入的企业在选择企业并与之建立供应关系时,不但要考虑每个企业的势,而且还会考虑企业之间实际的空间距离  $d_{ij}$ ;
- (3) 每个企业在建立供应关系时,通常在一些关键领域与其他强势企业建立长期的战略合作伙伴关系,而在一些非关键领域通过频繁的竞标降低成本从而获得成本优势,因此,在一些非关键领域只是与其他目标企业建立短期合约关系。
- (4) 在供应链网络中,通常情形下,制造商、批发商和零售商的总数量在整个网络中不尽相同。在下面的分析中,假设制造商、批发商和零售商的总数量可以用  $l_m$ ,  $l_w$  和  $l_r$  表示,则三者之间通常存在如下关系:  $l_m < l_w < l_r$ , 而且每个企业的供应关系数也会不同,若用  $n_m$ ,  $n_w$  和  $n_r$  表示每个制造商、批发商和零售商的供应关系数量,则通常有如下关系:  $n_m > n_w > n_r$ 。

### 3. 供应链网络演化模型

根据以上影响供应链网络演化的重要因素,运用复杂网络理论的相关术语,给出供应链网络结构演化的复杂网络模型,此复杂供应链网络模型具有如下演化算法:

- (1) 初始条件:假设初始时,在一个半径为  $L$  的二维圆盘中随机均匀地分布着  $N_0$  个全连通的节点,且每条边的权为  $w_0$ ;
- (2) 增长:在以后增长过程中的每一步,将一个新节点  $n$  置于盘中一个随机均匀选取的位置  $x_n$ ,这个新节点与网络中已存节点相连  $m$  条边,其中从已存节点中按照势从大到小的顺序选取  $M$  个节点,组成一个局部世界,并按照如下择优概率从局部世界中选取  $m_1$  个节点相连  $m_1$  条边:

$$\prod_{n \rightarrow i} = \frac{s_i^w e^{-d_{ni}/r_c}}{\sum_j s_j^w e^{-d_{nj}/r_c}}, \quad (7.1)$$

其中  $r_c$  为距离的度量单位,  $d_{ni}$  为节点  $n$  与  $i$  的 Euclidean 距离,而在局部世界以外的企业中随机地选择  $m_2 = m - m_1$  个节点相连  $m_2 = m - m_1$  条边。这里

的模型将通常的加权网络模型推广到具有空间限制的网络演化模型,在  $m_1$  条新边中,一个新节点选择已有节点连接时不但考虑势,势越大越有可能被选取,而且还要考虑空间距离,距离越近越有可能被选取。因此,这  $m_1$  个新节点会根据势和距离等综合因素来选择连接的节点。

(3) 边权演化动力学:给定每条新边( $n, i$ )的权为  $w_0$ ,由于新边( $n, i$ )的加入使得节点  $i$  的其他连边( $j, i$ )的权也随时发生变化(这里指考虑局部变化),并且按照如下规则进行变化:

$$w_{ij} \rightarrow w_{ij} + \delta \frac{w_{ij}}{s_i^w}, j \in V(i) \quad (7.2)$$

当边( $j, i$ )的权发生变化后,继续增加新节点,直到获得满意的网络规模为止。式(7.2)中的参数  $\delta$  因实际网络的不同而各异,且具有如下含义:若  $\delta < w_0$ ,则新节点不会对相邻边权产生显著的影响;若  $\delta \approx w_0$ ,则新边( $n, i$ )的权  $w_0$  大致被分配到其他相邻边( $j, i$ );若  $\delta > w_0$ ,则新边的增加将对其他相邻边的权产生很大的影响。

上面的供应链网络演化模型与三个参数相关:

- A. 一个为度量标准与整体系统大小的比率,  $\eta = \frac{r_c}{L}$ ;
- B. 第二个为式(7.2)中的参数  $\delta$ ;
- C. 第三个参数为  $m_1$  条新边连接时所选取的范围  $M$ 。

根据这三个参数值的变化,将可以获得不同的网络结构。首先来分析一下前面两个参数,由参数  $\eta$  和  $\delta$  可以得到如图 7.31 所示矩阵

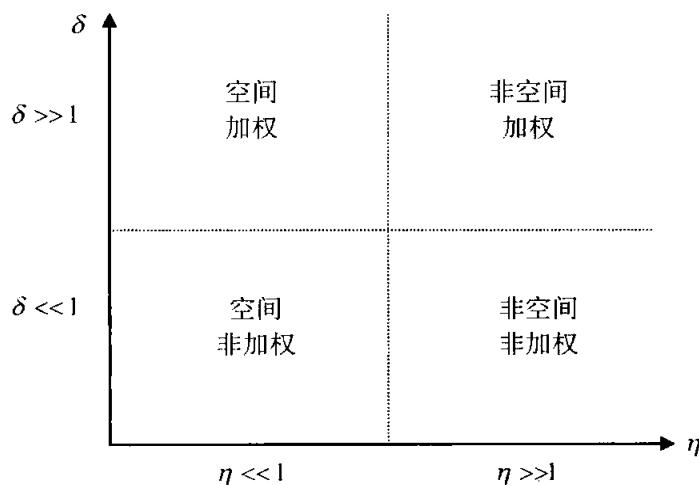


图 7.31 参数  $\eta$  和  $\delta$  的不同值对应不同的模型的不同极限区域(Barrat et al., 2005)

从图 7.31 可见,当  $\eta \gg 1$  时,网络的演化几乎不受空间距离的限制,当  $\eta$  逐

渐降低时,网络演化受到的空间限制越来越明显,以至于  $\eta \ll 1$  时,演化过程几乎完全受空间距离的影响。

由于上述网络演化算法比较复杂,很难得出统计特征量的解析表达式,因此,在下面的分析中,主要通过仿真来分析供应链网络的宏观统计规律。首先来分析供应链网络演化到一定规模时具有的宏观统计特征量,然后分析整个供应链网络在遭遇到突发事件时的结构稳定性。

根据上面供应链网络演化的算法,运用基于多 Agent 的计算实验方法进行建模分析,在试验过程中,各类参数取值如下:网络中的节点总数为  $n = 1000$ ,  $w_0 = 2$ ,  $l_m : l_w : l_r = 1 : 2 : 3$ ,  $n_m = 6$ ,  $n_w = 3$ ,  $n_r = 1$ , 初始网络的节点数  $n_0 = 10$ ,  $\delta = 1$ 。

**结论 7.1** 按上述规则演化生成的供应链网络的度分布、势分布、权分布为典型的幂律分布,即

$$P(k) \sim k^{-r_1}, P(s) \sim s^{-r_2} \text{ 和 } P(w) \sim w^{-r_3}$$

其中指数  $r_1, r_2, r_3$  满足  $1 \leq r_1, r_2, r_3 \leq 2$ 。

由图 7.32(a)和 7.32(b)可见,指数  $r_1, r_2, r_3$  分别在 1.70, 1.90 和 1.80 左右。因此,供应链网络是一类典型的无标度加权网络,即少数成员企业具有数量巨大的供应关系和非常明显的竞争优势,而大多数成员企业只具有少数的供应关系和很小的竞争势力。而且由图 7.32(c)可知,边权分布具有幂律分布,这说明在整个供应链网络中,只有少数供应关系的贸易量非常大,而大多数供应关系的贸易量相对较小。同时,图 7.32(d)表示,在上面生成的供应链网络中,节点度与节点势之间几乎具有线性关系,即节点度较大的核心企业拥有的贸易量通常也比其他非核心企业大很多。在供应链网络中,这些度和势很大的企业便成为网络中的核心企业。上面的宏观统计特性规律很好地揭示了供应链网络结构演化过程中的宏观统计特征。随着世界经济的迅速发展和市场竞争的日益激烈,制造企业逐渐注意到企业的经营外部环境、与本企业相关的供应者、销售者和用户建立起相互协作的战略伙伴关系,在这一过程中,总会有一个或一些企业充当发起者,成为供应链中的核心企业。该核心企业除了能创造特殊价值,长期控制比竞争对手更擅长的关键性业务外,还要协调好整个供应链中供应商、制造商、分销商与最终用户等之间的关系,为了控制整个供应链的运行,核心企业必然成为整个供应链的信息集成中心、管理控制中心、物流中心。并由此可见,供应链是围绕核心企业进行构建的。例如,大家熟悉的耐克、阿迪达斯等公司都是典型的核心企业。这些公司本身没有生产线,其产品全部来自于分布在世界各地的关系企业,尤其是一些发展中国家。公司本身只专注于产品设计、品牌推广

和市场开拓,并以此来维系和推进供应链的生存和发展。通过这种合作方式,耐克、阿迪达斯等公司不但自身获得了巨大利益,也为那些缺乏产品设计和市场开拓能力的企业提供了生存和发展的机会。

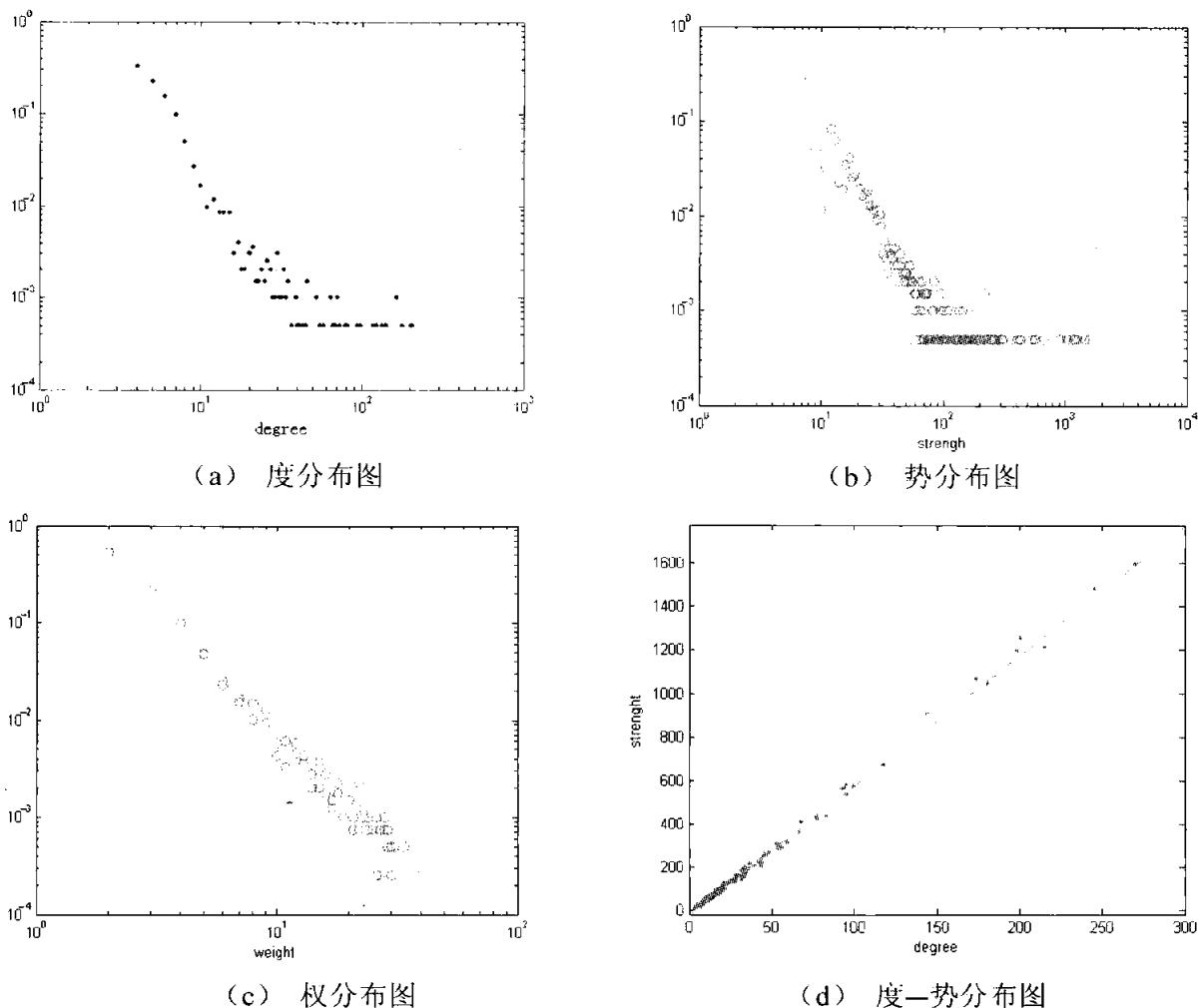


图 7.32 供应链网络的度分布图、势分布图、权分布图和度—势分布图

那么具有统计特征的供应链网络是否具有快速的响应能力和很高的柔性呢?从图 7.33(a)可知,供应链网络具有类似于 BA 网络的平均最短路径和集聚系数,即供应链网络具有比随机网络更短的平均最短路径。此特性反映了供应链网络通常具有快速响应能力,即能够根据顾客需求的变化迅速组织生产,并把适当数量的产品在适当的时候运送到合适的消费者手中。这符合供应链网络发展的要求。现在的顾客需求发生了巨大的变化,顾客的需求呈现多样化,顾客对产品和服务的要求越来越高,而且顾客的耐心和忠诚度也越来越低,很短时间的延迟交货就有可能导致订单的流失和客户的离开,因此,所有这些变化要求供应链网络具有快速反应的能力。而且从图 7.33(b)可知,上述的供应链网络具有与 BA 网络相似的集聚系数,也就是说比随机网络具有更高的集聚系数,这说明了供应链网络具有很高的柔

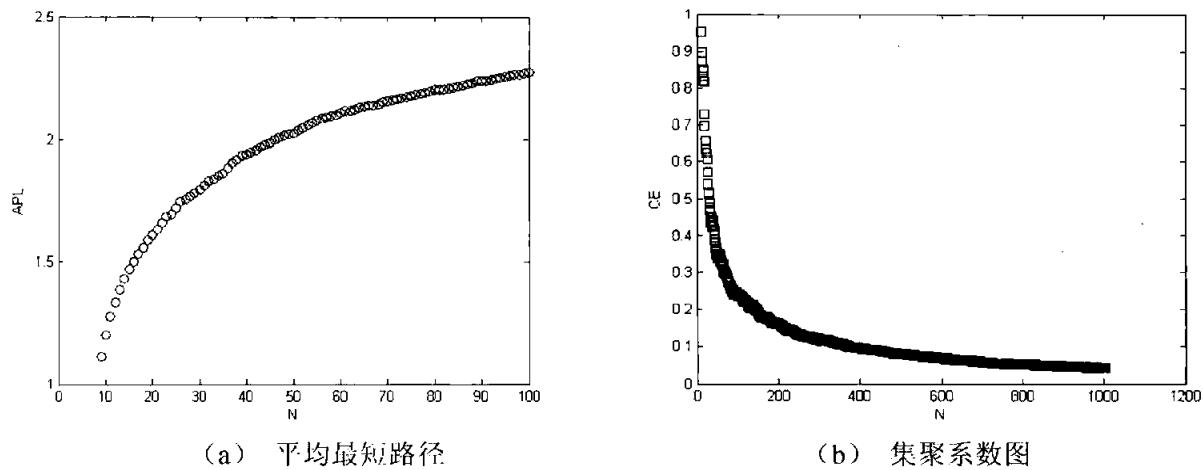


图 7.33 平均最短路径和集聚系数图

性，即供应链网络中大多数供应关系具有很多可替代的供应关系，因此，每个企业都力争在具有替代关系的企业中选择运作成本最低的供应关系。

#### 4. 结构突变分析

现在来分析供应链网络的结构稳定性,也叫做结构鲁棒性。众所周知,供应链网络经常会遭遇到一些突发事件的攻击,严重时会造成供应链网络的瘫痪解体。那么供应链网络到底具有怎样的结构稳定性呢?又怎样来提高供应链网络结构稳定性呢?下面主要讨论供应链网络的结构稳定性。主要采用通用的复杂网络研究方法,即采取两类攻击方法:随机攻击和蓄意攻击,其中随机攻击是指随机删除供应链网络中的节点,而蓄意攻击则是每次删除供应链网络中势最大的点,这里运用随机攻击和蓄意攻击来模拟供应链网络中的随机性突发事件和蓄意破坏事件。当然,也可以采用其他的攻击方式:随机去边和有意去边,但结果与下面的结论相差无几。

从图 7.34 和图 7.35 可见各类攻击对供应链网络结构的影响：

(1) 当供应链网络遭遇到蓄意攻击后,整个供应链网络在一个临界值之后全部坍塌解体(图中的临界值大致在 0.35 左右),即最大连通子图中包含的节点数几乎为零,而且最大连通子图的平均最短路径和最长距离在上升到最大值后急剧下降到零,这表明开始时供应链网络的响应速度和柔性随着删除节点数目的增加急剧下降,然后在一个临界值后,网络完全解体,此时网络的响应速度和柔性也几乎为零。

(2) 当供应链网络遭遇到随机攻击后,整个供应链网络缓慢解体,即最大连通子图中包含的节点数以较慢的速度下降到零;而且最大连通子图的平均最短路径和最大距离在达到最大值后开始缓慢下降,这表明此时供应链网络的响应速度和柔性开始时缓慢下降,然后再达到一个临界值后快速下降到零。

(3) 从图 7.34 和图 7.35 可见,当遭遇突发事件攻击后,供应链网络的平均最短路径和最长距离在一定时间范围内都快速上升,表明供应链网络的反应性在遭遇攻击后变得越来越差。但两类攻击的影响有很大区别,当遭遇蓄意攻击后,网络的反应性是在短期内逐渐下降,在短时间达到一个临界值后,整个网络

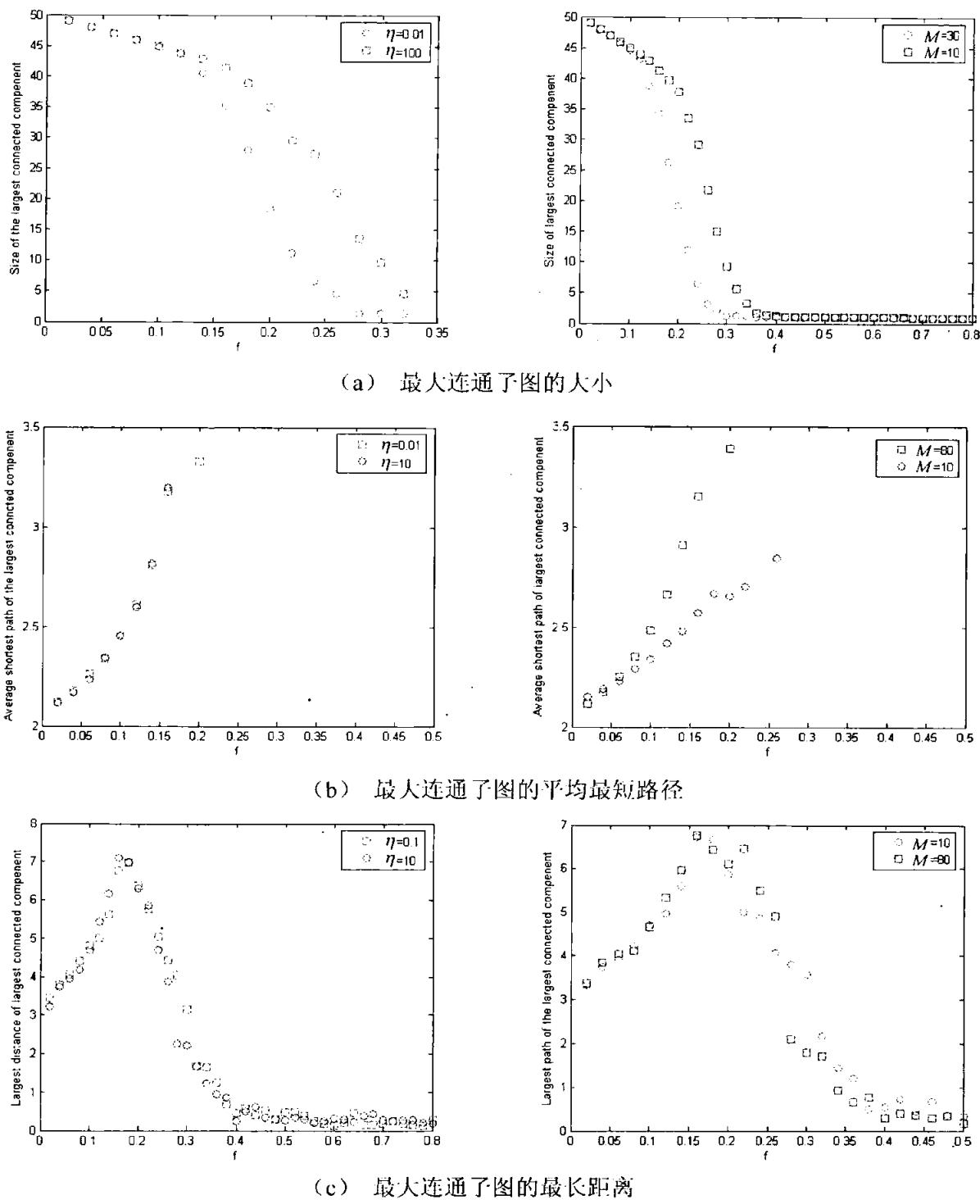


图 7.34 遭遇到蓄意攻击事件后网络的鲁棒性和反应性

完全坍塌,此时供应链网络的反应性也降为零。而当网络遭遇随机性突发事件攻击后,虽然网络的反应性逐渐变差,但整个网络在较长时间内依然具有一定的响应能力和柔性。

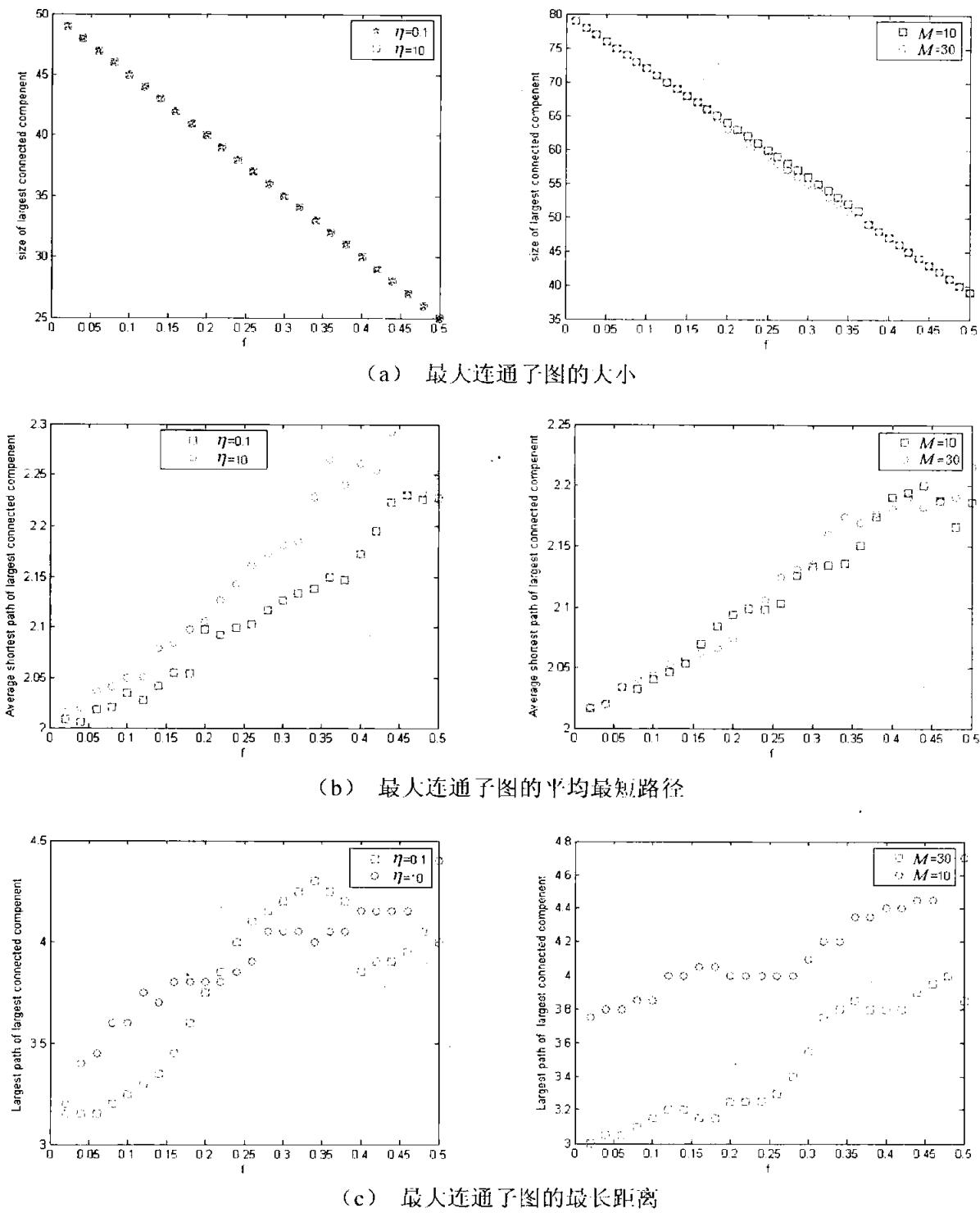


图 7.35 遭遇到随机性突发事件后的鲁棒性和反应性

**结论 7.2** 供应链网络结构对于随机攻击具有很高的结构稳定性,而对于

蓄意攻击则具有很低的结构稳定性。

这主要是由供应链网络中成员企业之间的非均质性所造成的。从前面供应链网络的宏观统计特性可知:供应链网络中大多数企业具有很低的势,而只有很少的企业具有非常大的势,因此导致了供应链网络对于蓄意攻击的脆弱性和对于随机攻击的强抵御能力。基于此,应该对核心企业进行重点维护,以防止各类突发事件对供应链网络造成的毁灭性的打击。

从图 7.34 和图 7.35 还可以看出:在供应关系的建立过程中,当距离敏感参数  $\eta$  和局部世界范围  $M$  的值不断变化时,整个供应链网络的抗攻击能力也略有不同。

**结论 7.3** 距离敏感参数  $\eta$  和局部世界范围  $M$  对供应链网络结构稳定性有着强烈的影响:

- (1) 当提高  $\eta$  时,供应链网络的抗蓄意攻击能力得到增强,而对于网络抗随机攻击能力的影响却并不明显;
- (2) 当提高  $M$  时,供应链网络的抗蓄意攻击能力得到减弱,而对于网络抗随机攻击能力的影响同样也不明显。

从上述理论分析可得到一些富有价值的供应链管理决策建议:

- (1) 应该尽量避免在局部范围内选择过多的企业建立供应关系,因为局部地区的政治、经济、文化以及自然环境等因素非常类似。因此相同地区的企业比较容易受到同一突发事件的影响,由此造成供应链网络的抗突发事件能力变得很低。
- (2) 应该尽量避免在少数的企业范围内选择过多企业建立战略伙伴关系(长期供应契约),而应在大范围的目标企业中进行选择,当企业越来越追求精益结构时,企业的有效性逐渐得到提高,但供应链的结构稳定性却逐渐变低,因此企业应该在供应链网络的结构稳定性和有效性之间作出权衡,根据自身供应链网络的特点以及环境,决定供应链网络所需要的结构稳定性和有效性的程度。不能一味地强调结构稳定性或有效性。很高的稳定性要求与很多企业建立供应关系。因此需要的成本会大幅度升高;然而,很高的有效性意味着与较少的企业建立长期的战略合作关系,这样结构稳定性会变得很低,一旦供应关系中断,企业的损失便会很大。因此,供应链管理者需慎重权衡。

### 7.3.4 小结

本节根据供应链系统结构演化的内在动态机制以及影响供应链网络结构演化的一些重要因素,建立了供应链网络结构演化的复杂加权网络模型,在此模型中,不但考虑了供应链系统企业之间契约关系的强弱,而且还考虑了地域因素对

供应链系统结构演化过程的影响,并且由于供应链成员企业之间竞争势力的不均衡以及供应关系之间交易量的不均衡,运用具有空间影响因素的加权网络模型来描述供应链系统的结构演化过程。并在基础上分析了供应链网络演化发展到具有较大规模时的宏观统计特征,分析显示供应链网络是一类典型的加权无标度网络,不但供应链网络节点的势分布服从幂律分布,而且所有供应关系的权也服从幂律分布,即只有少数的企业和供应关系为核心企业和核心供应关系,而大多数企业为非核心企业。而且根据网络的度—势分布图可见,供应链网络中供应关系数量较多的企业通常也具有雄厚的企业势力。最后重点分析了供应链网络的结构稳定性,其中主要运用随机性去点和蓄意攻击性去点两种去点方式来模拟环境中的随机性和蓄意攻击性突发事件,发现供应链网络对于随机性突发事件来说具有很大的结构鲁棒性,而对于蓄意攻击的突发事件来说,却显得非常脆弱。这主要是由供应链系统的无标度特性导致的,因此,在供应链管理中应该尽可能地采取一切措施保护好系统中的核心企业和核心供应关系。同时分析了企业选择供应关系的距离敏感度以及局部世界的选择方法对供应链网络结构稳定性的影响,并由此得到一些可以有效提高系统结构稳定性的决策和管理建议。

## 参 考 文 献

- Allwood, J. M., Lee, J., The design of an agent for modelling supply chain network dynamics. International Journal of Production Research, 2005, 43(22):4875~4898.
- Amit, S. Soundar, K., Mark, G., Supply chain networks: a complex adaptive systems perspective. International Journal of Production Research, 2005, 43(20), 4235~4265.
- Anderson, J., Marklund, J., Decentralized inventory control in a two-level distribution system. European Journal of Operational Research, 2000, 127:483~506.
- Aronis, K. P., Magou, I., Dekker, R., Tagaras, G., Inventory control of spare parts using a Bayesian approach: A case study. European Journal of Operational Research, 2004, 154:730~739.
- Arreola-Risa, A., G. A. De Croix, Inventory management under random disruptions and partial back-orders. Naval Res. Logist. 1998, 45:687~703.
- Arunachalam, R., Sadeh, N. M., The supply chain trading agent competition. Electronic Commerce Research and Applications, 2005, 4:66~84.
- Ashayeri J., Heuts R. J. M., Lansdaal H. G. L., Strijbosch L. W. G., Cyclic production-inventory planning and control in the pre-Deco industry: A case study. International Journal of Production Economics, 2006, 103:715~725.
- Ashmos, D. P., Duchon, D., McDaniel, R. R., Huonker, J. W., What a mess! Participation as a simple managerial rule to “complexity” organizations. Journal of

- Management Studies, 2002,39:189~206,
- Avenali A. , Bassanini A. , Simulating combinatorial auctions with dominance requirement and loll bids through automated Agents. Decision Support Systems, 2007,43:211~228.
- Aviv, Y. , On the benefits of collaborative forecasting partnerships between retailers and manufacturers. Management Science, 2007,53(5):777~794.
- Baker, A. D. , A survey of factory control algorithms that can be implemented in a multi-agent heterlirchy: dispatching, scheduling, and pull. Journal of Manufacturing Systems, 1998,17(4):297~320.
- Bakos J. Y. , Brynjolfsson E. , Information technology, incentives and the optimal number of suppliers. Journal of Management Information Systems, 1993,10(2):37~53.
- Ballou, R. H. , Inventory Policy Decisions: Reasons for Inventory. Business Logistics Management, Prentice~Hall, Englewood Cliffs, 2004, NJ, pp.328~330.
- Barabási, A. L. , Albert, R. , Emergence of scaling in random networks, Science 286,1999: 509~512.
- Barrat A. , Barthelemy, M. and Vespignani, A. , The effects of spatial constraints on the evolution of weighted complex networks. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2005,5:1742~5468.
- Berger, P. , Gerstenfeld, A. , Zeng, A. Z. , How many suppliers are best? A decision-analysis approach. Omega, 2004,32(1):9~15.
- Bertsimas, D. , A robust optimization approach to inventory theory. Operations Research, 2006,54(1):150~168.
- Brito, M. P. , Flapper, S. D. P. , Reverse logistics: a review of case studies. Working Paper, Erasmus University Tottredam, Econometric Institute Report EI 2002,21.
- Cachon, G. P. , Lariviere, M. A. , Supply Chain Coordination with Revenue-Sharing Contracts: Strength and Limitations. Management Science, 2005,51(1):30~44.
- Cachon, G. , Supply chain coordination with contracts [M]. In: De Kok, A. G. , Graves, S. (Eds.), Handbooks in Operations Research and Management Science. Elsevier, Amsterdam, 2003.
- Caridi, M. , Cavalieri, S. , Multi-agent systems in production planning and control: an overview. Production Planning & Control, 2004,15(2):106~118.
- Causen, J. , Hansen, J. , Larsen, J. , Disruption management. OR/MS Today, 2001,28(5): 40~43.
- Chatfield, D. C. , Hayya, J. C. , Harrison, T. P. , A multi-formalism architecture for agent-based, order-centric supply chain simulation. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007,15:153~174.
- Chen, Y. , Li, K. W. , Marc, K. D. , Hipel, K. W. , A case-based distance model for multiple criteria ABC analysis. Computers & Operations Research, 2006,35:776~796.
- Chen, Z. L. , Pundoor, G. , Order assignment and scheduling in a supply chain. Operations Research, 2006,54(3):555~572.
- Chi, H. , Ersoy, O. K. , Moskowitz, H. , Ward, J. , Modeling and optimizing a vendor managed replenishment system using machine learning and genetic algorithms. European

- Journal of Operational Research, 2007,180:174~193.
- Chiang, C. , Optimal control policy for a standing order inventory system. European Journal of Operational Research, 2007,182:695~703.
- Choi, T. Y. , Dooley, K. J. , Rungtusanatham, M. , Supply networks and complex adaptive systems: control versus emergence. Journal of Operations Management, 2001, 19: 351~366.
- Corbett, C.J. , Stochastic inventory systems in a supply chain with asymmetric information: cycle stocks, safety stocks, and consignment stock. Operations Research, 2001, 49: 487~500.
- Dada, M. , N.C. Petrucci, L. B. Schwarz, A newsvendor model with unreliable suppliers. Working paper, Krannert Graduate School of Management, Purdue University, West Lafayette, IN, 2003.
- Díez, M.D. , Erik, Y.B. , Fjeld, M. , Lie, B. , Inventory control of particulate processes. Computers and Chemical Engineering, 2008,32:46~67.
- Ding, D. , Chen, J. , Coordinating a three level supply chain with flexible return policies, Omega. 2008,36(5):865~876.
- Eppen, G. , Iyer, A. , Backup agreements in fashion buying — the value of upstream flexibility. Management Science, 1997,43(11):1469~1684.
- Fleischmann, M. , Reverse logistics network structures and design, Erasmus Research Institute of Management (ERIM), Rotterdam School of Management, Erasmus University Rotterdam, the Netherlands, 2001:1~21.
- Fleischmann, M. , Krikke, H. R. , Dekker, R. , Flapper, S. D. P. , A characterization of logistics networks for product recovery. Omega-International Journal of Management Science, 2000,28(6):653~666.
- Fox, E. J. , Metters, R. , Semple, J. , Optimal inventory policy with two suppliers. Operations Research, 2006,54:389~393.
- Fox, M. S. , Chionglo, J. F. , Barbuceanu, M. , The integrated supply chain management system [R]. Internal report of the enterprise integration laboratory, Department of Industrial Engineering, University of Toronto (Ontario, Canada), 1993.
- Gavirneni, S. , Kapuscinski, R. , Tayur, S. , Value of information of capacitated supply chains. Management Science, 1999,45(1):16~24.
- Geng, Q. , Mallik, S. , Inventory competition and allocation in a multi-channel distribution system. European Journal of Operational Research, 2007,182(2):704~729.
- Ghose, S. , Liu, J. J. , Bhatnagar, A. , Kurata, H. , Modeling the role of retail price formats, and the retailer competition types on production schedule strategy. European Journal of Operational Research, 2005,164:173~184.
- Gong, Q. , Lai, K. K. , Wang, S. , Supply chain networks: Closed Jackson network models and properties. International Journal of Production Economics, 2008,113(2):567~574.
- Govindu, R. , Chinnam, R. B. MASCF: A generic process centered methodological framework for analysis and design of multi-agent supply chain systems. Computers & Industrial Engineering, 2007,53:584~609.

- Gregg, D. G., Walczak, S., Auction Advisor: an agent-based online-auction decision support system. *Decision Support Systems*, 2006, 41: 449~471.
- Gürler, Ü., Parlar, M., An inventory problem with two randomly available suppliers. *Oper. Res.*, 1997, 45: 904~918.
- Gurnani, H., Akella, R., Lehoczky, J., Supply management in assembly systems with random yield and random demand. *IIE Trans.*, 2000, 32: 701~714.
- Harland C., Brenchley, R., Walker, H., Risk in supply networks. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2003, 9: 51~62.
- Harmon, M. E., Harmon, S. S., Reinforcement learning: A tutorial. Available from: <<http://www.nada.kth.se/kurser/kth/2D1432/2004/rltutorial.pdf>>, 1996.
- Hoetker, G., Swaminathan, A., Mitchell, W., Modularity and the impact of buyer-supplier relationships on the survival of suppliers. *Management Science*, 2007, 53(2): 178~191.
- Iyer, A. V., Bergen, M. E., Quick response in manufacturer-retailer channels. *Management Science*, 1997, 43(4): 55~570.
- Janssen, M., The architecture and business value of a semi-cooperative, agent-based supply chain management system. *Electronic Commerce Research and Applications*, 2005, 4: 315~328.
- Jennings, N., Wooldridge, M., Sycara, K., A roadmap of agent research and development, *Autonomous agents and Multi-agent Systems*, 1998, 1(1): 7~38.
- Jiao, J., You, X., Kumar, A., An agent-based framework for collaborative negotiation in the global manufacturing supply chain network. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2006, 22: 239~255.
- Johansen, S. G., Pure and modified base-stock policies for the lost sales inventory system with negligible set-up costs and constant lead-times. *Internal Journal of Production Economics*, 2001, 71: 391~399.
- Kamrad, A., Siddique, A., Supply contracts, profit sharing, switching, and reaction options. *Management Science*, 2004, 50(1): 64~82.
- Kawtummachai, R., Van, H. N., Order allocation in a multiple-supplier environment. *International Journal of Production Economics*, 2005, 93~94: 231~238.
- Kelle, P., Miller, P. A., Stock out risk and order splitting. *International Journal of Production Economics*, 2001, 71(1): 407~415.
- Kelton, D. W., Sadowski, R. P., Sturrock, D. T. (Eds.), *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, New York, 2004.
- Kim, Y. S., Maximizing sellers' welfare in online auction by simulating bidders' proxy bidding agents. *Expert Systems with Applications*, 2007, 32: 289~298.
- Kopach, R., Balcioglu, B., Carter, M., Tutorial on constructing a red blood cell inventory management system with two demand rates. *European Journal of Operational Research*, 2008, 185: 1051~1059.
- Krikke, H. R., Harten, A., Schuur, P. C., Business case Oce: reverse logistic network redesign for copiers. *OR Spectrum*, 1999, 21(3): 381~409.

- Kull, T., Closs, D., The risk of second tier supplier failures in serial supply chains: Implications for order policies and distributor autonomy. European Journal of Operational Research, 2008,186:1158~1174.
- Kwon, I. H., Kim, C. O., Jun, J., Lee, J. H., Case-based myopic reinforcement learning for satisfying target service level in supply chain. Expert Systems with Applications. doi: 10.1016/j.eswa.2007.07.00.
- Kwon, O., Im, G. P., Lee, K. C. MACE-SCM: A multi-agent and case-based reasoning collaboration mechanism for supply chain management under supply and demand uncertainties. Expert Systems with Applications, 2007,33(3):690~705.
- Labarthe, O., Espinasse, B., Ferrarini, A., Montreuil, B., Toward a methodological framework for agent based modeling and simulation of supply chains in a mass customization context. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007,15:113~136.
- Lau, J. S. K., Huang, G. Q., Mak, K. L., Impacts of sharing production information on supply chain dynamics: a multi-agent simulation study. In 30th international conference of computers & industrial engineering, Tinos Island, Aegean Sea, Greece, 2002a.
- Lau, J. S. K., Huang, G. Q., Mak, K. L., Web-based simulation portal for investigating impacts of sharing production information on supply chain dynamics from the perspective of inventory allocation. Integrated Manufacturing Systems, 2002b, 13(5), 345~358.
- Law, A. M., Kelton, W. D., Simulation Modeling and Analysis, third ed. McGraw-Hill, New York. 2000.
- Lee, H. T., Wu, J. C., A study on inventory replenishment policies in a two echelon supply chain system. Computers & Industrial Engineering, 2006,51:257~263.
- Lee, J. E., Hong, Y., A stock rationing policy in a  $(s, S)$  controlled stochastic production system with 2 - phase Coxian processing times and lost sales. International Journal of Production Economics, 2003,83:299~307.
- Lee, J. Y., Schwarz, L. B., Lead-time reduction in a  $(Q, r)$  inventory system: An agency perspective. International Journal of Production Economics, 2007,105:204~212.
- Li, J., Liu, L. Supply chain coordination with quantity discount policy. Int. J. Production Economics 2006,101:89~98.
- Liang, W. Y., Huang, C. C., Agent-based demand forecast in multi echelon supply chain. Decision Support Systems, 2006,42:390~407.
- Lin, F., Lin, Y., Integrating multi-agent negotiation to resolve constraints in fulfilling supply chain orders. Electronic Commerce Research and Applications, 2006,5:313~322.
- Lindgren, B. W. "Probability Models. Statistical Theory", third ed, MacMillan, New York, 1976.
- Lu, T., Yih, Y., An agent-based production control framework for multiple-line collaborative manufacturing. International Journal of Production Research, 2001,39(10): 2155~2176.
- Maity, K., Maiti, M., A numerical approach to a multi-objective optimal inventory control problem for deteriorating multi-items under fuzzy inflation and discounting. Computers and Mathematics with Applications. Doi: 10.1016/j.camwa.2007.07.011.

- Mangina, E., Vlachos, I. P., The changing role of information technology in food and beverage logistics management: beverage network optimization using intelligent agent technology. *Journal of Food Engineering*, 2005, 70: 403~420.
- Mele, F. D., Guillen, G., An agent based approach for supply chain retrofitting under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, 2007, 31: 722~735.
- Mendelson, H., Tunca, T. I., Strategic spot trading in supply chains. *Management Science*, 2007, 53(5): 742~759.
- Milgate, M., Supply chain complexity and delivery performance: An international exploratory study. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2001, 6: 106~118.
- Mohebbi, E., Supply interruptions in a lost sales inventory system with random lead time. *Computers & Operations Research*, 2003, 30: 411~426.
- Mohsen, E., Optimal integrated production and inventory control of an assemble-to-order system with multiple non-unitary demand classes. *European Journal of Operational Research*. 2009, 194: 127~142.
- Moinzadeh, K., Aggarwal P., Analysis of a production/inventory system subject to random disruptions. *Management Science*, 1997, 43(11): 1577~1588.
- Monteiro, T., Roy, D., Anciaux, D., Multi-site coordination using a multi-agent system. *Computers in Industry*, 2007, 58: 367~377.
- Moses, M., Seshadri, S., Policy mechanisms for supply chain coordination. *IIE Transactions*, 2000, 32: 245~262.
- Nagurney, A., Dong, J., Zhang, D., A supply chain network equilibrium model. *Transportation Research: Part E*, 2002, 38(5): 281~303.
- Parlar, M., Continuous review inventory problem with random supply interruptions. *Eur. J. Oper. Res.* 1997, 99(2): 366~385.
- Parlar, M., Perry, D., Inventory models of future supply uncertainty with single and multiple suppliers. *Naval Res. Logist.* 1996, 43: 191~210.
- Pasternack, B. A., Optimal Pricing and Return Policies for Perishable Commodities. *Marketing Science*, 1985, 4(2): 166~176.
- Petrovic, D., Roy, R., Petrovic, R., Modeling and simulation of a supply chain in an uncertain environment. *European Journal of Operational Research*, 1998, 109: 299~309.
- Qi, X. T., Bard, J., Yu, G., Supply chain coordination with demand disruptions. *Omega*, 2004, 32(4): 301~312.
- Qi, X., Bard, J. F., Yu, G., Disruption management for machine scheduling: the case of 5PTschedules, Working paper, Department of Management Science and Information Systems, 2003.
- Randall, T., Netessine, S., Rudi, N., An empirical examination of the decision to invest in fulfillment capabilities: A study of internet retailers. *Management Science*, 2006, 52(4): 567~580.
- Ruiz-Torres, A. J., Mahmoodi, F., A supplier allocation model considering delivery failure, maintenance and supplier cycle costs. *International Journal of Production Economics*,

- 2006, 103(2): 755~766.
- Ruiz-Torres, A. J., Mahmoodi, F., The optimal number of suppliers considering the costs of individual supplier failures. *Omega*, 2007, 35(1): 104~115.
- Scarf, H., Arrow, K. J., Karlin, S., Suppes, P., The optimality of (s, S) policies in the dynamic inventory problem, *Mathematical Methods in Social Sciences*, Stanford University Press, Stanford, CA, 1962.
- Schwartz, J. D., Wang, W., Rivera, D. E., Simulation-based optimization of process control policies for inventory management in supply chains. *Automatica*, 2006, 42: 1311~1320.
- Shay, J. P., Rothaermel, F. T., Dynamic competitive strategy: Towards a multi-perspective conceptual framework. *Long Range Planning*, 1999, 6: 559~572.
- Shen, Z. M., A profit-maximizing supply chain network design model with demand choice flexibility. *Operations Research Letters*, 2006, 34(6): 673~682.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi E., Designing and managing the supply chain. New York: McGraw-Hill, 1999.
- Smeltzer, L. R., Siferd, S. P., Proactive supply management: the management of risk. *International Journal of Purchasing and Materials Management*, 1998, 34(1): 38~45.
- Snyder, L. V., Daskin, M. S., Reliability models for facility location: The expected failure costcase. *Transportation Science*, 2005, 39(3): 400~416.
- Snyder, L. V., Shen, Z. M., Supply and Demand Uncertainty in Multi-Echelon Supply Chains. Working paper, Lehigh University, 2006.
- Snyder, L. V., Scaparra, M. P., Daskin, M. S., Church, R. L., Planning for Disruptions in Supply Chain Networks. *Tutorials in Operations Research*, Informs 2006: 234~257.
- Snyder, L. V., A tight approximation for a continuous-review inventory model with supplier disruptions. Working paper, Lehigh University, 2006.
- Song, J. S., Zipkin, P. H., Inventory control with information about supply conditions. *Management Sci.*, 1996, 42(10): 1411~1419.
- Surana, A., Kumara, S., Greaves, M., Raghavan, U. N., Supply-chain networks: a complex adaptive systems perspective. *International Journal of Production Research*. 2005, 43(20): 4235~4265.
- Swaminathan, J. M., Smith, S. F., Sadeh, N. M., Modeling supply chain dynamics: a multi-agent approach. *Decision Sciences*, 1998, 29(3): 607~632.
- Tah, J. H. M., Towards an agent-based construction supply network modeling and simulation platform. *Automation in Construction*, 2005, 14: 353~359.
- Tang, C. S., Perspectives in supply chain risk management. *Int. J. Production Economics*, 2006, 103: 451~488.
- Taylor, T. A., Sale timing in a supply chain: when to sell to the retailer. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2006, 8(1): 23~42.
- Thadakamalla, H. P., Raghavan, U. N., Kumara, S., Survivability of multi-agent based supply networks: a topological perspective. *Intelligent System s and Their Applications*, 2004, 19(5): 24~31.

- Tomlin, B., On the Value of Mitigation and Contingency Strategies for Managing Supply Chain Disruption Risks. *Management Science*, 2006, 52(5):639~657.
- Tomlin, B. T., Snyder, L. V., On the value of a threat advisory system for managing supply chain disruptions. Working paper, Lehigh University, 2006.
- Tomlin, B., Wang, Y., On the value of mix flexibility and dual sourcing in unreliable newsvendor networks. *Manufacturing Service Oper. Management*, 2005, 7:37~57.
- Troy, J. S., Lin, F. R., Michael, J. S., Simulation of Order Fulfillment in Divergent Assembly Supply Chains. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 1998, 1(2) <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/1/2/5.html>.
- Tsay, A., Quantity-flexibility contract and supplier ~ customer incentives. *Management science*. 1999, 45(10):1339~1358.
- Tütüncü, G. Y., Akz, O., Apaydn, A., and Petrovic, D., Continuous review inventory control in the presence of fuzzy costs. *International Journal of Production Economics*. doi: 10.1016/j.ijpe.2007.10.01.
- Wang, Q., Wu, Z., Improving a supplier's quantity discount gain from many different buyers. *IIE transactions*. 2000, 32(11):1071~1079.
- Wang, Q., Discount Pricing Policies and the Coordination of Decentralized Distribution Systems. *Decision Sciences*, 2005, 36(4):627~646.
- Watts, D. J., Strogatz, S. H., Collective dynamics of "small-world" networks. *Nature*, 1998, 393:440~442.
- White, D., Application of systems thinking to risk management. *Management Decision*, 1995, 33:35~35.
- Xiao, T., Sheng, Z., Xia, Y., Coordination of a supply chain with one-manufacturer and two-retailers under demand promotion and disruption management decisions. *Annals of Operations Research*, 2005, 135:87~109.
- Xu, M., Gao, C., Supply chain coordination with demand disruptions under production cost Function. *Wuhan University Journal of Natural Science*, 2005, 10(3):493~498.
- Xu, M., Qi, X., Yu, G., Zhang, H., Gao, C., The demand disruption management problem for a supply chain system with nonlinear demand functions. *Journal of system Science and Systems engineering*, 2003, 12(1):82~97.
- Xu, M., Yu, G., Zhang, H., Coordinating dyadic supply chains when production costs are disrupted under reversion. *IIE Transactions*, 2006, 38:765~775.
- Zarandi, M. H. F., Pourakbar, M., Turksen, I. B., A Fuzzy agent based model for reduction of bullwhip effect in supply chain systems. *Expert Systems with Applications*, 2007, 34:1680~1691.
- Zhang, F., Competition, cooperation, and information sharing in a two-echelon assembly system. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2006, 8:273~291.
- Zhang, T., Zhang, D., Agent-based simulation of consumer purchase decision-making and the decoy effect. *Journal of Business Research*, 2007, 60:912~922.
- Zhang, X., Inventory control under temporal demand heteroscedasticity. *European Journal of Operational Research*, 2007, 182:127~144.

- Zhang, D. Z., Anosike, A. I., An agent-based approach for e-manufacturing and supply chain integration. *Computers & Industrial Engineering*, 2006, 51: 343~360.
- Zsidisin, G. A., Managerial perceptions of supply risk. *Journal of Supply Chain Management*, 2003b, 38: 14~25.
- Zsidisin, G. A., A grounded definition of supply risk. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2003a, 9: 217~224.
- Zsidisin, G. A., Ellram, L. M., Carter, J. R., Cavinato, J. L., An analysis of supply risk assessment techniques. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 2004, 34: 397~397.
- 陈剑, 陆今芳. 多智能自主体企业供应链系统的构建及激励机制研究. *系统工程理论与实践*, 2002(7): 1~8, 16.
- 陈夫华, 高成修. 基于收入共享合同的多阶段供应链协调. *武汉大学学报(理学版)*, 2006, 52(3): 291~295.
- 陈旭. 考虑期权合同供应链的零售商订货研究. *管理科学学报*, 2006, 9(3): 17~23.
- 陈志祥. 分布式多代理体系结构供应链协同技术研究. *计算机集成制造系统*, 2005, 11(2): 212~219.
- 成思危. 复杂科学与管理. *中国科学院院刊*, 1999, 3: 175~183.
- 达庆利, 黄祖庆, 张钦. 逆向物流系统结构研究的现状及展望. *中国管理科学*, 2004, 12(1): 131~137.
- 戴汝为. 复杂巨系统科学——一门二十一世纪的科学. *自然杂志*, 1997, 19(4): 187~192.
- 刁力, 刘西林. 基于蚁群算法的供应链系统脆性研究. *华东交通大学学报*, 2007, 24(1): 82~84.
- 何波, 杨超, 张华, 石永东. 固体废弃物逆物流网络优化设计. *系统工程*, 2006, 24(8): 38~40.
- 胡劲松, 王虹. 三级供应链应对突发事件的价格折扣契约研究. *中国管理科学*, 2007, 15(3): 103~107.
- 黄小原, 晏妮娜. 供应链鲁棒性问题的研究进展. *管理学报*, 2007, 4(4): 521~528.
- 蒋旻. 基于多代理的供应链制造系统生产计划运行模式的研究. *科技进步与对策*, 2006(2): 125~127.
- 赖茂宇, 郑建国. 供应链风险量化分析与优化控制. *东华大学学报(自然科学版)*, 2007(2): 159.
- 雷臻, 徐玖平. 供应链中突发事件的应急管理探讨. *项目管理技术*, 2004, 5: 26~29.
- 李永先, 胡祥培, 熊英. 基于 eM~Plant 的车辆路径问题仿真模型. *系统工程*, 2007, 25(6): 19~24.
- 刘希龙. 供应网络弹性研究. 上海交通大学博士学位论文, 2007.
- 刘心报, 吴谊胜, 经怀明. 考虑价格折扣的两级供应链库存模型. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2006, 29(2): 140~143.
- 鲁其辉, 朱道立, 林正华. 带有快速反应策略供应链系统的补偿策略研究. *管理科学学报*, 2004, 4: 14~23.
- 马祖军, 代颖. 产品回收逆向物流网络优化设计模型. *管理工程学报*, 2005, 19(4): 114~117.
- 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放复杂巨系统及其方法论. *自然杂志*, 1990, 13(1): 3~10.
- 申成霖. 基于循环经济理论的逆向物流网络规划研究. 天津大学博士学位论文, 2004. 12.
- 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用. 清华大学出版社, 2006.

- 吴军,李健,汪寿阳.供应链风险管理中的几个重要问题.管理科学学报,2006,9(6):1~12.
- 徐家旺,黄小原.市场供求不确定供应链的多目标鲁棒运作模型.工业工程与管理,2007,12(2):7~11.
- 杨庆定,黄培清.国际供应链中基于数量柔性契约的订购策略.上海理工大学学报,2005,27(5):386~388.
- 于辉,陈剑,于刚.回购契约下供应链对突发事件的协调应对.系统工程理论与实践,2005,8:38~43.
- 于辉,陈剑,于刚.协调供应链如何应对突发事件.系统工程理论与实践,2005(a),25(7):9~16.
- 于景元.从定性到定量综合集成方法及其应用.中国软科学,1993,5:31~35.
- 岳辉.不确定环境下再利用逆向物流网络构建研究.西南交通大学博士学位论文,2007.
- 张军.计算管理研究方法及其实现.南京大学博士学位论文,2007.
- 张铁柱,刘志勇,滕春贤,胡运权.多商品流供应链网络均衡模型的研究.系统工程理论与实践,2005,7:61~66.
- 钟波,谢挺.供应链系统的脆性模型研究.中国管理科学,2005,13(10):443~446.
- 钟德强,仲伟俊,梅姝娥,张晓琪.合作竞争下的供应商数量优化问题研究.管理科学学报,2003,6(7):57~65.



## 投资者学习、策略调整与市场均衡

以理性行为为基础,有效市场理论为基石,逻辑严密并具有统一分析框架的现代金融学理论,大大加深了人们对金融市场的认识和理解,对现代经济和金融理论的发展产生了重要影响,推动了金融市场的不断创新和繁荣。

然而,近年来许多学者的实证研究表明金融市场中存在许多与有效市场假说相悖、无法用现代金融理论解释的异常现象。这些异象的存在促使人们对在理性行为假设下的分析框架进行反思,使人们认识到这种行为假设与金融市场经济主体实际决策行为之间存在的差异及其带来的问题。金融市场上经济主体的行为具有典型的有限理性的特征,主体存在明显的学习行为。在市场、金融工具、机构和投资者的相互作用下,金融主体之间相互竞争并进行策略调整,在市场法则的作用下淘汰进化,正是金融市场运行发展的基本机制(孙碧波,2007)。

金融市场价格形成与均衡机制一直都是金融学家关注的热点问题。自上而下的理论与实证分析是常见的研究方法,而基于主体的计算管理学的研究方法就是将金融系统作为复杂自适应系统研究范式的具体体现。通过底层主体间的反复交互以及主体不同的学习模式,自下而上地自发涌现出许多宏观现象,以动态而非静态、进化而非僵化、非线性而不是线性的观点来重新审视金融系统。深入微观主体来研究宏观现象,这更符合金融系统发展演化的实际,同时给金融学研究提供了一个全新的研究视角与方法。

本章引入基于主体的计算管理的理论研究框架,利用相对比较成熟的多主体建模工具 Swarm 来实现对投资者在市场中的学习行为研究,试图从计算模拟角度给出行为主体学习行为对投资策略、市场价格与市场均衡影响的证据,力图发现证券市场中各种宏观现象和规则产生的内在机制。

具体结构安排如下:第一节是问题描述,根据研究背景提出研究问题;第二节为投资者学习行为对市场价格与均衡影响的理论模型构建,包括对要仿真问

题的一些假设描述和仿真中的一些模型构建进行详细说明;第三节是投资者学习机制下的人工股市仿真的实现过程及其结果分析。

## 8.1 问题的描述

本章将借用 Swarm 通用可编程软件进行仿真。通过定义适合计算机运行条件下的投资者策略调整的学习规则,以及通过智能仿真投资者这样一个策略调整的过程,试图去研究投资者在这种策略调整中对自身投资业绩的影响、对资产价格的影响以及对市场均衡的影响。

基于以上思路与仿真平台,提出如下假设:

假设一:金融工具与投资者的数目。设置整个金融市场可交易的资产为一支股票,投资者数目 400 个。

假设二:初始资产份额。经济主体的股票交易最小单位为 1 手,所以设置初始持股数为 10 手,初始现金 10000 元。

假设三:无风险投资收益与红利。对没有买入股票的现金,其无风险利率或投资其他资产的收益率(相当于投资债券等)为 4%,且股票随时间随机生成红利。

假设四:价格形成机制。价格形成机制采用集合竞价方式得出一个出清价格,对满足买入价格  $\geq$  出清价格  $\geq$  卖出价格的指令出清。为简化,每天集合竞价交易一次,没有连续交易。虽然没有连续交易,但连续的这种集合竞价从长期来看可以看成是连续交易,同时集合竞价的价格形成机制可以不需要大量的投资者数目。

假设五:投资者学习规则与策略调整。投资者学习投资策略则根据之前的投资策略业绩好坏,进行适应度排序淘汰业绩差的策略,同时在适应度高的策略基础上随机交叉和变异生成新策略从而不断调整学习。

## 8.2 人工股市模型结构

基于上节的问题假设,本节对整个的模型结构进行概要介绍。在 Swarm 仿真程序中主要包括三类对象:ModelSwarm、ObserverSwarm 和 Agents(仿真智能体)。其中的 ModelSwarm 和 ObserverSwarm 都是 Swarm 类的子类,它们二者建立了 Swarm 仿真程序的框架结构。Agent 则对应所要模拟的真实系

统中有代表性的微观个体和这些个体活动的环境,Agent 对象是 SwarmObject 类的子类,继承 SwarmObject 的一些现成方法以提供对探测器和内存管理的支持。

Swarm 一般的建模步骤如下:

1. 建立 ModelSwarm;
2. 定义 Agents(仿真智能体);
3. 建立 Agents 行为模式;
4. ModelSwarm 的时序安排;
5. 建立 ObserverSwarm;
6. 创建数据图像输出;
7. 建立主函数将上述所有过程连结起来,是模拟模型首先调用的程序。

由于模型仿真程序对 ModelSwarm 和 ObserverSwarm 这两个对象的定义与功能与一般的 Swarm 仿真程序并没有什么太大的不同,在此不详细叙述。而 Agents(仿真智能体)都是从类 SwarmObject 派生出来的,在本例中共有 World、Specialist、Dividend 和 Agent 四个直接子类,而从 Agent 又进一步派生出了 BFAgent 类,BFAgent 类又派生 BFcast 类。World 类仿真交易所环境; Specialist 类仿真价格生成;Dividend 仿真股票的红利生成;BFAgent 类仿真投资者及其策略。除此之外,模型还包含一些用于程序运行,结果输出及参数设置的其他一些类和文件。以下就上面提到的行为主体与行为模式、价格生成模型、交易市场环境和红利生成模型进行具体的说明。

### 8.2.1 交易市场环境

交易时交易所的外部环境更新由 World 类来完成。World 类保存着所有智能体共享的公共信息,如本期资产价格,上一期的资产价格,本期红利等等,同时,World 对象在仿真运行时又充当了 Agent 与 Specialist 这两类对象通讯的中介。可以在 World 类的定义中看到变量 price(当前资产价格)、oldprice(上一期的资产价格)、Dividend(当前红利)及记录前几期价格和红利的历史纪录等一些变量。

World 对象的 realWorld 变量是一个与资产市场实际状态相对应的字符串,它的结构与“预测员”的是一致的。World 类的方法大多是一些用于更新相应的属性和由其他对象调用来获得相应的属性在当前时刻的值。例如, getPrice 和 getDividend 都是由其他对象调用来获得当前市场上的资产价格 price 值和红利 Dividend 值,而 setPrice 和 setDividend 分别用来设置资产价格和红利的当前值。

World 对象比较重要的一个方法是 updateWorld 方法, 它用来更新前几期价格历史记录, 价格和红利的移动平均值, 并通过修改 realWorld 字符串来更新市场状态。

### 8.2.2 主体与行为模式

在模型的 Swarm 程序中, 作为仿真投资者的 BFAgent 类的特点是使用基于遗传算法的分类器预测下一期市场资产价格和红利, 从而决定自己的投资策略。BFAgent 类还定义了一些用于实现特定功能的成员变量和结构, 为他们提供具体的行为和功能。

BFAgent 类定义了一个名为 BFCast 的对象, 称之为预测员 (forecaster), 它对应着分类器系统中的一条投资策略。BFAgent 类定义了 fcast、activelist、lactivelist 三个链表对象, 分别用于保存一系列不同“预测员”。在模型中, 智能体的“预测员”采用遗传算法动态进化。在程序运行开始时, BFAgent 有一些不同的“预测员”, 适应度低的“预测员”会被淘汰, 并为新产生的“预测员”所替换。“预测员”的遗传进化体现了智能体的学习过程, 新的“预测员”代表投资者新的交易策略。智能体通过对这些新的投资策略进行比较判断, 最终采用其中效果最好的几种。具体地说, 每过 10 个时期, 就会有一些智能体被选中以修改它们的“预测员”。这些被选中的智能体将它们的所有“预测员”根据它们的适应度进行排列, 然后删除适应度最差的 10% 的“预测员”并用新产生的“预测员”来替代。

新的“预测员”用遗传算法进行随机交叉和变异生成。而每个“预测员”中条件部分的每一位则是按照一定的概率发生变化。“预测员”的学习过程是通过这种交叉和变异方法产生一个新的“预测员”。

具体学习模型如下: 先随机从 BFAgent 的“预测员”列表中选取四条投资策略并取其中适应度最高的二条作为父规则如“( # # # # 1 # # # # # # ) / (0.4, 0.6)<sup>①</sup>”, 然后调用父规则进行交叉生成一条临时的新投资策略。有了这条临时的新投资策略后, 继续调用这条投资策略变异产生的最终的新投资策略。具体交叉规则和变异概率见表 8.1:

每次按以上算法生成新的投资策略后, 调用它们复制到 BFAgent 的预测员列表取代选择出的那 10% 的适应度最弱的预测员。这样 BFAgent 就完成了一

<sup>①</sup> 在每一位上, “1”表示这条现象可以被观察到, “0”表示该现象未被观察到或没有实验。而“#”则表示对这种市场现象并不关心。此处可理解为“本期价格小于过去 5 期的价格移动平均”的市场条件下, 参数取值分别是 0.4 和 0.6, 如果 1 变为 0, 则表示“本期价格大于过去 5 期的价格移动平均”。

次学习过程。

BFAgent 类还有三个很重要的方法是 `prepareForTrading`, `getPriceAndDemand` 和 `updatePerformance`。方法 `prepareForTrading` 首先对所有 BFAgent 对象的公共信息进行更新, 按一定的概率决定是否调用 `performGA` 方法进行一次学习过程, 然后它将检查它的全部“预测员”, 从中选出一个与当前市场状态相匹配且适应度最大的一个预测员, 得到可用于计算下一期价格和红利的预期的参数。这些参数将在方法 `getPriceAndDemand` 中被用于计算下一期价格和红利的预期。方法 `getPriceAndDemand` 主要被另一对象 Specialist 调用, 根据 BFAgent 对下一期价格和红利的预期等信息来获得该 BFAgent 对下一期价格和红利的预期方法。`updatePerformance` 的作用是在本期资产价格确定之后, 根据 BFAgent 的“预测员”在本次预测的性能对其适应度进行更新。

表 8.1 交叉规则和变异概率

交叉后的值		父规则		
		1	0	#
父规则	1	1	#	1
	0	#	0	0
	#	1	0	#
变异概率		变异前		
		1	0	#
变异后	1	0.5	0.25	0.25
	0	0.25	0.5	0.25
	#	0.25	0.25	0.5

变量 `currentTime`、`lastgatime`、`avspecificity`、`gacount`、`nactive` 等都是和遗传算法有关的变量。方法 `initForecasts` 在对象创建初期被调用用于实现遗传算法的参数变量初始化, 设置初始值。

### 8.2.3 价格形成模型

模型中价格生成由 Specialist 类来完成, Specialist 对象的作用是在每一期收集各个 Agent 对资产的需求信息来设定市场上的资产价格, 以达到使资产市场出清的目的。

Specialist 对象在模型中的价格形成设计如下<sup>①</sup>:

(1) 调用所有 BFAgent 的 getPriceAndDemand 方法, 获取每个 BFAgent 的报价及其相应的卖出/买入量。

(2) 根据集合竞价价格形成的方法, 确定供需平衡时的成交价格。

(3) 根据该成交价格, 调用 completeTrades 方法, 及时更新各 BFAgent 持有资产的头寸 position, 持有现金数量 cash, 及当前财富/初始财富比率 relativeWealth。

(4) 具体的价格形成模型中采用固定  $\theta$  型公式(8.1):

$$p = p_{old} (1 + \theta(bid_{total} + offer_{total})) \quad (8.1)$$

$\theta$  值一经确定就不再改变, 资产价格只与  $p_{old}$ 、 $bid$  和  $offer$  有关,  $p_{old}$  为上期价格,  $bid$  为需求,  $offer$  为供给, 在模型中分别指买入和卖出。

specialist 进行市场交易和流程控制的功能是由 performTrading, getVolume 和 completeTrades 方法完成的。PerformTrading 由 ASMMModelSwarm 的方法 periodStepPrice 调用查询各个 Agent 对资产的需求信息, 初步确定资产价格。CompleteTrades 方法的功能是在交易完成之后更新全部 Agent 的 position, cash, profit 等属性。

#### 8.2.4 红利生成模型

模型中的红利生成由 Divident 类来完成, 虽然它不与实际的资产交易市场的任何事物相对应, 但是将这个对象从中抽象出来, 有助于程序的实现<sup>②</sup>。

Divident 类方法中最重要同时也是最主要的方法是 Divident 方法。Divident 方法的主要作用是计算本期的红利(Dividend)值。Divident 方法根据公式(8.2):

$$d_t = \bar{d} + \rho(d_{t-1} - \bar{d}) + \varepsilon_t \quad (8.2)$$

计算得到红利的值, 其中  $\varepsilon_t$  是一个均值为 0, 方差为  $\sigma_\varepsilon^2$  的服从高斯分布的随机变量。在计算出 dividend 后, 还要保证 dividend 在比较合理的范围内取值, 即  $\minDividend \leqslant \text{Dividend} \leqslant \maxDividend$ 。最后该方法返回 dividend 的值。

① 参见:Nelson Minar, Roger Burkhart, Chris Langton, Manor Askenazi. Swarm Documentation.

② 参见:Arthur W. B. J. H. Holland B. Lebaron R. G. Palme and P. Talyer Asset Pricing under Endogenous Expectations in an Artificial Stock Market In: W. B. Arthur (eds.) The Economy as an Evolving Complex System II. Redwood City CA: Addison-Wesley 1997.

### (3) 本章小结

本章基于计算管理理论分析框架,仿真模拟了特定学习规则下行为主体投资策略的演化过程,及其对投资业绩、市场价格与均衡的影响机制。由于交易资产种类、主体类型、主体学习及策略、市场环境等模拟条件的限制,对股票市场的模拟与现实股市规则会有一定程度上的不同。但后续的研究可以设置更多贴近现实的规则,比如涨跌幅的限制、政策与监管对投资者行为的影响等等,使模拟环境更贴近中国现实股市,从而使仿真结果也更具有现实意义。可以预见,随着计算机技术的高速发展,复杂金融系统的仿真已经成为可能,也是一种必然趋势。相信不久的将来,可以对金融领域的各种复杂系统进行更多更广泛更贴近现实的仿真模拟,这些仿真模拟将会从一个全新的角度让我们去理解和解释更多的金融现象,也可以为更好地完善我国的金融市场提供建设性的指导作用。

## 参考文献

- Seru A, Shumway T, Stoffman N., Learning by trading, Working Paper, 2006.
- Franci F., Learning the optimal trading strategy, Physica A, 2001;213~225.
- Tesfatsion, L., Agent-based computational economics, ISU Economics Working Paper, 2002.
- Johnson, N. F., Lampert, D., Jeffries, P., Hart, M. L., Howison, S., Application of multi-agent games to the prediction of financial time-series, Physica A, 2001;299;222~227.
- Minar, N., Burkhardt, R., Langton, C., Askenazi, M., A toolkit for building multi-agent simulations, SFI, Working Paper, 1996.
- Terna, P., Economic Simulation in Swarm: Agent-based modelling and object oriented programming, The Electronic Journal of Evolutionary Modeling and Economic Dynamics., Issue, 2002,1013(1).
- 邓凯. 基于 Agent 的金融市场仿真研究. 上海交通大学硕士论文,2003.
- 方美琪,张树人. 复杂系统建模与仿真. 北京:中国人民大学出版社,2005.
- 金士尧,李宏亮,党岗,王召福,刘晓建. 复杂系统计算机仿真的研究与设计. 中国工程科学, 2002(4):52~57.
- 刘大海,王治宝,孙洪军,张瀚. 基于 Agent 的股票价格行为仿真. 计算机工程, 2004(10): 168~170.
- 刘维妮,韩立岩. 基于人工股市模型的投资者仿真研究. 管理学报, 2007(7);414~420.
- 卿菁. 多代理人仿真在金融市场中的应用研究. 武汉大学硕士论文,2003.
- 孙碧波. 情绪、学习与资产回报. 上海:上海世纪出版集团,2007.
- 张维,刘文财,王启文,刘豹. 面向资本市场复杂性建模: 基于 Agent 计算实验金融学. 现代财经, 2003,(1):3~7.
- 于同奎,曹国华. 基于 SWARM 的模拟股市及其特征性事实. 重庆大学学报, 2007,(4): 152~156.

## 第9章

# 企业技术创新策略选择的演化分析

企业的技术创新策略选择实际上是与市场竞争对手的一场博弈,是众多学者和企业家非常关注的问题之一。过去对该问题的研究多采用两种主流的研究方法:以博弈论为主要工具的定量研究方法,和以市场调查与定性描述为主要特征的研究方法。单纯使用一种研究方法,或者在面对社会经济系统的动态演化过程时会遇到一些困难,或者在分析企业间交互作用的复杂结构关系时难以下手。面对复杂的社会经济系统,利用计算实验方法,综合集成研究这类复杂系统问题,可以为研究工作提供新的视角,发现一些用其他方法很难得到的规律。

## 9.1 问题描述

应用博弈论对企业技术创新的研究中,“智猪博弈”(张维迎,2002)是一个著名的例子。关于“智猪博弈”的一种描述是:假设猪圈里有一头大猪和一头小猪,两只可以作出理性选择的具有智慧的猪在一个食槽进食。猪圈的一头有猪食槽,另一头安装着控制猪食供应的电钮,按一下电钮会有 10 个单位的猪食进槽,但是谁按电钮就会首先付出 2 个单位的成本。若小猪按电钮,则大、小猪吃到食物的收益比是 9 : 1,扣除成本后是 9 : -1;若大、小猪同时按电钮,则大、小猪的收益比是 7 : 3,扣除成本后是 5 : 1;如果大猪按电钮,则大、小猪的收益比是 6 : 4,扣除成本后是 4 : 4;如果谁都不按,无食可吃,皆为零。我们可以称之为经典“智猪博弈”,用表 9.1 描述,其中的条件是谁按电钮都要付出 2 单位成本,同时有 10 个单位的猪食进槽。

表 9.1 经典的“智猪博弈”模型

(大猪收益:小猪收益)	小猪按电钮	小猪等待
大猪按电钮	5 : 1	4 : 4
大猪等待	9 : -1	0 : 0

企业的技术创新策略实际上也是与市场竞争对手的一场博弈。在一个行业中,大企业相当于大猪,中小企业相当于小猪,按电钮相当于技术创新,流出并被获取的食物相当于企业所得到的收益。大企业生产和市场营销能力强,资金雄厚,推出一种新产品以后可以大量生产,迅速占领市场获取高额利润,这对应于大猪的吃食能力强,在按电钮后可以吃到的食物多。中小企业由于技术创新后的获利能力较差,所以,根据“智猪博弈”模型,它们的最优选择是等待大企业技术创新,或模仿,或提供相关服务,从大企业的创新中获得一部分利益。如果中小企业主动进行技术创新,有很大可能像“智猪博弈”中的小猪按电钮的结果一样,自己花费了成本,而好处却可能大部分为大猪所得,因为中小企业在技术开发、批量生产和市场营销方面都是弱势,与小猪抢夺食物能力差相类似。

“智猪博弈”说明,在博弈双方力量不对等的情况下,力量强的一方的正确策略是主动出击,行动优于等待。力量弱的一方的正确策略是等待,搭强者的便车,等待要优于行动(丘峰,2005)。这个“智猪博弈”模型给出了对企业技术创新类似决策活动的经济学解释。但是,如果据此认为这种现象在经济生活中十分常见,得出“搭便车”是提供给实力较弱的中小企业在技术创新方面的一种最佳选择,那实际上是一种对“智猪博弈”极端和片面的理解。如同许多经济研究一样,经济学模型高度抽象了现实经济活动的特征,并在一定的假设和边界条件下研究一类特定的问题,不能简单推广到一般的情况。上述“智猪博弈”模型只能说明在基本条件不变的情况下,某几个时间段中企业决策的最优选择。对可变的条件和较长时间的演化会产生什么样的情况?聪明的小猪为什么一定要选择“搭便车”?我们希望通过计算实验研究方法了解企业技术创新决策的实际演化过程。

## 9.2 计算环境、模型与实现过程

用计算实验方法研究产业层次的演化问题,需要为研究社会经济系统演化问题构造人工社会模型,整体结构一般需要包括三个层次:产业层次、企业层次和企业的决策层次。

产业层次可以包括:结构子系统、制度子系统、企业子系统、信息子系统、市

场子系统和人工环境子系统。

企业层次要反映与企业活动直接相关的要素,我们用 Agent 构造和描述人工企业,包括:企业属性、企业决策行为、企业可获取的资源和企业所处局部环境的影响等。

企业的决策层次采用人工社会模型中的人工主体的基元层次,它包括:

- (1) 储元,反映企业决策中的记忆、偏好、信息等一切可以用物理、化学或其他形式储存的与企业决策直接相关的东西;
- (2) 识元,企业对外部输入判断等识别活动;
- (3) 适元,企业决策中的适应机制,包括一切在组织目标驱动下而对储元所作的复制、改变等学习机制;
- (4) 事元,企业决策的行为输出。

### 9.2.1 基本假设与边界条件

以企业科技创新决策为出发点,用计算实验方法研究某行业中企业 Agent 决策变化的演化,其基本假设和边界条件如下。

#### 1. 计算实验的基本假设

- (1) 计算实验中所有企业都是某行业的技术、生产型企业。
- (2) 企业总数在 800 个左右,初始企业情况分别随机生成,小企业占 75%,中型企业占 20%,大企业占 5%。
- (3) 企业拥有的技术随时间推移,价值不断递减。
- (4) 与社会中的企业相对应,经济系统中的企业 Agent 是有限理性的。企业决策者被假定为期望在自身的满意程度、成本收益以及他们所试图寻找的目标函数中寻找满意解,也就是在每一步决策中,根据历史行为的结果,期望使自己的效益最大化,但受到环境等因素的制约,往往采取自身认为满意的行为。
- (5) 任一时刻,企业 Agent 可获取的信息是有限的。企业 Agent 的决策行为对行业系统的影响是局部有限的。
- (6) 企业 Agent 决策取自有限的行为规则集合,在演化中由于外部选择压力而不断淘汰“获利”较小和长期不用的规则,新的行为规则可通过学习或自身变异而产生,并且可以继承(复制、遗传)。
- (7) 一些随机事件会影响企业 Agent 的行为,导致企业 Agent 在某时刻可能采取一些非理性的“无法预测”的行为。

#### 2. 计算实验的边界条件

在演化计算过程中,企业 Agent 总数保持不变。允许新的企业 Agent 进入系统、原有 Agent 退出系统和改变 Agent 在行业结构中的关系。

### 9.2.2 演化计算的实现过程

计算实验的处理过程如下：

- (1) 对企业 Agent 在行业系统中与技术创新直接相关的主要输入和输出要素进行大致分类并赋予唯一的编码；
- (2) 把每一类输入和输出与一组计算机的处理程序对应；
- (3) 使用一组 IF/THEN 规则(转换规则集合)描述输入与输出的对应关系；
- (4) 在演化计算过程中,根据企业 Agent 的输入和输出及其变化,综合计算各企业 Agent 和整个行业系统的状态变化,形成下一步计算的输入；
- (5) 利用智能演化算法动态调整系统的整体结构、企业 Agent 间关系和相互作用,以及计算企业 Agent 的学习和适应性变化；
- (6) 每一步演化计算过程中把系统状态、企业 Agent 的转换规则集合和属性等参数经统计处理后,就能得到整个行业系统演化进程的量化特征；
- (7) 集成使用各种有效的数学分析方法,对量化的数据进行处理,获取其中包含的有效信息,在此基础上对系统的演化问题作进一步研究；
- (8) 计算中设定 1 万次演化迭代计算过程。

### 9.2.3 计算参数设置

对企业技术创新压力和策略选择进行适当分类,作为计算研究企业 Agent 输入和输出的处理依据,同时把开发成本作为计算实验参数,通过调整该参数,计算各种条件下企业技术创新的策略选择。

#### 1. 对企业技术创新压力的分类

在计算研究分析中,把企业技术创新过程中直接和主要关注的以下 6 类压力作为计算参数,如表 9.2 所示。

表 9.2 企业技术与市场开发压力的分类

编号	压力分类	压力特征
1	人才	企业在技术创新中对人才的需求
2	环境	制度等外部条件对企业技术创新的影响
3	市场	技术创新成果的市场化转换可能性
4	生存	企业面临的生存压力
5	资金	企业面临的资金压力
6	信息	企业技术创新中对外部信息的获取

## 2. 对企业技术创新策略选择的分类

企业技术创新涉及技术开发与市场开发两大部分,其中技术开发涉及模仿、购买、合作开发或自主开发新技术,市场开发涉及争夺市场、合作开发市场、差异化策略开发市场等部分。根据著名经济学家曼斯菲尔德对美国和日本企业模仿创新的相对成本与耗时所做的比较表明:美国企业模仿创新成本是率先创新成本的 65%,所费时间是率先创新的 70%;日本企业模仿创新的成本是率先创新成本的 50%,耗费时间前者是后者的 72%。模仿创新比率先创新费时更少,成本更低。在技术创新的效果上,国外也同样有研究结果表明模仿创新比率先创新具有更大的优势。例如,在创新的成功率方面,模仿创新的成功率高达 87.5%,而率先创新的失败率达到 47%(袁红林和陈小锋,2002)。

我们把上述研究结果作为演化计算的参数,把企业技术与市场开发策略选择以及对应的成本和收益划分为以下 9 类(参见表 9.3),并试图通过计算实验研究方法,找出在一定的边界条件下,在企业技术创新演化过程中企业倾向选择的策略。其中对应“智猪博弈”模型中大、小猪吃食能力的不同,引入  $\delta$  参数,分别表示不同类型企业获取收益的能力。对于小型企业  $\delta = 1$ ;对于中型企业  $\delta = 3$ ;对于大型企业  $\delta = 10$ 。 $\alpha$  和  $\beta$  作为计算实验参数,分别表示从技术开发(含专利、技术转让)和市场获取的收益。

表 9.3 企业技术与市场开发策略选择的分类

企业策略选择编号	企业技术创新的行为特征	成功率%	成本	收益
1	模仿、购买、合作开发新技术+争夺市场	0.875	0.6+1.0	$(\alpha + \beta) * \delta$
2	自主开发新技术+争夺市场	0.53	1.0+1.0	$(\alpha + \beta) * \delta$
3	模仿、购买、合作开发新技术+合作开发市场	0.875	0.6+0.6	$(\alpha + \beta) * \delta$
4	自主开发新技术+合作开发市场	0.53	1.0+0.6	$(\alpha + \beta) * \delta$
5	模仿、购买、合作开发新技术+采取差异化策略开发市场	0.875	0.6+0.8	$(\alpha + \beta) * \delta$
6	自主开发新技术+差异化策略开发市场	0.53	1.0+0.8	$(\alpha + \beta) * \delta$
7	自主开发新技术+不开发市场	0.53	1.0+0	$(\alpha + \beta) * \delta$
8	搭便车:模仿新技术+争取市场	0.875	0.6+0.2	$(\alpha + \beta) * \delta$
9	等待:不自主开发新技术+不开发市场		0.2	$(\alpha + \beta) * \delta$

## 9.3 计算实验结果分析

### 9.3.1 依据经典“智猪博弈”模型条件的演化计算结果

依据经典的“智猪博弈”模型参数进行演化计算,关于企业技术创新策略选择的演化结果如图 9.1 至图 9.3 所示,图中曲线 L1 代表购买或合作开发新技术策略选择的演化趋势;L2 代表自主开发新技术策略选择的演化趋势;L3 代表模仿新技术(搭便车)策略选择的演化趋势;L4 代表自主开发新技术但不开发市场(出售技术)策略选择的演化趋势;L5 代表等待(不自主开发新技术也不开发市场)策略选择的演化趋势。

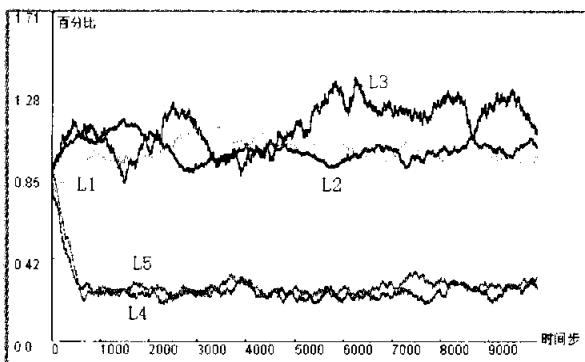


图 9.1 经典智猪博弈模型条件下大企业技术开发决策演化分布

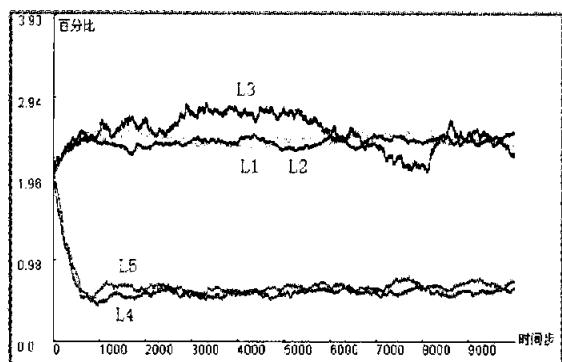


图 9.2 经典智猪博弈模型条件下中企业技术开发决策演化分布

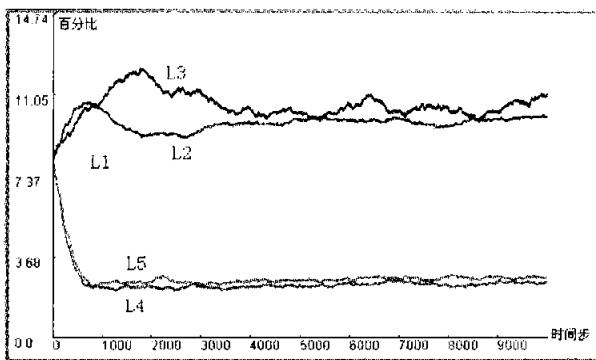


图 9.3 经典智猪博弈模型条件下小企业技术开发决策演化分布

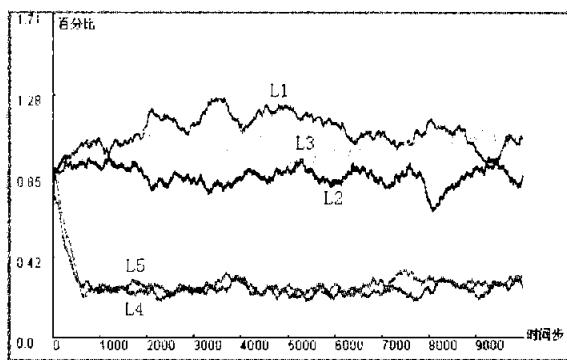


图 9.4 经典智猪博弈模型条件下大企业市场开发决策演化分布

从结果可以看出,在经典“智猪博弈”模型描述的条件下,大企业在技术开发中的理想选择并不是采取单一的固定策略,而是交替采取对自己最为有利的决

策,或自主开发,或合作开发,及购买新技术等。其中在中小企业具有较高自主开发选择的对应时期内,大企业也可能有较高的“搭便车”选择倾向。中、小企业具有较为类似的策略选择趋势,实力较弱的中小企业的确具有较高的选择“搭便车”倾向,但“搭便车”不是中小企业在技术创新中唯一的最佳选择,与大企业类似,中小企业也有较高的自主开发或合作开发新技术的策略选择倾向。由于演化条件中设定了企业拥有的技术随时间推移价值不断递减,相应获利能力将下降,同时设定了企业期望使自己的效益最大化,所以,无论是大企业还是中小企业,都很少选择等待的策略,如 L5 曲线所示。另外,由于决策计算的依据是企业尽可能获取较大的利益,因此单纯出售技术就不是企业在整个技术创新过程中的理想选择,如 L4 曲线所示。

依据经典的“智猪博弈”模型参数进行演化计算,关于企业技术创新中市场开发策略选择的演化结果如图 9.4 至图 9.6 所示,图中曲线 L1 代表争夺市场策略选择的演化趋势;L2 代表合作开发市场策略选择的演化趋势;L3 代表采取差异化策略开发市场策略选择的演化趋势;L4 和 L5 分别代表在拥有自主技术和不拥有自主技术条件下都不开发市场的策略选择演化趋势。

从演化结果可以看出,大企业倾向于采取争夺市场策略,这样会带来较大收益,同时,由于面临实力相当对手的竞争,差异化策略开发市场也具有较高的选择倾向。而中小企业的策略选择,主要偏好采取差异化策略开发市场。由于在演化计算中,企业市场开发是否成功有一个相对概率,又由于演化计算中企业间没有协商,大企业和中小企业一般都较少选择合作开发市场,这与合作成功的概率和信息,以及可能的风险有关。同样,由于不开发市场,企业得不到可以争取的利益,各类企业都很少选择不开发市场。

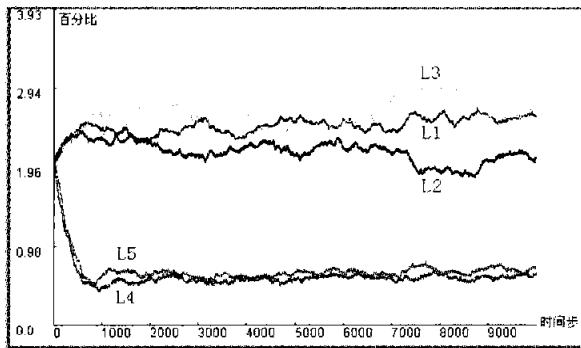


图 9.5 经典智猪博弈模型条件下中企业市场开发决策演化分布

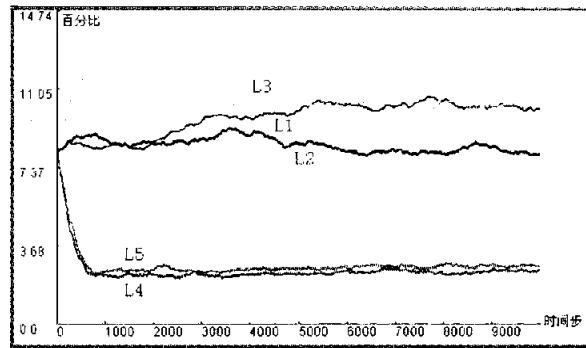


图 9.6 经典智猪博弈模型条件下小企业市场开发决策演化分布

以上演化结果表明,博弈论“智猪博弈”模型描述的“搭便车”是中小企业最佳决策的规律,只是在某个时间段内或部分出现的现象,并不是动态变化过程的

全部特征描述,即“搭便车”并不是中小企业技术创新的唯一最佳选择。为了更清楚地描述这个问题,我们可以借用博弈论的“智猪博弈”模型来说明。可以对模型进行如下改进:在猪圈中原有猪食槽的远端再增加一个猪食槽,按下电钮后食物按一定比例流到两个猪食槽中。当按下电钮后,聪明的大猪会跑向食物多的猪食槽,聪明的小猪可以跑向另一个猪食槽,在大猪吃完第一个猪食槽的食物来到这个猪食槽之前,获取尽可能多的食物。这样的游戏规则改变就给了小猪选择按电钮的理由。现实经济系统是一个复杂的经济生态大系统,每个经济体都有自身的生存空间,占据对应的生态位,构成一个相互依存的世界。任何一个经济体,无论其力量有多大,都不可能在一定时空范围内,占据所有的生存空间,或在所有领域都具有绝对优势。中小企业有其特定的生存空间,并在特定范围内有一定优势,在技术创新中可以通过差异化战略等措施,避开与大企业的正面竞争,在有优势的领域开拓,这也做到行动优于等待。

演化计算结果给我们的启示之一是决策的收益与成本之比在很大程度上决定了企业的行为选择。如果小猪足够聪明,可以把按电钮的成本降低一个单位,同时提高自身的能力,在自己按电钮后的竞争中多获得一个单位食物。这样的收益与成本之比给了小猪选择按电钮的理由。在现实经济活动中,综合实力相对薄弱的中小企业,在选择技术创新策略时,需要充分利用自身特点,发挥机制灵活、反应迅速、综合创新成本低等优势。在确保以较低的创新成本取得较高的创新收益的情况下,也可以采取主动实施创新行动而非等待的策略,以争取在较短的时间内获取更大的收益。

还有许多其他的因素给了中小企业在技术创新中选择行动的理由,在演化计算的规则中再加上每一个时间段中要消耗一个单位的能量,能量为负的一方就淘汰出局(死亡)。这样残酷的限制会导致储备雄厚的大猪故意不按电钮,等待小猪出局后而独吞所有食物。背水一战的小猪在指望大猪按电钮无望的情况下,只有拼死一搏按电钮,通过改革提高自己的能力,给自己创造机会。如果再考虑信息不对称,行动和结果之间的时间延滞等因素,小猪也可能有充分的理由选择行动而不是等待。

### 9.3.2 游戏规则对企业技术创新决策影响的演化分析

演化计算结果给我们的另一个启示是游戏规则在很大程度上决定了企业的行为选择。我们仍旧借用“智猪博弈”模型来说明,如果对游戏规则做另一种改进,把大猪和小猪分别关在两个猪圈中,每个猪圈中各有一个猪食槽和电钮,按下电钮后食物按一定比例流到两个猪食槽中。那么,大猪和小猪都有了积极选择按电钮的理由,因为无论谁选择按电钮,大家都有饭吃,区别只是数量不同。

依据上述分析的思路,我们在经典“智猪博弈”模型中相应调整游戏规则。调整后的演化计算结果如图 9.7 至图 9.9 所示,图中曲线 L1 代表购买或合作开发新技术策略选择的演化趋势;L2 代表自主开发新技术策略选择的演化趋势;L3 代表模仿新技术(搭便车)策略选择的演化趋势;L4 代表自主开发新技术但不开发市场(出售技术)策略选择的演化趋势;L5 代表等待(不自主开发新技术也不开发市场)策略选择的演化趋势。

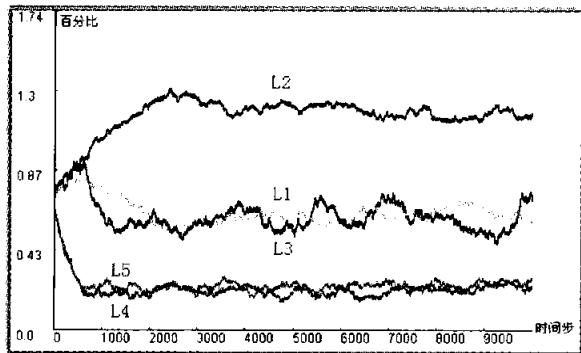


图 9.7 调整游戏规则后大企业技术开发决策演化分布

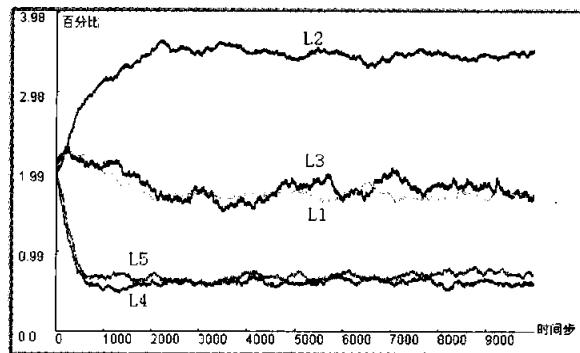


图 9.8 调整游戏规则后中企业技术开发决策演化分布

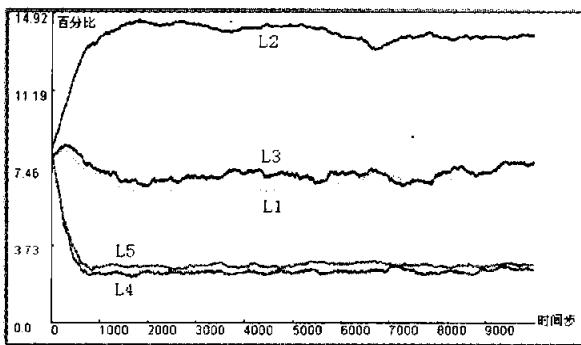


图 9.9 调整游戏规则后小企业技术开发决策演化分布

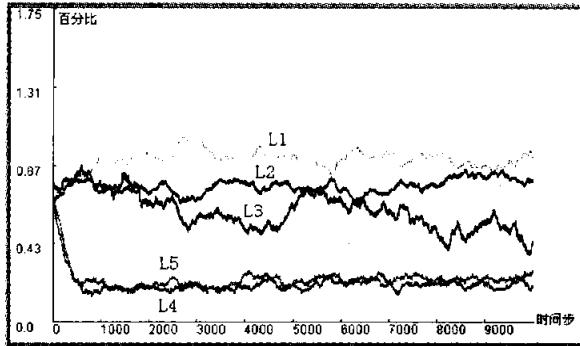


图 9.10 允许企业合作后大企业技术开发决策演化分布

如图 9.7 至图 9.9 所示 L2 曲线变化,从演化计算结果可以看出,无论大企业,还是中小企业,选择自主开发新技术策略的倾向明显加大。在这样的经济环境中,中小企业可以通过降低技术创新的成本,通过专利、商标等法律方式保护自己的知识产权,在适当的时间段内获取适当的利益,这样的选择同样优于“搭便车”。对于宏观市场管理,演化结果对政策的制定者有一定的启示意义,在合适的时间内适当的采取贸易保护、市场准入、政策优惠等宏观调控措施,构造良好的局部经济环境,可以调动各类企业技术创新的积极性。

### 9.3.3 竞争与合作对企业技术创新决策影响的演化分析

如果对“智猪博弈”模型游戏规则再做另一种改进,允许大猪和小猪“协商”后采取行动,那结果会怎样呢?“智猪博弈”中将不仅只有竞争,也有合作。它们有可能找出对双方都有利的行动方案,共同承担成本和分享利益。

依据上述分析的思路,我们在经典“智猪博弈”模型中允许企业协商与合作,并相应调整游戏规则。调整后的演化计算结果如图 9.10 至图 9.12 所示,图中曲线 L1 代表购买或合作开发新技术策略选择的演化趋势;L2 代表自主开发新技术策略选择的演化趋势;L3 代表模仿新技术(搭便车)策略选择的演化趋势;L4 代表自主开发新技术但不开发市场(出售技术)策略选择的演化趋势;L5 代表等待(不自主开发新技术也不开发市场)策略选择的演化趋势。

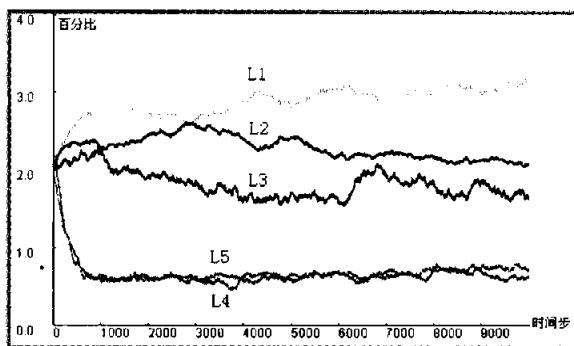


图 9.11 允许企业合作后中企业技术开发决策演化分布

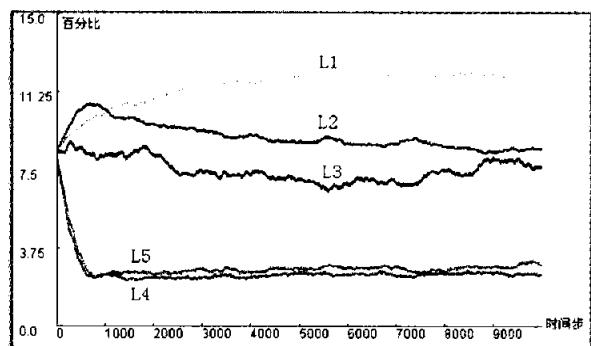


图 9.12 允许企业合作后小企业技术开发决策演化分布

从演化计算结果可以看出,由于合作可以降低成本,可以使合作的各方共同获取部分利益,中小企业选择合作的意向明显上升,而大企业也有较高的选择合作倾向,“搭便车”现象则相对减少。由于实力不同,大企业仍有较高的自主开发的选择倾向,而中小企业更多的是倾向选择合作。

现实经济活动中广泛存在合作和竞争,博弈各方为了获取自身的更多利益,可以通过协商组成利益共同体,共同获取可以争取得到的最大利益。比如在“智猪博弈”模型中,可行的较好方案之一是大家轮流按电钮,而不是都不按电钮或同时按电钮。轮流按电钮一次(共两次)后,大猪可得 13 个单位食物,而小猪可得 3 个单位食物,避免了可能都没有食物的风险。如果大家合作愉快,小猪也可能获取更多的利益,通过协商可以使各方更看中的是长期收益预期。这同样也是中小企业选择技术创新而不是“搭便车”的理由,中小企业完全可以在合作中获取收益,关键是自身是否具有与强者合作的力量,不行动的结果可能是最终根本没有选择合作的机会。

## 9.4 结 论

企业进行技术创新可以获得高额回报,但技术创新要付出巨额投资,而且还要承担失败的风险。在中小企业技术的创新和经营中,学会如何“搭便车”是一种精明的决策,经典“智猪博弈”模型在一定程度上描述了这样选择的理由。

但从经济系统动态演化的角度分析,这不是事情的全部,有许多理由可以让中小企业在技术创新中选择行动而不是等待。把“智猪博弈”放在动态的生态经济大系统中考虑,利用计算实验研究方法进行演化计算分析,对我们更全面理解这个问题有非常重要的启示作用。中小企业在技术创新中,如果能够认清自身的优势,通过改革提高自身的竞争能力,提高收益与成本之比,或者通过合作降低创新成本,同时利用尽可能多的可以利用的环境条件,比如商标和专利保护,完全有理由选择行动而不是等待。

### 参 考 文 献

- 张维迎.博弈论与信息经济学.上海:上海人民出版社,2002.  
丘峰.“智猪博弈”对中小企业发展战略的启示.桂林电子工业学院学报,2005,25(6):72~75.  
袁红林,陈小锋.“智猪博弈”与中小企业模仿创新.当代财经,2002,9:68~69.

# 基于文化基因研究组织行为演化问题

个体是社会群体和组织的组成要素,社会组织中个体行为、群体行为以及与其他管理系统要素之间的相互作用机理,始终是组织行为学领域研究的核心问题之一(罗宾斯,1997)。社会组织中的人首先是以个体的形式出现,组织行为研究也是以个体行为的研究为出发点。费尔巴哈说,人的本质是社会关系的总和。人不可能脱离自然环境和社会环境而存在,同样,组织中的个人行为方式必然直接或间接地受到各种组织因素(如:组织文化、群体压力、工作压力等)的影响。

基于社会心理学的研究成果,从决定个体心理因素的文化基因微观层次出发,用计算实验方法研究宏观组织行为演化问题,是一种全新的研究视角。本研究以组织行为演化问题为背景,以社会系统演化计算三层模型为基础,使用 Java 语言,在通用计算机环境上实际构造了计算实验研究软件平台。利用该软件平台,在一定的假设和边界条件下进行计算研究,并对演化计算结果进行了分析。

## 10.1 问题描述

从社会学角度考虑,人不仅具有信息识别、学习与适应能力,还具有各种行为偏好。社会活动中的人在同其他个体的交互过程中,对环境、环境中的其他行为个体的行为不断作出反应,并通过学习过程掌握行动规则以适应环境变化。从经济学角度考虑,实际上个体每一个可能的选择组合方案都对应一个效用值,还包括一个对于个体建立认知能力的固定成本,个体需要这种认知能力进行比较效用,进而作出适当的行为方案选择(盛昭瀚和蒋德鹏,2002)。一般不同的利益相关者在作为实践活动的主体时,由于利益因素驱动和认知偏好存在,会关注不同的内容,采取不同的方式,得出不同的结论(彼得·圣吉,1998)。而个体

之间、不同文化传统或文化体系之间的价值偏好、认知偏好等主体性差异不仅永远存在,而且变幻无穷(贺宇江,2003)。

从系统科学角度考虑,社会组织系统是一个开放系统。当开放系统有能量、物质、信息等出入时,其内部要素的运行便进入一种有序状态,这种运行一般都遵循着某种模式(许国志,2002)。组织行为演化是一个复杂的过程,取决于组织中每个成员的心理和行为变化,成员间的相互作用方式和程度变化,成员间关系变化导致的社会组织结构变化,以及社会组织所处的环境变化。

本研究工作着重探讨在一定的研究边界条件下和对智能个体基本假设的基础上,考察基于文化基因层次的个体心理和行为的计算演化结果,以及个体之间相互作用导致的系统宏观规律,尝试分析个体行为的成本收益比与个体行为选择、个体知觉偏好、行为偏好及其与其他系统要素之间的关系,试图在宏观现象与微观变化之间对组织行为演化给出解释,以期说明计算实验研究方法在研究组织行为演化问题中的作用和实现方法。

## 10.2 文化基因与计算实验模型

从心理学角度对人类文化发展的研究表明,在文化的传播、演化过程中,存在着记忆、学习、适应、遗传、突变等特征,存在与生物演化的基因(Gene)相对应的文化复制因子(Meme,也称文化基因)。Meme一词最早出现于理查德·道金斯(Richard Dawkins)于1976年出版的著作《自私的基因》(The Selfish Gene)中(理查德·道金斯,1998)。牛津英语词典对它的解释是:“Meme: An element of culture that may be considered to be passed on by non-genetic means, esp. imitation.”(Meme:文化的基本单位,通过非遗传的方式、特别是模仿而得到传递)。道金斯认为“基因”不应该必然被理解为DNA意义上的基因,在文化领域同样存在着类似DNA在生物进化中所起作用的东西,这就是作为社会文化遗传的基本单位“Meme”。进化的过程最好从“基因”之间互相竞争的角度来理解(理查德·道金斯,1998)。苏珊·布莱克摩尔(Susan Blackmore)认为,正如基因之间相互竞争着,自私地、不顾一切地要进入到下一代的身体之中,最终决定了生物世界格局及其结构,Meme之间相互竞争着,自私地、不顾一切地要进入到另一个人的大脑、另一本书、另一个对象之中,这最终决定了我们的文化以及我们的心理结构(苏珊·布莱克摩尔,2001)。

从系统演化的角度来看,对任何一个系统,只要其中包含着复制、变异和选择,就形成了广义进化机制。广义进化机制中自然选择的基本单位,是任何形式

的复制因子,是任何形式的能够进行自我拷贝的单元(理查德·道金斯,1998)。在社会环境下分析,人的心理和行为可以看成是在一定的边界条件下,根据环境和其他智能主体的行为等外部输入,结合自身的属性、记忆等信息,经过大脑的整合处理后作出的决策,这当中还受认知与行为偏好因素影响。如果将个体行为置于社会群体背景下,那么,其行为选择的结果将不同于单纯的个体决策。行为作为智能主体的输出,是决策的外部表现。这种包括输入与输出的决策内容可以被编码(形如 $[I_1, \dots, I_n, O_1, \dots, O_m]$ )若干个决策编码构成的集合决定了某一时刻某一智能主体的心理和行为特征。这样的决策编码可以被看成是文化基因关于决策和行为的特定形式,它可以通过模仿被复制,通过学习被传播,可以通过尝试而产生突变,也可能由于外部压力而被淘汰。

在计算机科学中有一个概念 code,一般是指计算机中软件的代码。可以设计出具有独立意义且不再可分的 code,让它具有自我复制和变异功能,并且可以在一定条件下动态生成或退出(如计算机病毒),这样的 code 可以在一定结构下相互组合构成软件系统。这给我们非常有益的启示:人为特殊构造的计算机软件代码,如果可以模拟类似 Meme 和 Gene 的竞争、复制、遗传、变异、组合等基本特征,我们就可以用计算机代码模拟生物基因或文化基因,从演化过程中“基因”层次基本单位之间的互相竞争、相互作用的角度来对复杂生物、社会系统进行计算模拟。

组织行为演化问题研究要建立在个体心理和行为演化的基础上,而个体心理和行为的演化要建立在文化基因的演化层次上,这是研究组织行为演化的主要环节。针对需要研究的社会科学问题构造的计算模拟模型,其整体结构一般需要包括三个层次,社会系统层次、智能主体层次、智能主体的基元层次。社会系统演化计算的三层模型如表 10.1 所示。其中,智能主体的基元层次对应于文化基因的计算。

表 10.1 社会系统演化计算的三层框架模型结构

层 次	描 述
macro-level 社会系统层次	对应于行政区域、经济系统、行业、社会组织、供应链等社会系统
middle-level 智能主体层次	对应于企业、社会组织、组织中的人等独立决策单位
micro-level 智能主体的基元层次	包括:智能主体的记忆、认知、行为、学习、偏好等

## 10.3 计算实验环境与实现过程

以组织行为演化问题及其相关问题为背景进行计算研究,在演化模型框架下,还需要决定计算研究的环境、参数设置和计算研究的实现过程。

### 10.3.1 基本假设与边界条件

从决定个体心理变化的文化基因层次为起点研究组织行为演化的分析框架,在构造用于计算实验的人工组织系统时,对于智能个体(Agent)作一些基本假设是必要的。

#### 1. 计算研究的基本假设

(1) 与社会组织系统中的成员相对应,人工组织系统中的 Agent(智能个体)是有限理性。假定个体决策者理性上追求他们的满意程度、成本收益以及他们所试图寻找的目标函数(或效益)的最大化,但在每一步实际决策中,根据历史行为的结果,受到组织结构、内部制度、组织文化等因素的制约,往往采取自身认为满意的行为。

(2) 任一时刻,Agent 可获取的信息是有限的,Agent 对信息的处理能力也是有限的。

(3) 任一时刻,Agent 的行为直接受组织系统中其他相邻 Agent 行为的影响。每个 Agent 的行为对人工组织系统的影响是局部的、有限的,但可能通过 Agent 间的相互作用在系统结构中传播,也就是说组织中每个 Agent 的行为都会对其他成员有影响。

(4) Agent 的每一个行为决策取自有限个数的行为规则集合,在演化中由于外部选择压力而不断淘汰“获利”较小和近期不用(或使用最少)的规则,新的行为规则可通过学习或自身变异而产生,并且可以继承(复制、遗传)。

(5) 一些随机事件会影响 Agent 的行为,导致 Agent 在某时刻可能采取一些非理性的“无法预测”的行为。

#### 2. 计算研究的边界条件

在本研究的计算研究实例中,为了突出某些系统要素对系统演化的影响,设定如下边界条件:

(1) 人工组织系统结构形态在演化过程中不改变,但在系统结构结点(岗位结点)上的 Agent 可以发生角色变换。

(2) 人工组织系统在演化过程中,Agent 总数不变。允许新的 Agent 进入

系统、原有 Agent 退出系统或改变 Agent 在系统结构中的位置。

(3) 人工组织系统中工作任务之间的结构和时序关系在演化过程中不改变。

(4) 人工组织系统中资源分配的方式在系统演化过程中相对于每个工作岗位不变。

(5) 人工组织系统的初始状态和演化过程中的外部环境变化对于所有同步计算的实验方案都相同。

### 10.3.2 演化计算的实现过程

用计算研究的方法研究个体行为与组织行为间双向反馈的复杂演化问题，及其与其他系统要素的相互作用，实现的主要过程包括：

抽象某一类社会组织系统的运行过程，构造一个人工组织系统，为其中的结构、资源、环境等各子系统建立数据结构描述和对应的处理过程，组织行为问题的研究应该放在整个系统的基础上。

1. 社会组织系统行为演化的基本单位是成员，为此需要为每一个人工主体建立属性、记忆、决策过程等描述和对应的处理过程。

2. 人工主体行为演化的基本单位设在文化基因层次，需要参照现实系统对主体面对的压力(输入)和可能的行为(输出)进行大致分类，并赋予唯一的标识编码，同时让每一类行为对应一组处理过程。由于每个主体的属性和实际现状不同，因此同一类行为中各个主体的实际动作(处理过程)也是不同的。

3. 为每个人工主体建立个体认知偏好向量和个体行为偏好向量，以及行为决策集合，也就是描述主体认知和行为对应的标识编码向量集合。演化过程中各个主体根据与压力综合输入最接近原则在决策集合中寻找标识编码向量，并把对应的处理过程作为个体的行为输出。

4. 人工组织系统中的各个子系统根据所有人工主体的输出，结合其他系统要素计算各子系统的输出，最终合成整个人工组织系统的输出，所有这些输出又共同构成了人工主体的输入。

5. 利用遗传算法动态计算和调整各个人工主体的行为决策集合，同时记录各种必要的历史数据。在遗传算法的设计中，根据刺激反应模型，设定人工主体对某种压力的关注程度与该压力的作用程度和频度相关。人工主体调整行为的依据是某行为能给人工主体带来的收益和为此付出的成本，以及该行为近期的使用频率。

6. 演化过程中人工主体根据各自不断调整的行为规则集合，在给定的人工组织系统结构中相互作用，每一步演化过程把所有人工主体的行为决策集合和

属性等参数经统计处理后,就能得到整个人工组织系统的行为演化量化特征,它可以反映组织、群体的行为偏好等特征。

7. 集成使用各种有效的数学方法,对量化的数据进行处理,获取在大量数据中包含的有效信息,在此基础上对组织行为的演化问题作进一步研究。

我们采用多主体系统(Multi-Agent System, MAS)描述社会系统演化计算三层模型的各层子系统和要素及其结构,使用面向对象的 Java 计算机编程语言,在通用计算机上实现了上述计算过程。计算中人工主体是随机生成的,大致在 800 个左右,计算研究设定 1 万次演化迭代计算过程。

### 10.3.3 计算参数设置

考察主体行为在特定群体(例如社会组织)中可能的演化趋势,可以作为一个参考基础以评价经验对行为假定的合理程度。计算研究的演化分析可以为组织中的个体行为假定提供有力的支持,也可以由计算研究的演化分析出发,给出依据标准理论也许无法预计的另一些行为倾向。这需要分类方法尽量考虑覆盖各种可能性,这本身也是通过计算研究对现实系统认识不断深化的过程。对组织中个体压力和行为选择的分类,根据不同的研究目的可以有不同的分类方法,只要每一种行为或压力中有一定程度普遍意义的特征,就可以分为一类。计算研究可以容纳多种形式的分类,关键是描述每一类的特征。

#### 1. 社会组织中个体压力的分类

世界上不存在没有任何压力的环境,压力在本质上是由于环境条件和不同特征个体相互作用引起的个体焦虑性反应。个体的压力反应属于心理过程,而这些压力的产生,可能是由多个原因造成的。压力的来源多种多样,视个体在组织中具体的工作性质(岗位)和环境而不同。有些是由于工作任务重、时间紧急而引起的;有些是由于工作环境中人际方面的问题引起的;还有些是内外部竞争方面的原因引起的。可以把个体与其在组织中所处的环境看成是一个系统,个体的焦虑性反应是这个系统中的某一环节引起的,这个环节可能是个体本身,比如个体在追求、知识、技能、感情等方面的问题,引起了个体焦虑性反应;也可能是个体以外的组织环境因素导致的,如组织的人际关系、沟通、激励等(马可一,2001)。

参考已有研究成果(罗宾斯,1996;罗宾斯,1997),我们希望通过计算研究了解以下 5 类压力(见表 10.2)在社会组织系统行为演化过程中主体的关注程度:

表 10.2 社会组织中个体压力的分类

编号	压力分类	压力特征
1	工作压力	自身的胜任力和满意程度
2	激励压力	组织激励对个体产生的压力
3	群体压力	群体中大多数主体的行为形成的压力
4	自身追求压力	主体对自身目标追求形成的压力
5	组织目标压力	主体现状与组织目标适应程度形成的压力

**工作压力:**工作任务实际上已经给了个体一定程度上的压力,例如某些时候会有不能十分胜任工作的感觉,会让个体感到紧张。对于工作比较满意,对于自己的能力和地位很有信心的个体,平时可能几乎没有什么工作上的压力。个体也可能对自身持有负面的评价,认为自己不能有效地胜任工作而产生心理压力,就是通常所指的成就感低落。

**激励压力:**激励就是激励主体通过各种方法,引导激励对象更高效地发挥自身潜力,以达到预期目的的过程。对人员的各种需要予以不同程度的满足或限制,以此引起他们心理状况的变化达到激发动机,引起行为的目的。通过正反两方面的强化,对行为加以控制和调节(阮少玲,2004)。激励会对个体形成压力,不同的人其需要不同,对激励的心理承受力也各不相同,所以,针对不同对象的激励方法也是有差异的。

**群体压力:**社会组织中存在着群体压力,个人的观念与行为由于受群体的引导或压力,而趋向于与大多数人相一致。群体成员有希望被群体接受和重视的愿望,同时群体压力也会迫使个体在决策时追求与群体的统一,出现个人屈服于群体压力的现象,这可能导致个体的从众行为。群体优势倾向也会对个体的行为造成压力。由于不同的职业群体对客观事物认知的差异,他们所感受到的群体压力强度也不同。

**自身追求压力:**自身追求压力主要是来源于个体对某种利益的追求。在现实社会活动中,人们都期望能够把自己的能力发挥出来并取得一定的成就,能够得到社会的认同和尊重(罗宾斯,1997)。人们都期望在可能的条件下追求自我认定的完美,会根据情况不断调整自身定位、目标设计。同样,不同利益群体也在不断追求自身利益的最大化。个体的自身追求也会形成一种社会的压力。

**组织目标压力:**为了实现组织目标,组织会要求其成员保持一致性,认同组织目标,增强组织的凝聚力,这可能会限制其成员的个人行为,从而对组织中的成员产生无形的压力(罗宾斯,1997)。组织中的每个人的行为都对其他人形成这样的压力,而不单是由领导加到人们身上的。我们设立组织目标压力是为了

实验该压力对群体行为选择的作用程度。

## 2. 社会组织中个体行为选择的分类

参考已有研究成果(罗宾斯,1996;罗宾斯,1997),我们把社会组织系统中主体的行为划分为以下7类(见表10.3),试图找出在一定的边界条件下,这些行为类型在组织行为演化过程中被个体选择的倾向:

表10.3 社会组织中个体行为选择的分类

编号	行为分类	行为特征
1	保持	主体自身的行为惯性导致的保持当前状态不变的行为选择
2	从众	趋向于采取群体中大多数主体的行为作为自身行为选择
3	服从	趋向于组织目标或激励强化方向
4	追求	趋向于主体自身的目标追求
5	调整	调整主体自身目标以适应周围环境
6	学习	提高主体自身工作能力的行为
7	尝试	带有试探性的随机行为选择

**思维定性和行为惯性(保持):**社会组织内群体的思维定性和行为惯性一般源于习惯、安全感和对未知因素的焦虑。例如,鲦鱼因个体弱小而常常群居,并自愿以强健者为自然首领。将充当首领的鲦鱼体内控制行为的神经割除后,此鱼便会失去自制力,行动也会变得紊乱,但其他鲦鱼却仍然像从前一样盲目追随。这就是现代企业管理中经常提到的鲦鱼效应。鲦鱼效应说明一个组织内的群体具有思维定性和行为惯性的特征(徐海东,2003)。

**从众行为:**群体规范对其成员的行为具有一种无形的压力,使得每个成员不得不服从群体的行为。从众行为实际上就是一种个体的行为趋向群体行为的倾向,个体与群体中大多数人意见不一致时,会感到一种心理紧张,这促使他趋向与群体一致。从众行为的产生,一个很有代表性的原因是由于大多数个体不愿意标新立异。

**服从行为:**从期望个人效益最大化角度出发,组织中的个体为了维护自身在与其他个体的竞争中获得最佳收益,一般会自觉承认权威和服从。组织中之所以存在着命令和服从关系,命令的执行者之所以愿意服从别人的指令,是因为这样的选择对双方都有利(欧阳文和杜焱,2005)。

**个人追求:**根据期望理论,当个人认为他所追求的目标可以达到时,便产生了追求动机。主要包括对物质、权力、情感、社会认同等多方面的追求。

**调整行为:**是指人们不断进行自我调节、调整以更好地适应环境变化的行

为。每一个人由于自身素质、背景、阅历、能力和岗位等不同而呈现出不同的差异。当现实与期望的目标不一致时,人们通过调整自己的行为,以适应并影响周围的环境。组织成员就必须不断地调整自身去适应周围的变化。

学习:个体为了能够更好地实现自身的期望目标而需要不断的学习,以提高自己的素质、能力。如:为了更好完成自身的工作职责,就需要通过学习来提高自身工作的能力。

随机的尝试活动:随机的尝试活动在社会活动中扮演十分重要的角色。例如在科学的研究当中,我们总是去探试不同的方法或视角,这样的行为带有很大的试探性与随机性。又例如在人类思维中,往往用不同的思路,有时是随机地选择一条路径去试探。组织中个体行为的选择也有这种随机的尝试活动,如果一种行为可以为个体带来预期的效益,则这样的行为就有可能再次被选择。个体随机的尝试活动是组织行为演化中关键的因素,没有随机性就无法真正讨论演化问题。

## 10.4 计算结果分析

### 10.4.1 组织行为问题的演化分析

#### 1. 主体知觉偏好的统计演化结果

研究社会组织中影响个体知觉和行为的因素,主要是考虑对个体行为发生影响作用的知觉因素,如组织的激励制度、群体压力等等。我们希望通过计算研究了解在一定的组织环境下,组织行为演化过程中成员对不同类型外部信息的关注程度。给出平均分布的随机初始值,经过演化计算后得到人工组织系统中所有人工主体知觉偏好的演化统计结果,也就是人工主体对某种压力的关注程度,如图 10.1 所示。根据刺激反应模型,设定主体对某种压力的关注程度与该压力作用程度和频度相关。图中曲线 L1 表示工作胜任程度压力;L2 表示组织的激励压力;L3 表示群体压力;L4 表示自身追求压力;L5 表示组织目标压力。

从图中可以看出,组织建立初期(或主体进入组织初期),主体对群体的压力和自身追求的压力比较注重,这些压力对主体行为影响较大。随着演化的进程,主体对组织激励压力的关注程度逐渐提高。一般来说主体对工作胜任程度的压力感觉较小,这与大多数人对工作的实际胜任程度有关。另外,主体对来自组织目标的压力关注较小,这与组织目标的实现与主体的直接利益相关程度较小有关。

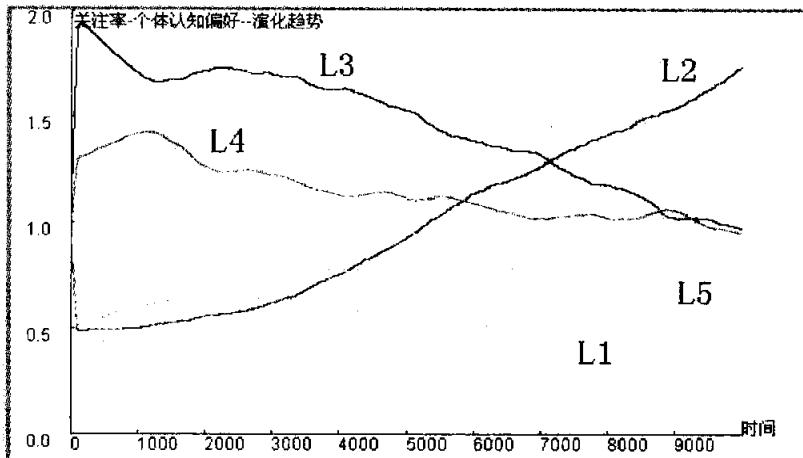


图 10.1 主体认知偏好的演化趋势

## 2. 主体行为偏好的统计演化结果

人的行为是指人对周围环境变化所作的反应及其活动。人的行为可以认为是人与客观环境相互作用的结果和表现。个体的行为不仅影响自身,而且在一定程度上影响整个组织行为,进而影响组织的其他方面。

演化计算的每一步迭代过程中,对所有人工主体的决策集合进行统计处理并记录,可以得到组织中所有主体决策分布的统计演化趋势,它从一个侧面反映了组织中主体的行为选择(行为偏好)趋势,如图 10.2 所示。演化计算中设定人工主体调整行为的依据是该行为能给主体带来的收益和为此付出的成本,以及该行为近期的使用频率。初始情况假定基本相同的成本和收益比,这里的成本和收益是综合因数。

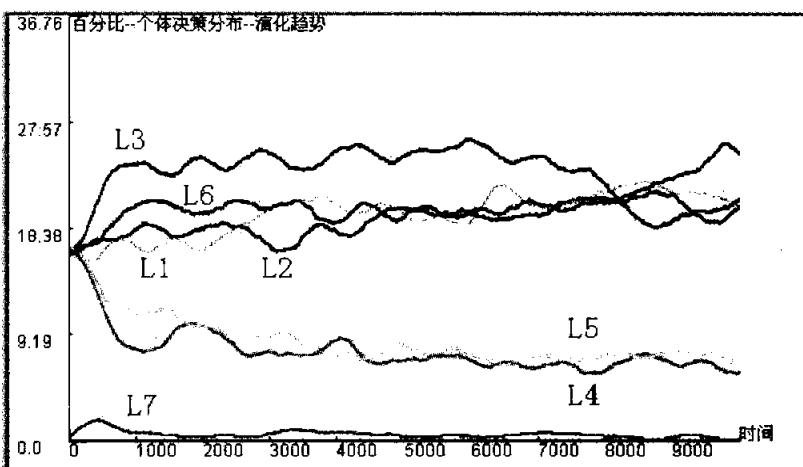


图 10.2 主体决策分布的演化趋势

图 10.2 中曲线 L1 表示保持当前行为的惯性行为;L2 表示从众的行为;L3 表示服从的行为;L4 表示自身追求的行为;L5 表示调整主体目标的行为;L6 表

示提高主体能力的行为;L7 表示主体随机的尝试行为。

从图中可以看出,演化开始阶段(或主体进入组织初期),主体行为选择倾向于服从和提高自身的能力,而从众行为选择和由于行为惯性导致的保持现状的行为选择则逐渐提高,自我追求与自身目标的调整行为选择由于成本和收益比的原因,在统计结果中主体选择的比例较小,这反映了个体具有组织成员身份时的行为特征。另外在基本相同成本和收益比条件下,随机的尝试行为一般对整体行为统计结果的影响不大。

#### 10.4.2 行为多样性的演化结果

同样是人群聚集,由于外部环境、人群聚集特性、人群行为特征不同,会导致群体行为的多样性(有序程度)有所不同。例如战场上的军队和广场聚会的人群,这两个群体的行为有序程度差别很大。如何从整体上度量社会群体行为的多样性是计算实验中需要解决的一个问题。

用微观要素的状态描述系统宏观的特征,是建立系统微观和宏观联系的有效途径之一。借鉴热力学、信息论和生态学领域的研究成果,可以引入多样性的概念来描述人类行为在社会活动中的多样性。借鉴参考文献(徐海东,2003;马克平和刘玉明,1994;王寿兵,2003)中讨论的 Shannon-Wiener 多样性指数,如下定义社会活动中的多样性。

假定在一个社会系统内,可以大致把个体的行为划分为  $n$  种类型 ( $A_1, A_2 \dots A_i \dots A_n$ ),每一个个体行为属于  $A_i$  的概率为  $p_i$ ,因此  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ 。如果总共有  $q$  个具体个体行为,  $q = q_1 + q_2 + \dots + q_i + \dots + q_n$ ; (其中  $q_i = q p_i$ )。所有个体行为的多样性为:  $n \log q$ ; 每一种行为类型内的多样性为:  $n p_i \log p_i$ ; 行为类型内的平均多样性为:

$$n \sum_{i=1}^n p_i \log q_i = n \sum_{i=1}^n p_i \log p_i + n \log q$$

社会行为多样性定义为行为类型的多样性,亦即所有个体行为多样性减去行为类型内的平均多样性:

$$n \log q - (n \sum_{i=1}^n p_i \log p_i + n \log q) = -n \sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$

这里使用的是以 10 为底的对数。

演化计算中设定三个并行计算的方案,一个采取平均奖惩的激励制度方案和两个相同的按绩效奖惩的激励制度方案。对应于相同的随机平均分布初始值

和相同的外部环境变化,行为多样性的演化结果如图 10.3 所示。图中的 L1 曲线表示按平均奖惩的激励方案计算得到的社会行为多样性值,L2 和 L3 曲线都是按绩效奖惩的激励方案计算的社会行为多样性值。

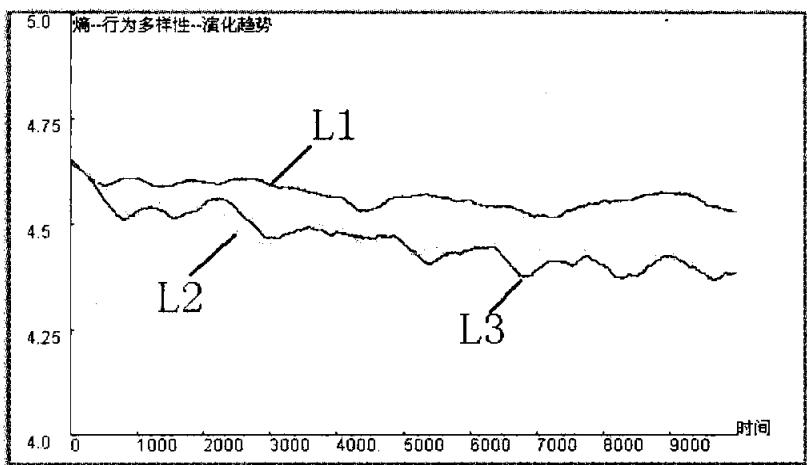


图 10.3 社会行为多样性演化趋势

从图中曲线的变化可以看出:

1. 社会行为多样性值在初始随机平均分布时为最大值,说明社会行为的混乱程度最大,或社会行为的规律性最小。
2. 演化计算中,由于智能主体间的互相作用和影响,智能主体适应性调整自身的行为,社会行为多样性总的的趋势是减少,说明组织行为的混乱程度在减少,或组织行为的有序性和个体对群体行为的认同程度在加大,某种组织行为特征正在形成。计算实验中虽然设定个体认知偏好和个体行为偏好缓慢改变,但社会行为多样性已发生较大变化。这个实验结果说明群体行为可以非常敏感地依赖于个体行为,在该群体内的个体没有感受到自己的行为发生显著改变时,整体的群体行为已经发生了显著改变。
3. 社会行为多样性值的变化具有明显的周期涨落性,在初步形成某种行为特征后,会进入周期涨落变化的演化期。组织行为演化的动力学本质与遗传或文化传递机制基本一致,使群体收益最大化的行为模式中的每一个体行为模式都可能以群体规范的形式保存下来。这样导致演化可能存在多种均衡,而群体的选择在决定哪一种均衡占优势中起主要作用。在一定的组织结构、制度和信息环境下,不同的群体有不同的动态稳定均衡,并以不同的规范维持这一均衡(肖条军,2004)。涨落是由于系统要素的独立运动或在局部产生的各种协同运动以及环境因素的随机干扰造成的,系统的实际状态值总会偏离平均值,这种偏离波动就是涨落(吴广谋和盛昭瀚,2000)。社会行为多样性的周期涨落变化,预示着群体行为及其由此形成的凝聚程度不是常态,而是周期变化的。这与协同

学研究的结果相吻合。

4. 在多个方案同时演化计算的多次比较分析中,采取平均奖惩的激励制度的方案,社会行为多样性的值明显大于其他激励制度方案,且差距有逐步加大趋势,说明采取“平均主义”激励方案,组织行为的多样性程度较大,主体对组织行为的认同程度较小,或组织的凝聚力相对较小。

5. 对应于相同的初始条件、演化规则、激励机制和环境变化参数,由于主体间差异和随机因素等作用,社会行为多样性值的演化虽有近似的趋势,但不完全相同,有时会有较大的差距。这反映了由于各种因素的影响,系统在基本相同条件下仍然具有多种演化可能,也说明复杂系统演化的不可逆性。

## 10.5 结 论

本章通过对组织行为演化问题的计算研究和结果分析,得到了一些与经验、理论分析和应用研究相同的结果,验证了计算实验研究方法的可行性。同时,计算结果还揭示了形成的原因和过程,帮助我们更精细地解释理论和理解经验。对应变化的环境,计算实验研究组织、群体中人的行为变化,和组织环境对成员行为的影响,有助于我们理解个体、群体、组织行为演化的一般规律,最终服务于组织的管理过程。

采用自下而上的建模路线,把社会群体行为演化的计算模拟建立在文化基因层次上,基于规则计算进行实验研究,是一条可行的技术路线。计算实验有利于研究一类动态的社会群体行为演化问题,比如组织文化的形成与传播问题,公共事件中的群体行为演化问题,环境和制度对金融投资者行为的影响问题等。计算实验方法还可以用于研究人性的假设、激励理论、领导理论、组织结构设计等相关领域。

## 参 考 文 献

- 盛昭瀚,蒋德鹏.演化经济学.上海三联书店,2002.
- 彼得·圣吉.第五项修炼.上海三联书店,1998.
- 贺宇江.商业组织的基因.机械工业出版社,2003.
- 许国志主编.系统科学.上海科技教育出版社,2000.
- 理查德·道金斯.自私的基因.吉林人民出版社,1998.
- 苏珊·布莱克摩尔.谜米机器——文化之社会传递过程的“基因学”.吉林人民出版社,2001.
- 马可一.工作情景中的压力管理.外国经济与管理,2001(10):26~28.

- 斯蒂芬·P.罗宾斯.管理学.中国人民大学出版社,1996.
- 斯蒂芬·P.罗宾斯.组织行为学.中国人民大学出版社,1997.
- 阮少玲.现代企业创新激励机制的探讨.广东科技,2004,7:30~31.
- 徐海东.从“鲦鱼效应”到习惯性防卫.企业研究,2003,10:49~50.
- 马克平,刘玉明.生物群落多样性的测度方法:  $I_\alpha$ 多样性的测度方法(下).生物多样性,1994,2(4):231~239.
- 王寿兵.对传统生物多样性指数的质疑.复旦学报(自然科学版),2003,12(6):867~868.
- 任佩瑜,张莉,宋勇.基于复杂性科学的管理熵、管理耗散结构理论及其在企业组织与决策中的作用.管理世界,2001,6:142~147.
- 欧阳文,杜焱.企业权威性质的博弈分析.湖南社会科学,2005,3:95~97.
- 肖条军.博弈论及其应用.上海三联书店,2004.
- 吴广谋,盛昭瀚.系统与系统方法.东南大学出版社,2000.

## 第 11 章

# 软件扩散的元胞自动机模型实验及实现

## 11.1 引 言

软件产品作为一种知识产权产品，受知识产权的保护。知识产权最大的特点是具有一定的公共性，属于无形资产，因此其在市场的扩散具有不易控制的特点，其中一个有趣的现象就是盗版软件如影随形。商业软件联盟(Business Software Alliance，简称 BSA)发布的第五次年度全球 PC 软件盗版研究报告显示，2007 年全球个人电脑(PC)上安装的软件有 38% 为盗版。与全球平均盗版率相比，中国市场盗版率仍相对较高，为 82%。在亚太地区，2007 年软件盗版率平均水平为 59%，盗版率最低的国家是日本，为 23%；中国和印度的盗版率远高于平均水平；韩国、台湾等国家和地区则明显低于平均水平<sup>①</sup>。而由中国互联网实验室正式推出的《2007 年度中国软件盗版率》报告指出：按市值折算，软件产业的盗版率为 20%，软件产品的盗版率为 31%，计算机软件的盗版率为 41%<sup>②</sup>。虽然二者对于软件业盗版率调查分析结果存在较大出入，其原因可能是其二者的统计方法存在不同，但软件盗版率很高的现象却是一个不争的事实。

对于盗版软件产生的原因，一些学者从经济学的角度进行了深入研究。其研究方法借鉴了假冒产品的研究思路。对于假冒产品产生的原因、危害和治理的机制，一些学者进行了深入研究。其研究结果显示，消费者对厂商的信息劣势

① <http://global.bsa.org/idcglobalstudy2007/>

② <http://bank.chinalabs.com/report.html-vl.1.195.html>

是他们购买假冒产品的主要原因(平新乔和郝朝艳,2002;谢识予,1997),其次正版商品比盗版商品的质量要高,或者正版比盗版提供了一些特殊的功能,消费者对正版的特殊功能有所偏爱(高山行和江旭,2002;吴澄秋,石磊,2000)。盗版软件固然存在上述假冒产品的一些共性,但是随着印制技术的提高,目前很多盗版软件印制的质量与正版软件基本一样,从外表很难鉴别正版与盗版,而从功能上考虑盗版软件与正版软件具有完全的替代作用,很多消费者在购买盗版产品时,大部分都知道所购买的是盗版软件,因此其对商品的信息是完全的。这里主要讨论这种消费者知情的对称信息的盗版软件市场现象。假设出版商和盗版商均追求利润最大化,不作任何道德方面的考虑,并且设定出版商和盗版商以及消费者均是风险中性的理性经济人。

对于一般产品的扩散研究,根据研究对象与研究方法的不同,把技术创新扩散模型分为两类:一类是基于采纳者(个体趋同)总体统计行为的宏观层次的数学模型,另一类就是基于个体采纳决策(趋同)的微观层次的微观模型。在创新扩散的研究领域中,主流的方法是应用以 Bass 模型为代表的数学模型(BASS, 1969),也有许多的研究者利用自下而上的微观仿真模型研究了产品的扩散过程(Fuks and Boccara, 1997; Goldenberg et al., 2001; Goldenberg and Efroni, 2001; Goldenberg et al., 2001; Leydesdorff, 2002; Moldovan and Goldenberg, 2004; Sznajd and Weron, 2003)。

对于软件产品的扩散,即存在盗版软件的情况下,我们面临的一个问题是,除了合法的正版产品的扩散以外,盗版产品也随之扩散。因此在任何时候,软件使用者由正版用户及盗版用户组成,他们可能购买正版软件,也有可能从其他渠道非法拷贝或购买盗版产品。在实际研究软件的扩散过程中,大部分的软件商只能通过研究其销售数据来观察合法产品的传播,然而实际情况是,市场上存在着正版用户与盗版用户,如果不了解盗版软件及其对正版用户的影响而试图研究正版产品的扩散,这种做法是不完整的,反之亦然。

为了从微观层次研究软件产品的扩散现象,Givon 等(1995;1997)基于软件市场的特性研究了正版与盗版软件的扩散模型,建立了宏观的扩散方程,探讨了盗版软件扩散对正版软件扩散的影响。其研究建立在如下设定基础上:软件市场实际存在着正版软件和盗版软件,因此软件的扩散存在着正版及盗版软件的扩散。即在任何时点上,实际使用软件的人包括了正版软件使用者与盗版软件使用者。而软件的使用者会影响潜在使用者,即潜在使用者可能受正版软件使用者或盗版软件使用者的影响而购买正版软件或盗版软件。在模型中,他们将内部影响分为购买正版者的口碑影响(b1)与侵权者的口碑影响(b2)两部分。更进一步假设潜在使用者受外部影响改变为使用者时不会使

用盗版软件。然而,受口碑影响的人有一部分人会购买正版软件,而另一部分人会使用盗版软件。

本文建立这种情况下的元胞自动机模型,模拟一个软件产品在用户空间的传播过程。用于观察正版软件的扩散过程中伴随的盗版软件的扩散,研究影响正版软件扩散的因素及盗版软件对正版软件扩散的影响。

## 11.2 软件扩散的元胞自动机模型及实现

正版软件与盗版软件扩散的元胞自动机模型的定义如下:

$$A = (L_d, S, N, f)$$

1. 元胞及元胞空间( $L_d$ ):假定元胞的空间为整个软件的扩散空间组成的系统,每一个软件的用户构成一个元胞,分布在一个二维平面网格上,每个格点代表了一个元胞,二维平面使用周期性边界条件;

2. 状态(S):根据用户是否使用软件确定,其值为二维布尔变量值  $S = (S_1, S_2)$ ,  $S_1 = 0$  表示没有使用软件,  $S_1 = 1$  表示使用该软件,  $S_2 = 0$  表示用户使用的是盗版软件,  $S_2 = 1$  表示用户使用的是正版软件;

3. 邻居(N):使用 Moore 型(B)或者扩展的 Moore 型,其一个元胞下一个时刻的状态由其自身及其周围元胞的状态(使用抑或不使用、使用正版还是盗版)来确定;

4. 局部规则(f):

(1) 未知者到潜在使用者的转换规则

系统中的每一个用户,在正版厂商的企业营销策略的作用下,以一定的概率直接变为正版使用者,概率为:  $P = p$ 。

用户在正版用户及盗版用户的口头传播的影响下,以一定的概率转换成软件的潜在使用者,其概率为:  $1 - (1 - q_u)^U (1 - q_w)^W$ 。

其中的系数  $q_u$  为受正版软件使用者口碑影响的潜在软件用户模仿系数;  $q_w$  为受盗版软件使用者口碑影响的潜在软件用户模仿系数;  $U$ 、 $W$  分别为  $t - 1$  时刻邻居中正版软件及盗版软件的使用者。其经济意义为,在正版软件及盗版软件使用者的口碑影响下,系统中的一部分用户变成了软件的潜在使用者。

(2) 潜在用户的转换规则

受广告等外部影响的潜在使用者全部转换为正版使用者;在软件使用者口

碑影响下的潜在使用者,按一定的比例购买正版软件或者盗版软件,变成正版使用者或者盗版使用者,假定其转换为正版使用者的比例系数为  $\alpha$ 。

### (3) 使用者的转换规则

使用了软件产品的用户,在演化的过程中保持其状态不变,但是随着软件产品生命周期的完成,软件使用者放弃该软件的使用,在外部及内部因素的影响下有可能变成新的潜在使用者。

## 11.3 演化及结果分析

1. 按照以上的演化规则,建立二维格子的元胞自动机模型,步骤如下:

(1) 选择不同的初始参数: $\{p, q_u, q_w, \alpha, K\}$ ,其中各参数的意义如上所述,K 表示软件的寿命;

依据(Rogers, 2002)的研究,扩散模式中创新使用者约占 2.5%。在软件市场中,使用者因考虑到其数据文件与别的使用者进行传输时的共通性以及其他原因,通常会选择市场占有率较高的软件。因此当一新软件刚推出时,社会大众对该产品的接受度相对较小,亦即创新使用者的人数较少,所以此处创新系数  $p$  较小。另外由于软件产业具有网络外溢效果,因此当该软件用户愈多代表口碑愈好,渐渐地形成主流产品,这也表现了绝大多数信息产品的用户规模效应,因此模仿系数会大于创新系数,即  $p < q_u$ ,  $p < q_w$ 。而基于软件产业特性,使用者中有多数是使用非法的产品,因此局部规则中受盗版使用者口碑影响的模仿系数大于受正版使用者口碑的影响(模仿系数  $q_w > q_u$ )。且不论是购买者或侵权者皆是该软件的信息传播者,此两者的口碑对软件的扩散均有正面的帮助,亦即  $q_w, q_u > 0$ 。当软件产品的寿命很长时,就相当于耐用品的购买情形,而软件厂商频繁推出的软件更新产品使得软件的使用者不断重复购买或者盗版以保障自己的需求。

(2) 初始时刻,整个系统都没有使用软件,系统中企业的个数为 3600 个,分布在  $60 * 60$  的二维平面网格上。

### 2. 实验过程

(1)  $\{p, q_u, q_w, \alpha, K\} = (0.0002, 0.135, 0.135, 0.15, 2000)$

在这种情况下,广告(外部因素)的影响力很小,表示在一个新产品的开始阶段,只有很少的人使用软件产品(不管是正版或是盗版),而产品的寿命很长,表示使用了软件后就一直使用该产品。实验演化的趋势如图 11.1 所示:软件产品的扩散具有 S 型传播的形态,且使用正版与盗版软件的速度呈对称

续 表

盗版影响因素	0		0.025		0.05		0.1	
	时步	正版使用量	累计	正版使用量	累计	正版使用量	累计	正版使用量
22	30	676	40	832	38	955	16	1039
23	29	705	37	869	31	987	12	1052
24	29	734	34	903	30	1017	7	1059
25	27	760	35	938	22	1039	4	1063
26	26	786	30	968	19	1058	3	1066
27	27	813	26	994	15	1073	2	1067
28	28	841	25	1020	11	1084	1	1069
29	24	865	22	1041	8	1092	0	1069
30	24	889	20	1062	8	1100	0	1069
31	25	913	17	1078	5	1105	0	1069
32	22	935	14	1093	4	1110	0	1069
33	22	957	11	1104	3	1113	0	1069
34	21	977	12	1115	2	1114	0	1069
35	22	999	8	1123	2	1116	0	1069
36	18	1017	8	1131	1	1117	0	1069
37	18	1034	6	1137	1	1118	0	1069
38	14	1048	4	1141	1	1118	0	1069
39	15	1063	5	1147	0	1119	0	1069
40	12	1075	4	1151	0	1119	0	1069
41	12	1086	3	1154	0	1119	0	1069
42	11	1098	3	1157	0	1119	0	1069
43	13	1110	2	1159	0	1119	0	1069
44	11	1121	2	1161	0	1119	0	1069
45	10	1131	2	1163	0	1119	0	1069
46	9	1141	1	1164	0	1119	0	1069
47	8	1149	1	1165	0	1119	0	1069
48	9	1157	0	1165	0	1119	0	1069
49	8	1165	1	1166	0	1119	0	1069
50	7	1173	0	1166	0	1119	0	1069

(4) 本实验的参数旨在考查当盗版使用者对未知者的影响参数变化时, 软件的正版使用者数量变化的情况。实验中,  $p = 0.005$ ,  $q_u = 0.05$ ,  $\alpha = 0.25$ ,  $q_w$  取值分别为 0, 0.025, 0.050, 0.10。

对于每一个参数, 都进行 100 次的系统平均, 即时空平均。表 11.1 记录了随着实验的演化, 正版软件的使用量以及累积使用量。从表中可以看出, 前 10

对这一有意义的实验结果,我们可以从以下几方面来分析其现象与产生的动因。从演示过程的位形图可以看出,在市场启动的前期,由于客户对于软件的了解不够,厂商通过广告等一系列的销售措施可以使一部分用户变成正版使用者,但经过口头传播的交流,一些用户开始使用盗版软件,因此盗版也如影随形,而这部分盗版使用者在未来可以进一步吸引一些未知者变成软件的潜在使用者,其中有一部分转变成了正版用户。所以,在软件传播的初期,盗版对正版的扩散起了一定的推动作用。而在后期,由于未知者数量变少,且盗版的存在还影响了正版软件的潜在市场,因此,后期对正版软件起的是阻碍作用。最重要的是,默认盗版还可以获取很大的广告效应,微软如果不使用默认盗版的策略而想达到目前的市场占有率,所付出的广告费用会是巨大的。

相对很多软件企业对盗版的深恶痛绝,一些企业采取的策略并不是一味对盗版软件赶尽杀绝,而是在不同的阶段灵活地运用盗版市场的作用,争取促进正版的扩散。从销售商的角度来看,对一些软件企业来说,在一定时期内,默认盗版是软件商的重要营销手段。实际上,默认盗版其实是一种低价策略,由于软件产品刚进入市场时,要培育市场需要花费巨额的市场推广费用,包括宣传,对用户的培训服务等,因此,如果采取高价策略就会面临很大的市场风险。而采取低价甚至免费的策略可以降低使用者的风险,有利于市场的培育。如果默认盗版,盗版推广的市场成本还可以转嫁到盗版商身上。因此,一些厂商在市场的初期会运用默认盗版策略。例如微软公司刚进入中国市场时,使用的就是默认盗版的营销策略,现在,微软公司占领了广大的中国市场,但它的市场开发成本支出几乎都是让盗版商支付的,所有基于早期 DOS 操作系统的用户,基于 WINDOWS 平台的用户,其使用习惯都被锁定。微软公司从早期的默认盗版策略中收获巨大。而苹果公司尽管其产品的技术水平甚至超过微软的产品,但是,由于强大的技术保护措施使得大部分的用户都无法享用其产品,因此其在中国的市场份额特别小。

与默认盗版相仿的策略还包括免费下载体验,免费特许政府下属的教育机构培训使用,设立等级考试等等。默认盗版还可以培养消费者使用习惯,由于软件产品的网络性及其锁定效应,使用者在行为被锁定后,要改用其他竞争产品还需付出比较高的转移成本,因此,默认盗版对于锁定消费者是一种有效的策略。采取默认软件盗版的策略,很容易就锁定了绝大部分的用户,在一定时候,可以再举起反盗版的大旗,争取更多的合法用户。由此可以看出,微软的软件产品在市场上成功的扩散,盗版软件起了很大的作用。

## 11.4 结 论

由于软件行业的特征,其边际成本趋于0,因此,盗版软件如影随形。与一般的新产品一样,在软件产品扩散的过程中,软件厂商的广告与媒体宣传及一些销售策略是启动市场、完成产品扩散的前提,但是口头传播是实现扩散的最重要途径;软件厂商通过迅速开发新的升级产品对抑制盗版作用有限;要提高正版软件的市场占有率关键在于争取处于决策阶段的潜在用户的正版使用率;盗版软件在产品扩散的早期对于正版软件的扩散起着推动作用,这对软件厂商具有一定的启示。

## 参 考 文 献

- BASS, F. M., A new product growth model for consumer durables. *Management Science*, 1969, 13(5):215~227.
- Fuks, H., Boccara, N., Cellular automata models for diffusion of innovations. 1997.
- Givon, M., Mahajan, V., Muller, E., Software piracy: estimation of lost sales and the impact on software diffusion. *Journal of Marketing*, 1995, 59(1):29~37.
- Givon, M., Mahajan, V., Muller, E., Assessing the relationship between the user-based market share and unit sales-based market share for pirated software brands in competitive markets. *Technological Forecasting and Social Change*, 1997, 55:131~144.
- Goldenberg, J., Barak, L., Eitan, M., Talk of the network: a complex systems look at the underlying process of word-of-mouth. *Marketing Letters*, 2001, 12(3):211~223.
- Goldenberg, J., Efroni, S., Using cellular automata modeling of the emergence of innovations. *Technological Forecasting and Social Change*, 2001, 68(3):293~308.
- Goldenberg, J., Libai, B., Muller, E., Using complex systems analysis to advance marketing theory development: modeling heterogeneity effects on new product growth through stochastic cellular automata. *Academy of Marketing Science Review*, 2001: 1~2.
- Leydesdorff, L., The complex dynamics of technological innovation: a comparison of models using cellular automata. *Systems Research and Behavioral Science*, 2002, 19(6): 563~575.
- Moldovan, S., Goldenberg, J., Cellular automata modeling of resistance to innovations: Effects and solutions. *Technological Forecasting and Social Change*, 2004, 71 (5): 425~442.
- Rogers, E. M., *Diffusion of Innovation*. New York: Free Press. (200).
- Sznajd-Weron, K., Weron, R., How effective is advertising in duopoly markets? *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2003, 324(1~2):437~444.

- 平新乔,郝朝艳.假冒伪劣与市场结构.经济学,2002,(2):357~376.
- 高山行,江旭.对盗版及政府作用的经济学分析.预测,2002,(6):1~5.
- 吴澄秋,石磊.对软件盗版现象的一个经济学分析.当代经济科学,2000(5):31~38.
- 谢识予.假冒伪劣现象的经济学分析.经济研究,1997,(8):71~78.

## 第 12 章

# 室内人员疏散的元胞自动机模型研究

### 12.1 引言

随着世界经济一体化的进程加快,许多国际性的大型政治、经济、商业、文化、体育、宗教活动,诸如商品交易会、博览会、音乐会、国际奥林匹克运动会、各类单项组织的世界锦标赛等一系列的活动都定期地在世界各地举办,而举办这些活动就会不可避免地带来一系列的安全问题,对于各种活动的组织者与参与者来说,在突发情况下人员的快速、安全疏散成为首要目标。因此关于人群疏散动力学机制的科学的研究就变得相当重要。

近年来发生的灾难中,有两类事件引起了全球的极大重视。一类如 1994 年在波罗的海沉没的“爱沙尼亚”号造成 852 人丧生以及美国的 9·11 恐怖袭击事件造成 2749 人丧生;另一类突出的事例就是来自行人拥挤的悲惨事件,1989 年 4 月 15 日,Sheffield 体育场 98 人丧生,2005 年 8 月 30 日,巴格达发生了 1011 人丧生的踩踏事件等等。

以上所述的第二类事件有一个共性,就是发生在有大量人员聚集的地方。当发生一些突发事件时,人员的疏散往往变得特别困难,其原因是由于拥挤而造成的人员踩踏。因此疏散问题自然受到了学者的广泛关注。我们注意到一个现象,许多的室内建筑都设置有紧急出口,紧急出口是确保室内人员安全疏散的重要因素之一,其设立可以追溯到 100 多年前。1881 年维也纳圆形大剧院及 Nizza 大剧院的火灾造成了几百人遇难,导致了对建筑安全的思考(Dieckmann, 1911; Fischer, 1933),其后使用不易燃的建筑材料变成了解决安全问题的首选方法。而芝加哥一个剧院随后发生的 500 多人遇难的火灾事故,从另一个方面

引起了学者们对于建筑安全的再反思,其主要目的是研究建筑物结构对人员疏散的影响,这成为研究紧急出口对人员疏散的影响及行人流动动力学的一个开端(Dieckmann, 1911; Fischer, 1933)。

在研究行人疏散问题时,我们最关注的问题就是人员疏散的时间与人群的疏散行为,建立合理的、考虑紧急情形中个体行为的疏散模型。通过这些模型对疏散过程中的一些特殊现象进行研究,寻找人员疏散过程的一些运动规律,研究影响疏散的效率与效果的主要因素,为制定危机情况下的疏散预案提供理论指导。

目前,人员疏散问题的建模方法分为三种。首先是宏观的方法,即把行人视为连续流动的质点,因为人员疏散的研究是交通流研究的分支,因而也就很自然地继承了流体研究中已经完善和成熟的方法;另一种是微观的方法,它把行人视为相互作用的粒子,其中最为著名的就是 Helbing 的社会力模型(Helbing and Molnar, 1995);再一种就是介观的方法,它在宏观和微观间取折中,如格子气模型(Blue and Adler, 1998; Tajima and Nagatani, 2002; Tajima and Nagatani, 2001; Tajima et al., 2001; Takimoto and Nagatani, 2003)。

目前,研究行人流模型的文献主要集中在社会力模型,格子气模型与元胞自动机模型(Kirchner and Schadschneider, 2002; Qiu et al., 2004; Yang 2003; Yang et al., 2008)。社会力模型能够描述所有人与人、人与环境之间的相互作用,能够描述人在恐慌情况下的一些现象,如“欲速则不达”,还有“在门前加上立柱能使人员疏散更快”,而且能够重现这种现象,但由于模型的模拟是连续的,因此计算特别复杂且很难进行改进。在利用格子气模型与元胞自动机模型模拟时,由于时间与空间都是离散的,因此行人被看作是格子上的粒子,行进路径选择就建立在一系列的元胞位置变化的基础上,计算就变得相对简单及高效,但由于没有考虑摩擦作用,所以由摩擦而产生的诸如“欲速则不达”这种现象在模型中就不能得到重现与还原。但是在人员相对有序地进行疏散即并不是处于特别恐慌情形下,这种模型已经能足够精确地描述实际现象并且具有很高的计算效率。Tajima. Y 和 Nagatani. T 等人对在具有瓶颈走廊中的行人流进行了研究,建立了有偏随机行走的格子气模型;研究在开放边界条件下 T 型长廊过道里人员行走的特点,发现会出现几种拥挤现象的相变,模拟过程的位形图像显示其在 T 型长廊与瓶颈过道中的相变行为是截然不同的(Tajima and Nagatani, 2002; Tajima et al., 2001)。Qiu 等人(2004; 2005)利用随机有偏的格子气模型及元胞自动机模型研究了走廊的行人流模型,研究当行人的总数量不变时,系统的尺寸与疏散时间参数之间的关系,结果同样发现了它们之间存在着标度关系。Tajima 和 Nagatani(2001)等人用有偏随机行走的格子气自动机模拟了大厅外

的公众疏散过程,结果表明,在一定的临界时间内,发生了阻塞流到衰退流的相变,并对门的宽度、疏散速度、疏散时间的关系进行了研究。这个模型同样被 Tajima. Y 等人用于室内不同地点的人员平均疏散时间的研究,结果显示,人员的疏散时间仅仅依赖他们的初始位置及门的宽度(Tajima. Y, Nagatani. T, 2001; Takimoto, Nagatani, 2003)。Nagai 等人(2004)用实验研究了在一个黑暗房屋里的人员疏散过程,目的是探究紧急出口的位形对于疏散时间的影响,将模拟结果与实验进行对比,发现实验观察到的结果能够被扩展的格子气模型模拟出来。

我国的研究人员在这方面也开展了一系列的研究并取得了一些有意义的成果,宋卫国(2003)等人运用社会力模型对紧急情况下(如火灾发生时)的人员疏散现象进行了模拟,重现了实际疏散中出现的典型现象,着重研究了出口宽度、出口厚度等建筑结构特征以及期望速度等人群特征与疏散时间之间的关系。在此基础上,宋卫国等人(2005)就基于经典元胞自动机模型,提出了一种新的元胞自动机模型。通过将模型的运算结果与多粒子自驱动模型进行比较表明,新模型在人员行为、疏散速度以及“快即是慢”效应等方面都可以得到与后者相同的结果,而运算速度则与普通的元胞自动机及格子气模型相当,比社会力模型大为提高。

张培红等(2005;2006;2007)利用基于自适应网格生成器技术的人员流动二维元胞自动机模型,实现对具有障碍物的疏散通道上高密度人群流动的计算机模拟。结果可以清晰地观察到人群流动过程中的绕流障碍物现象,以及由于障碍物存在导致疏散通道附近人群滞留与成拱现象。朱艺等(2007)运用元胞自动机模型分别对不同房间结构中的人员疏散进行了模拟,重点研究了人员密度和出口条件对疏散时间的影响。杨立中等人(2002,2004)在已有的元胞自动机交通流模型和行人流模型的基础上,提出了一个模拟火灾中人员逃生的基本模型,并介绍了其扩展模型的应用。在此基础上,提出了一个基于元胞自动机理论的人员行为微观离散模型,该模型可以充分考虑人员个体行为特征,认为人员在选择逃生路线时将受到一系列因素的制约,包括人员对建筑物结构的熟悉程度、对紧急情况发展的了解程度以及周围人员之间的引力和斥力作用等,并进行了实验研究。

为了解决计算模型中的碰撞问题,格子气行人流模型使用了连续变化的方式。在本章中,我们拟建立一个新的模型,对格子气有向随机行走行人流模型中转向概率的计算方式进行变更,运用避让规则,建立一个所有的行人流并行同步的元胞自动机行人流模型,利用这个模型,模拟室内人员的疏散过程,并与 Tajima. Y 和 Nagatani. T 的结果进行比较(Tajima and Nagatani, 2001),得到

了更加接近人员疏散情况的实际空间位形演化图。在此基础上,进一步研究了疏散时间与门的宽度、与人员的初始分布密度之间的关系。

## 12.2 模型与演化规则

在规则的平面正方格子上建立室内人员疏散的元胞自动机模型,房间的大小由网格的尺寸  $B \times A$  来定义,其中宽度为  $A$  个格子,长度为  $B$  个格子,房间存在一个惟一的出口,位于西北方向的顶点处,出口的宽度为  $W$ ,与出口相邻的房间外有一个扩展的空间,宽度为  $A$ ,长度为  $B/2$ 。房间的结构如图 12.1 所示,其扩展的空间主要作为疏散时的缓冲区域。因此这个房间包含了两个区域,一个区域是图中的 abcd,另一个区域是图中的 befd,这个区域没有直接面对出口。格子上的一个点表示一个需要疏散的人员,在系统中,每一个人只能占据一个格点,即在同一个时刻,不能有两个或者多个人员占据同一个格点,满足排他性的要求。在初始时刻,所有的人员均匀分布在房间的各个位置。演化开始后,所有的人员向出口方向同步运动,每一个演化时步,疏散的人员只能运动一个格子,即所有的人员具有相同的最大运动速度,其运动速度取决于人员的状态以及他周围的环境。演化的规则如下:

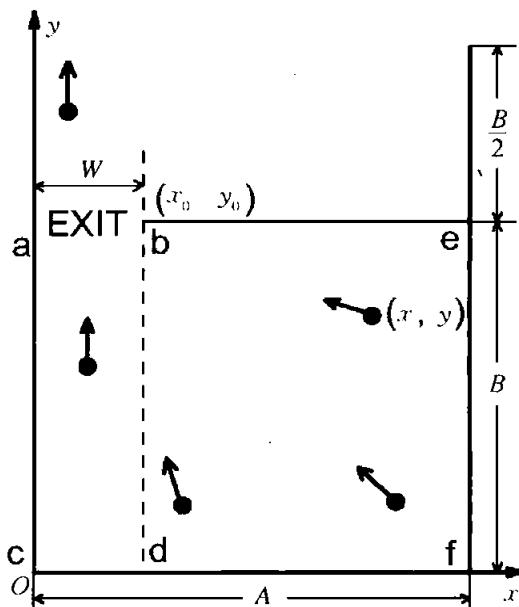


图 12.1 疏散实验空间结构示意图

规则 1: 在 abcd 区域,所有的人员直接面向出口,如果在个体的运动方向上没有其他人在前方,其首选的方向就是从南向北,下一时刻他就可以运动到相邻

的格子；如果在前方有人挡住了去路，则他可以向右或者向左运动，优先考虑的方向是在其运动方向上有更多的自由空间距离，如果在两个方向的邻近格子此时均被占据，则此人就停留在本格子上。

规则 2：在 befd 区域，行人不直接面对出口，对 Tajima 等人建立的模型中定义的决定转换概率进行改进，首选的运动方向是从南向北及从东向西（图中的向上及向左），如果首选的两个方向上都没有被占据，就以一定的概率选择其中的一个方向运动。向左运动的概率是  $D_x$ ，向上运动的概率是  $D_y$ 。  
 $\begin{cases} D_x = |x - x_0| / (|x - x_0| + |y - y_0|) \\ D_y = |y - y_0| / (|x - x_0| + |y - y_0|) \end{cases}$ ，其中  $x, y$  是疏散人所处的位置， $x_0, y_0$  是相应出口边缘的位置。但与 Tajima 模型不同的是，当  $D_x > D_y$ ，疏散者首选的位置是左边，而备选的位置是其下边的位置。当  $D_x < D_y$  时，首选的方向是上边，而备选的位置是其右边。这个改进能够让人沿着墙壁加速行进，这个现象同样被 Tajima 模型进行了描绘与模拟，但在其模型中，疏散者往后退步的行为是被禁止的。当两个首选的运动方向均被占据后，首选左边运动的人运行到下方，首选向上运动的人运动到右侧，当然在两种情况下要求备选的位置是空闲的，如果两种情况下备选的位置都是被占据的，则疏散者保持不动。

规则 3：当疏散者撤离了出口后，如果前面没有人，则他进入缓冲撤离区。在缓冲撤离区，行人可以往除向后的任意方向运动。在此模型中，向后运动是被禁止的，当其离开缓冲区的边界时，他就离开了这个系统。

规则 4：所有的人同步更新自己的位置。当两个或者多人要进入同一个位置时，会发生“碰撞”，此时使用等概率随机选择的方式，被选定的人进入该格点。

定义人员的密度为： $\rho = N/(A \times B)$ ， $N$  为房间中人员的数量， $A$  为房间的宽度， $B$  为房间的长度。定义一个平均速度  $v = N_m/N$ ，其中  $N_m$  为在某一个时刻房间中能运动的个体，平均流量为  $J = v\rho$ ，疏散时间定义为  $t_c$ ，表示人员从开始到全部从出口撤离所需要的时间。

为了研究出口的位置对于疏散效果的影响，通过改变  $(x_0, y_0)$  的位置就可以模拟不同出口位置的疏散情况。还可以进一步在房间的两侧均设置出口，其演化的规则与上述规则类似。

## 12.3 计算机模拟及结果

按照以上的演化规则，我们在计算机上实现了疏散的演化实验。初始时刻，

为了得到描述疏散过程的统计变量,实验中我们统计在每一时刻的密度、平均速度、流量,然后记录下每一种情况下的疏散时间。每一个过程都进行100次的演化然后进行系统平均。图12.3表示的是平均流量随时间演化的趋势图,实验中分别对不同的W即出口的宽度进行了对比实验。由图表表示的实验结果可见,在演化开始时,平均流量很高,即在开始时刻所有的人员都是可以运动的,但是由于受出口的瓶颈影响,人员很快就聚集在出口周围,只有靠近出口的人员才能够自由运动,平均流量迅速下降到一个比较低的程度,并保持到所有的人员完成疏散过程即演化过程结束。因此增加出口的宽度可以大大减少疏散的时间。

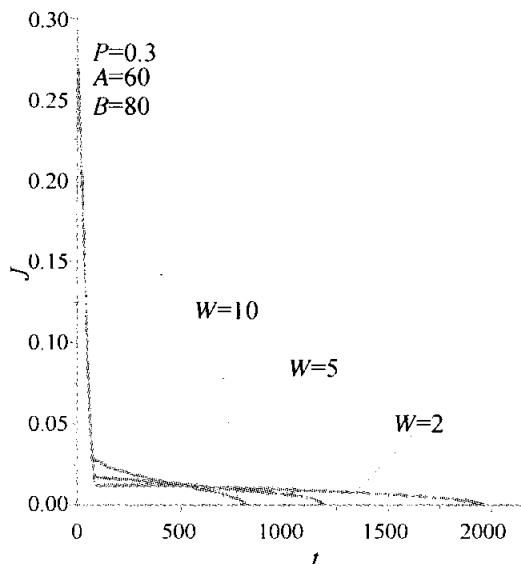


图12.3 疏散演化过程的流量随时间演化图

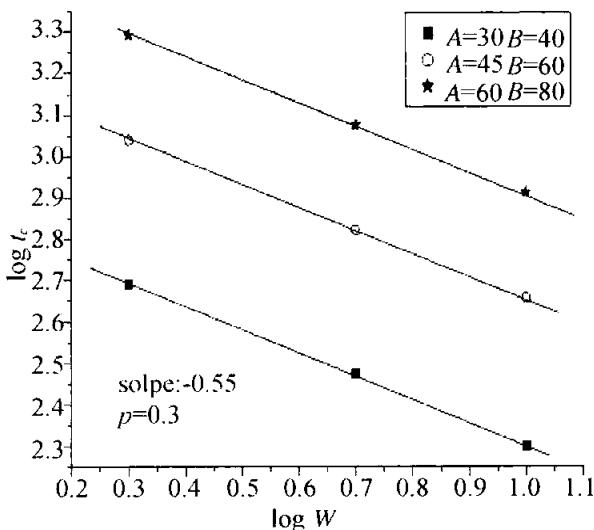


图12.4a 疏散时间与出口宽度关系图

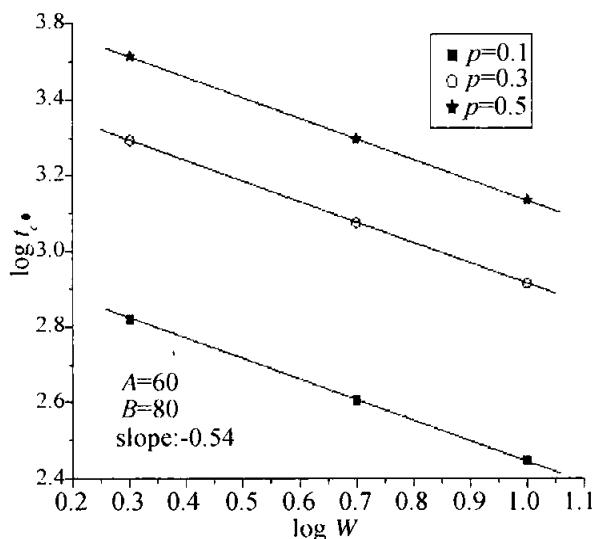


图12.4b 疏散时间与出口宽度关系图

图12.4a显示了保持出口宽度不变,改变房间尺寸时的几组不同实验的演化结果,图中纵轴为 $\log t_c$ ,横轴为 $\log W$ ,表示了疏散时间与出口宽度的关系。图12.4b显示了 $\log t_c - \log W$ 在不同初始密度下的关系。实验数据描绘的图线揭示了一个有意义的结果,即在我们所建立的模型中可以找到其标度关系为 $t_c \propto W^{-0.55 \pm 0.01}$ 。这是一个非常重要的特征,即改变系统的尺度及初始密度时,疏散时间与出口宽度之间的关系保持一个定值。

图 12.5 记录了在不同初始密度下平均速度随着演化时间变化的关系, 实验结果表明, 随着演化的进行, 开始时系统中人员的平均速度较高即所有人员都能够运动, 随着人员的开始聚集, 平均速度迅速下降, 然后在比较长的一段时间里会保持比较低的速度, 与平均流量不同的是, 随着演化过程接近结束, 平均速度又开始增加并持续到演化结束。其原因是随着人群的缩小其聚集程度得到缓解, 当大多数的人撤出了房间时, 剩余的人可以更快地从出口撤离。从图中可以看出, 疏散时间  $t_c$  与初始密度具有密切的联系。随着室内人员初始密度的增加, 疏散的时间将变得更长。

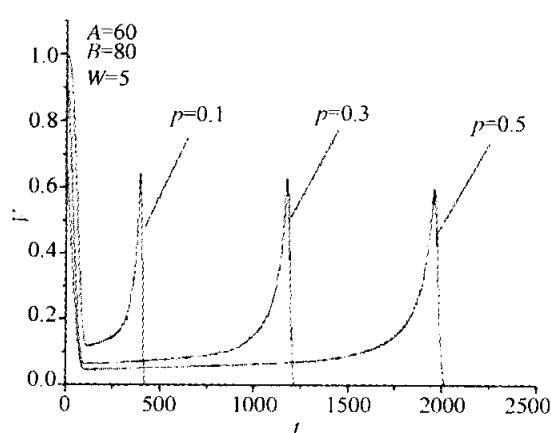


图 12.5 不同初始密度下疏散的平均速度随时间演化图

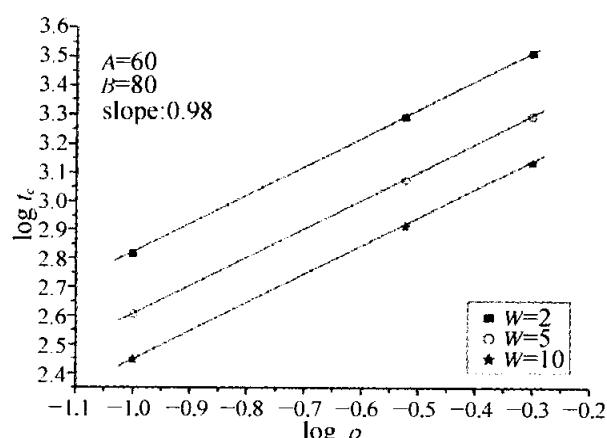


图 12.6 疏散时间随初始密度演化关系图

图 12.6 显示了疏散时间随着初始密度变化的  $\log t_c - \log \rho$  关系曲线, 从图中可以看出疏散时间与初始密度同样具有标度关系:  $t_c \propto \rho^{0.98 \pm 0.01} \approx \rho$ , 表明疏散时间与初始密度粗略地成正比关系, 从另外的角度也可以说每一个时间步通过出口进行疏散人员的数量几乎保持不变。

图 12.7 所示为出口位于中央时的演化位形图, 初始位形为随机分布, 房间的尺寸与上面模拟相同。初始密度为 0.3, 从图中可以看出, 随着演化的进行, 疏散人员形成了一定形状的聚集, 同样出现了人员从自由运动相到阻塞相的相变。其聚集的形状呈现出了拱型分布。

图 12.8 同样展示了人员疏散的演化位形图, 所不同的是, 出口的位置位于房间的两侧, 每侧的出口宽度为 1, 即两个出口的宽度之和与前面模拟实验中的出口宽度相等, 用位形图表示的实验过程同样显示了与实际疏散情况相似的结果。

进一步的实验显示了在出口的宽度相同的情况下, 出口的位置对于疏散时间与疏散速度没有影响, 即在图 12.7 及 12.8 所示的实验条件下, 同样得到了图

内人员的初始密度。在本模型中得到了如下的标度关系： $t_c \propto W^{-0.55 \pm 0.01}$  及  $t_c \propto \rho^{0.98 \pm 0.01} \approx \rho$ 。另一方面，人员的疏散过程也能再现，且比格子气模型更加接近实际情况。由于在模型中忽略了人员之间的摩擦作用，一些由摩擦因素引起的现像在本模型中不能再现出来。进一步的研究应该围绕这个因素开展工作。

## 参 考 文 献

- Blue, V. J., Adler, J. L., Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata micro-simulation, in Traffic Flow Theory: Natl Acad Sci: Washington. 1998.
- Dieckmann, D., Die Feuersicherheit in Theatern. German: Jung (Miinchen). 1911.
- Fischer, H., Über die Leistungsfähigkeit von Türen, Gangen und Treppen bei ruhigem, dichtem Verkehr. Dissertation. German: Technische Hochschule Dresden. 1933.
- Helbing, D., Molnar, P., Social force model for pedestrian dynamics. Phys. Rev. E, 1995 (51):4282~4286.
- Kirchner, A., Schadschneider, A., Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications, 2002, 312(1~2):260~276.
- Nagai, R., Nagatani, T., Isobe, M., Adachi, T., Effect of exit configuration on evacuation of a room without visibility. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2004, 343:712~724.
- Qiu, B., Tan, H. L., Kong, L. J., Liu, M. L., Lattice-gas simulation of escaping pedestrian flow in corridor Chinese Phys, 2004, 13(6):990~995.
- Tajima. Y, Nagatani, T., Clogging transition of pedestrian flow in T-shaped channel. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2002, 303(1~2):239~250.
- Tajima. Y, Nagatani. T., Scaling behavior of crowd flow outside a hall. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2001, 292(1~4):545~554.
- Tajima. Y, Takimoto, K., Nagatani, T., Scaling of pedestrian channel flow with a bottleneck. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2001, 294 (1~2): 257~268.
- Takimoto, K., Nagatani, T., Spatio-temporal distribution of escape time in evacuation process. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2003(320):611~621.
- Yang, L. H., Fang, W. F., Li, J., Hang, R.; Fan, W. C.. Cellular automata pedestrian movement model considering human behavior. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (16): 1695~1699.
- Yang, L. Z, J. Li, Liu, S. B., Simulation of pedestrian counter-flow with right-moving preference. Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications, 2008, 387 (13): 3281~3289.
- 宋卫国,于彦飞,陈涛. 出口条件对人员疏散的影响及其分析. 火灾科学, 2003, 12 (2): 100~104.
- 宋卫国,于彦飞,范维澄,张和平. 一种考虑摩擦与排斥的人员疏散元胞自动机模型. 中国科学

- E辑,2005,35(7):725~736.
- 杨立中,方伟峰,黄锐,邓志华.基于元胞自动机的火灾中人员逃生的模型.科学通报,2002,47(12):896~901.
- 杨立中,李健,赵道亮,方伟峰,范维澄.基于个体行为的人员疏散微观离散模型.中国科学E辑,2004,34(11):1264~1270.
- 张培红,黄晓燕,万欢欢,刘牧.基于智能体技术的人员群集流动动力学模型.沈阳建筑大学学报(自然科学版),2005,21(4):358~362.
- 张培红,黄晓燕,万欢欢,刘牧.人员群集流动自适应元胞自动机模型研究.沈阳建筑大学学报(自然科学版),2006,22(2):289~293.
- 张培红,王粟,黄晓燕.公共聚集场所疏散通道障碍物对人员疏散安全性的影响.沈阳建筑大学学报(自然科学版),2007,23(6):973~976.
- 朱艺,杨立中,李健.不同房间结构下人员疏散的CA模拟研究.火灾科学,2007,16(3):175~179.

# 第 13 章

## 谣言传播的计算实验建模与实现

### 13.1 概 述

北京时间 2008 年 5 月 12 日 14 点 28 分,在我国四川省汶川,一场 8 级特大地震灾难降临,瞬间震动大半个中国,让人们仿佛从汶川的天崩地裂中窥见到 32 年前席卷 24 万条生命的唐山大地震的狰狞面目,伤亡之惨烈,震惊世界。然而,当人们还没有从地震带来的悲哀和恐慌中摆脱出来,社会民众对地震的恐惧心理又一次被激发,各种负面信息、谣言开始四处传播,尤其是关于地震成因、灾区情况的谣言信息以及虚假的地震预报。这些谣言不仅让劫后余生的人们再次陷入恐慌,更让整个社会再次陷入无序,从而会消耗更多精力去解释与平复。将历史回溯到 2003 年 2 月,席卷了整个中国并波及全世界的 SARS 病毒传播的情况,我们现在应该还记忆犹新。SARS 病毒的肆虐不仅仅是因为它是一个医学或流行传染病问题,更重要的是它是一场严重的社会危机。这场灾难不仅夺去了许多人的生命,耗费了无以计数的社会财富,而且对人们的生活秩序、经济与社会发展以及整个人类文明构成了巨大的挑战。在危机发生并波及的前后半年时间里,广州、北京、江苏、香港、福建等 10 多个省市都先后出现了大规模谣言传播以及以抢购、群体性惊恐、民工和学生的无序溃散为主要表现形态的强烈不合作和不合理的社会恐慌现象(周晓虹,2003)。社会学将这种现象称为“群众性歇斯底里”,即群众性恐慌事件,它集中反映了在信息稀缺的情况下群众的恐慌心理以及非理性行为。谣言的传播在其中发挥着催化剂的作用,加速了社会危机的进程。

谣言,作为一种社会现象和传播现象,藏匿于我们社会的每一个角落,发生

于社会每个历史时期,任何人都无法忽视它对我们社会生活的巨大影响。正如 Allport 所说:“无论覆盖面宽或窄,持续时间长与短,它的影响是和平的还是破坏的,谣言话语存在于每一种文化的篇章中,任何社会都不可能没有谣言。”(刘永元等译,2003)所以,国内外很多学者从各种角度对谣言传播现象进行了研究。

由于研究者关注的角度和切入点不同,因此他们对谣言的定义也林林总总、大相径庭。Allport 和 Postman(1947)将谣言定义为“一种通常以口头形式在人们中传播,目前没有可靠证明标准的特殊陈述”。这个定义为后来的谣言研究提供了指导作用。美国学者 Peterson 和 Gist (1951) 在《Rumor and Public Opinion》中对“谣言”的定义是“在人们之间私下流传的,对公众感兴趣的事物、事件或问题的未经证实的阐述或解释”,以“未经证实”作为谣言的本质特征。而 Knapp(1944)则认为谣言是一种“旨在使人相信的宣言,它与当前时事有关,在未经官方证实的情况下广泛流传”。清华大学胡钰(2000)在这个定义的基础上进一步提出:“谣言是一种以公开或非公开渠道传播的对公众感兴趣的事物、事件或问题的未经证实的阐述或诠释。”美国社会学家 Shibutani(1966)对谣言的经典定义为“一群人议论过程中产生的即兴新闻,谣言是一种集体行动”。综合上述定义,我们可以看出谣言的本质就是信息,并具有以下特点:一是必须在一定数量的人群中流传,二是必须为众多人相信,三是它是与事实有出入的消息。

有关谣言的经典研究当推 Allport 和 Postman 对 1942 年美国“珍珠港事件”中战时谣言的分析。这一谣言的传播是以美国民众对官方的“战时损失报告”的不信任为基础的,Allport 和 Postman(1947)通过实验性研究在《The psychology of rumor》一书中总结了谣言基本规律的著名公式:  $R = i * a$ 。其中,  $R$  指谣言的泛滥程度或者强度,  $i$  指谣言所涉及的信息的重要性(importance),  $a$  指谣言所涉及信息的证据的模糊性(ambiguity)。他们认为任何一个谣言都必须要有一个赖以滋生的土壤和养分方能成长,谣言产生的两个基本条件:第一, 主题对于传播者与接收者来说有一定意义;第二, 事实必须略带有模糊的色彩。“谣言传播的广度随其对相关人员的重要性乘以该主题证据的模糊性的变化而变化。重要性和模糊性之间的关系不是加法而是乘法,因为如果两者之中只要有一个为 0,也就没有谣言了。”(刘永元等译,2003)而且他们还概括出谣言传播过程中的三个基本机制:削平(leveling)、磨尖(sharpening)、同化(assimilation)。削平是指谣言在传播过程中逐渐变短、变简洁、变通俗的倾向;磨尖指从很多意思中选择有限的几种要素进行接受、记忆、报告的倾向;同化指谣言朝听者感兴趣、所期待的方向发生变化,逐渐形成一个完整结构的倾向。这三大机制不仅为我们从社会心理学角度研究谣言的传播提供了有效的分析工具,而且表明谣言在大多数情况下不是一个人的创造,而是一系列传播者行为累加或“群体贡献”

的结果。社会学家科拉斯将批判地接受事物的限度之逆数作为一个变量加在 Allport 和 Postman 的公式中,公式为:  $R = i * a * l/c$ ;  $l$  (limits) 指限度,  $c$  (criticize) 指批判;意思是如果批判地接受事物的能力增加,流言则会减少,反之,如果批判能力很低,对任何事物都不加选择地接收,谣言就会扩散。这一公式更进一步强调了接收主体的作用,而不仅仅将谣言的发生归咎于客观事件状况。但是,Allport 以及以后对这一理论的完善者对谣言传播的分析侧重于个体层面,对谣言传播中个体之间的相互影响问题关注不够,从而很难深入理解谣言是如何变成一种社会现象的。

谣言的形成与传播扩散有两个重要的特点:社会性与在社会性基础上的过程性。谣言的传播过程既是一种信息的扩散过程,同时,又是对信息内容进行解释和评论的过程(Kapferer, 1991),其中,掺杂着个人感情与群体意识,尤其是一些关于社会负面信息的谣言或“黑色谣言”会煽动道德上的评论,这些评论最终会趋向一种共同的情感与道德评判,从而形成一种群体舆论。而且谣言本身又是这一扩散过程中的产物。美国人际传播学者 Dance(1967)用不断上升的螺旋线来说明人际传播过程,认为传播的过程是一个不断上升扩大、持续不断的螺旋体,传受双方的“认知场”和“信息场”总是不断积累和扩大的。这种“螺旋”传播模式表现了人际传播不间断变化的特点,随着越来越多的人卷入其中,越来越多的思想、价值观、利益等等个人与社会的因素掺入其中,从宏观上看,正是这种积累性造就了人类文明;从微观看,不论是个人还是组织都要在传播中自觉地、不断地推陈出新。传播扩散过程的本质是通过交流信息,把一个人的所知传递给另一个或几个人,它或许与媒介系统控制息息相关,但更多的却依赖于个人环境和社会环境的变动。

因此,对扩散全貌的分解剖析是研究谣言传播过程更为具体扎实的方法。本文提出从整个传播系统的角度来考察谣言形成与传播扩散,实际上是将谣言置于整个传播生态的背景中,通过对微观个体的多样性与差异性建模,以及谣言的产生条件、生存环境、交流机制的研究,考虑到传播网络拓扑结构本身对传播行为的影响,建立谣言传播的计算实验演化模型,再现谣言传播演化过程,从中分析谣言形成与传播过程中各种因素的影响。

## 13.2 谣言传播的计算实验模型设计

作为一种跨学科的研究方法,计算实验本身正是跨学科的产物,它涉及社会学、心理学、人类学、经济学等方面的内容,这种研究方法的发展只有得到各学科

间的相互融合与共同努力,才能使计算实验从一种隐喻成为一种现实的研究范式。正如本文所研究的内容,谣言乃至舆论的传播本身就是一个典型的复杂社会心理的演化过程,它是以众多微观个体为主体在宏观环境影响下交互与改变的演化过程。因此,一个合适的该过程模型同时需要一个正确的谣言传播潜在社会网络的描述以及一系列定量的微观个体参与谣言传播的各种行为机制。我们对它的研究还只是尝试通过一套简单的规则把这些微观行为机制表现出来,而且由于专业知识与研究能力的局限性,使得规则会似是而非或者模型的设计上会存在缺陷,但是我们希望通过本文的介绍,能够展现出计算实验作为一种新兴的研究方法所独有的研究意义和全新的视角。

在谣言传播模型中,我们主要引入以下几个模块:社会网络模块、人代理模块和谣言实体模块。

### 13.2.1 社会网络模型设计

人的社会性决定了人需要有人际传播,有了人际传播,就会有谣言的存在。虽然大众媒体也对谣言的产生起着作用,但是本文将重点放在了人际传播上。

在这一小节中,我们主要构建基于复杂网络的理论人际关系社会网络模型。它是用来模拟个体间关系以及个体间信息的传递、整合与记忆过程的一系列的微观再现网络。社会网络具有明显的社会性,由人类社会中具有独立判断能力的人作为节点,他们之间的联系或交互作为边而形成的网络。个体就是通过这样的相互联系、相互作用并按照一定的演化规则来更新自身的状态、属性,最终我们在这种框架下来研究谣言的形成、传播等问题。

在很长一段时间内,由于计算性能与数据处理能力的局限,研究人员通常将真实系统各要素之间的关系用一些规则网络来表示,如一维链、二维平面上的欧几里得格网等。直到20世纪50年代末,Erdős和Rényi(1959, 1960, 1961)提出了随机图模型(ER模型)来描述复杂网络的拓扑结构,即节点之间的相互连接看作随机分布。此后的近四十年的时间里,无明确设计原则的大规模网络主要用这种简单而易于被多数人接受的拓扑结构来描述。常见的随机图如下两种:一种称为 $p$ 随机图,即指任何两个节点以概率 $p$ 连接,用邻接矩阵表示就是对任意 $i \neq j$ ,  $g_{ij}$ 以概率 $p$ 为1,以 $1-p$ 为0;另一种称为 $k$ 随机图,指每个节点随机选取 $k$ 个节点作为其邻居(与之相连)。

实证研究表明:大量的现实网络总是既非完全规则,也非完全随机的,而是具有其他统计特性的网络,许多现实网络特别是社会网络都表现出集群现象,由此引发人们对小世界网络的研究。Watts和Strogatz(Watts and Strogatz, 1998; Watts, 1999)为小世界网络提出了构造模型(WS模型),该模型由一个具

有  $N$  个节点的一维规则环形网格开始, 环上每一个节点与两侧各有  $m$  条边相连, 然后对每条边以概率  $p$  随机进行重连(自连接和多重连接除外)。在 WS 模型提出不久, Newman 和 Watts(1999a; 1999b)对 WS 模型作了改进, 提出了 WS 模型的一个变体模型(NW 模型), 通过在随机选择的节点对之间增加长程连接, 而原始格上的边保持不动。这一模型比 WS 模型容易分析, 而且它在形成过程中不会出现在 WS 模型中却可能发生的孤立的簇的情况。这些重连的边叫“长程连接”, 长程连接大大地减小了网络的平均路径长度, 而对网络的簇系数影响较小。WS 模型的建立和生成有其深刻的社会根源, 因为在社会系统中, 大多数人直接和邻居、同事相识, 但个别人也有远方甚至国外的朋友。为进一步研究小世界网络的产生机理, 杨波和陈忠等人(2004)也提出了基于个体选择的小世界网络的结构演化, 并提出了地理位置择优连接机制, 说明小世界的形成是系统增长和复杂网络的演化模型研究局部作用的共同结果; 刘强和方锦清等人(2005)通过交叉边的方式探索了一种产生小世界特性的新方法。

虽然 WS 模型的度分布与许多现实网络都不相符, 用它们来描述这些现实网络, 具有局限性。然而我们在社会网络建模中, 小世界网络还是能够很好的体现人际交互的过程。所以, 我们主要采用了规则网络、随机网络以及小世界网络三种结构, 并对它们作了对比。

经过模拟分析, WS 模型与 NW 模型在实验结果上并不存在可鉴别的结果。而且 WS 模型与 NW 模型都在规则网络中增加了长程边, 通过变化概率  $p$ , 可以实现从规则网络( $p = 0$ )到随机网络( $p = 1$ )的变化过程。所以, 在模型的实验中我们采取 WS 模型来构建社会网络。

### 13.2.2 人个体设计

#### 1. 自我决定

一个人是接纳还是拒绝其他人的意见有一部分是由自己内在的性格决定的。自我决定是“个体在内在动机的驱使下, 在生活中主动采取行动并不受外力影响和干预作出选择所需要的能力和态度”。(Field, 1996)自我决定理论认为人是积极的有机体, 人们具有一种基本的内在的自我决定的倾向性, 正是这种倾向性促使人凭借内在的兴趣来获取知识和技能, 从而实现与社会环境的灵活适应。它强调人类行为在多大程度上是自愿的或自我决定的, 以及自我在动机过程中的能动作用。

在本文中, 对自我决定的定义与自我决定理论的含义基本上一致, 但是我们引入了人际关系中的信任问题。心理学的研究表明, 一个人的生活经历和对人性的看法会使他形成一般性的对他人的可信赖程度的概化期望(Generalized

Expectancy)或信念(Rotter, 1971; Wrightsman, 1991)。这种特质性的信任倾向的形成受到社会文化传统、个人早年经历、社会化过程中的其他比较大的事件等因素的影响,一旦形成则难以改变。心理学家 Deutsch (1962)认为,信任是一种主观的以行为体为中心的信念,即行为体是否信任他者取决于行为体对世界的主观态度。Deutsch 意识到了信任所涉及的风险问题,他认为不同的行为体对风险的承受能力是不一样的,这种承受能力在很大程度上取决于行为体的特质。他将行为体区分为信任型和怀疑型两类,进而将信任归结为行为体的主观倾向或特性。Gambetta D. (1988)给出了信任的经典定义:一个行为体评估另一个或一群行为体将会进行某一特定行动的主观概率水平,这种评估先于该行为体能监控此行动之前(或者即使他能够监控此行动,也无法去监控),而且,这种评估在一定的情况下作出,并会影响到该行为体自己的行动。这个定义具有以下优势:信任可以被看作是一个阀阈点,即行为体预期线上的一个阀阈点。在它上方是绝对的信任,下方则是绝对的不信任,处于中间状态的则是不确定。

因此,在信息的交换过程中,我们把人的自我决定的能力(可以看作是自主性)引入模型中,强调人的不受其他外界影响对传播者与所传信息自在的进行判断与甄别。

## 2. 可信度

对行为体而言,出于对他者的信任而采取的行动也是基于对被信任者“可信度”(或表现出来的可信度)的估测之上。比如:行为体会考虑衡量被信任者的声誉、行为表现以及言谈举止等等。著名心理学家 Hovland 和 Weiss(1951)在实证研究的基础上曾提出了信源的可信性效果的概念,即:“一般来说,信源的可信度越高,其说服效果越大;可信度越低,说服效果越小。”根据 Mayer 等的观点,信任对象的可信度元素一般包括:能力、诚信和善意,而且他们的研究也表明,这三个可信度的元素或特征基本上解释了被信任对象的可信任程度的绝大部分内容(Mayer et. al, 1985)。因此,本文依据这三个特征为基础构建了关于可信度的概念框架。

假设消息的传播者的可信度表现程度越高,传播者的意见就能越容易赢得接收者的接受。

## 3. 状态

我们主要假设了四种人在谣言传播中的状态:初始状态、相信状态、反对状态、不确定状态以及遗忘状态。开始时,社会中的人没有接触到谣言。当有人制造了谣言之后,他会通过社会网络传播到他的邻居、好友,进而使得谣言传播到社会中去。受谣者会通过对谣言的分析与鉴别,采用不同的态度,我们用不同的状态变量来表示,他可以经历从接触到谣言但对谣言感到不确定状态,进而随着

谣—辟谣—再传谣”的怪圈内循环恶化。这不仅仅是由于谣言的内容上在谣言制造过程中认知的歪曲、判断的歪曲、功利性歪曲与表意性歪曲的畸变和在传播过程中不断磨尖、削平与同化的再造,追究更深层的原因是谣言涉及的内容对人们容易产生影响甚至危害。当特定事件发生后,由于正式的传播渠道受损,大量的有关信息不能及时地传递到广大受众,对此有关系的人们由于渴望得到有关事件的信息进而转向通过各种非正式信息渠道寻求信息,因而围绕着所关注的主题出现了各种猜疑、歪曲、编造,最后使得谣言也不胫而走。可见,谣言总是先由对它的主题感兴趣的人进行积极地传播,传给那些对谣言内容有浓厚兴趣的人,传给那些与谣言有牵连关系的人,于是谣言在一定的共同兴趣群体中逐渐传播开来。

假设:谣言对每个人都具有一定的重要性,而且对每个人的重要性可能不同。当重要性越高,人们越容易接受与传播谣言。

## 2. 不确定性

它主要涉及对信息鉴别数据的缺乏。谣言总是被某些模糊性掩盖起来,“总是伴随着可靠的权威证据的缺席”,(Allport and Postman, 1947)这使得接触谣言的人既不能确认它为事实也不能驳斥它的谬误。据此,在模型中我们引入一个指数来衡量信息的鉴别资料的情况,即涉及信息的模糊度。譬如,SARS 与 AIDS,它们同样是病毒传播,而且 AIDS 的危害性比 SARS 更强,据统计目前全球有近 4000 万人感染了艾滋病病毒,而 SARS 至今感染的全球病人数量也不过是 AIDS 的五千分之一。而由于对 AIDS 的成因、传播方式、感染途径的研究比较完善,我们对 AIDS 的态度大多都是比较坦然,关于这方面的谣言现在并不是很多。但是 SARS 流行期间,人们应对这场突如其来的灾难显得措手不及,对它的发病机理、传播途径、治疗方法等都知之甚少。关于 SARS 的猜测与推断更是议论纷纷、莫衷一是。诸如“广州发生致命流感”、“不明病毒一夜夺命”,甚至“打个照面或者对望都会传染”、“要用飞机洒农药的方式进行全城消毒”、“北京即将封城”,这些谣言逐步加深了 SARS 病毒事件的模糊性。不仅如此,接下来更是有与 SARS 病毒没有直接联系的流言,包括美伊即将开战、“农药船沉没污染了饮用水源”等,普遍存在于人们心中的恐慌心理越演越烈(周晓虹,2003)。因此,SARS 病毒对公众的重要性不单单取决于其对生命的危害程度,也在相当程度上取决于它的不可控性。

假设:信息的不确定性越高,谣言对受传者的影响越大,并且信息越容易被人为地改造。

## 3. 事件的危害性(重要性)

该指标主要是从客观的角度对事件对人的危害进行评价。诚然我们在

SARS 流行初期,在我们还没有真正认识这个病毒之前,对它的危害性并不能有客观的认识,所以往往对此评价会站在后验的基础上。再如 SARS,它是由冠状病毒所引起,论传染力,它不如麻疹与流感;论病死数,更远远不如病毒性肝炎和肺结核。所以从我们的定义上讲,它的危害性要比肺结核与病毒性肝炎要小,但是在谣言的形成与传播过程中,人们把它的危害放大甚至严重夸大。

### 13.2.4 人际交流行为的情景设计

根据 Grice 的会话原则的质量准则,“做自己认为正确的事情,不要说自己认为不真实的话,不要说自己缺乏足够证据的话”,为了有效地沟通,一般情况下要传播自己肯定的信息,至少自己认为它是合理的(Grice, 1975)。因此,从这个角度,我们假设当有人听到了信息但是不相信,他将不会对这个消息的传播作任何努力。也就是说,只有相信了的人才会把从他人口中得到的关于事件的信息传播给自己的邻居或者朋友,当然也可能是自己远方的亲戚甚至熟人。

Grice 的数量准则(“使自己所说的话达到当前交谈目的所要求的详尽程度”,“不能使自己所说的话比所要求的更详尽”)提出说话人传播的信息必须是详尽的并且能够添加到听众的认识中去(Grice, 1975)。研究表明,交流者会尝试尽自己最大的努力去重复或者着重强调他的观点以说服听众,而且他们会增加与不认同自己的听众的接触。当然,当传播者若是一次次地都没能说服成功,他会终止自己的努力。在这里,我们假设当一个人若是连续 3 次都没能改变他人的初衷,那么他将不会在这个人身上去做任何努力。

进一步考虑,Grice 的质量准则也是从接收者的角度所做的补充。听众会衡量接收到的信息对自己的影响程度以及自己对信息源和发送者的信任情况,来做出选择是否要去相信。

当然,一个真正的信息传播过程要远比以上描述的复杂得多。为了使得模型更加贴切现实,以下还有对这个场景的设计。

前期,政府与主流媒体在公共事件的舆论导向上是缺席的,对舆论并不进行控制,此时,舆论还仅仅潜伏于公众中,人们对它都不是很了解。

不管是在传播谣言还是在传播其他信息,也不管传谣者是否完全信服谣言的内容,传播者的首要的目的就是要说服受传者相信自己的传播内容,为此,他就要对谣言的内容进行新的补充与排列组合,对谣言所阐述的事情进行更加合理的解释。“谣言的传播者与其所带来的信息被视为完全同一,拒绝相信谣言或对谣言产生怀疑,就是拒绝传播者本身。”(Kapferer, 1991)所以,为了使下一个受谣者不至于怀疑自己的传谣,传谣者会不断地给谣言添加自己认为合理的解释或者为谣言制造伪证或者夸大事件的严重性。

当一个人听到了信息,但若是长时间没有听到他人关于事件的议论或者自己也不曾提及,那么他会慢慢地将这个事情遗忘掉。

当一个人一次次地没能说服另一个人接受自己的观点,他有强化信息的影响力以使人信服的趋势,对信息进行加工、重构。我们假设,自己对事件的关注度越高,对信息进行改造的几率越大。

不论接收者接受与否,信息在他的头脑中总会留有印象。

健谈的人传播信息或者自己的观点比不善言谈的人更加频繁。对事件关注度高的人也会比他人频繁于信息与观点的传播。

个人的决策不仅仅受消息以及自己的认知水平的影响,即便是有比较有力的证据,决策还会受到群体对他带来的压力影响。Festinger(1957)的认知失调理论也认为认知的不协调会导致心理冲突,由此引起紧张不安,促使个体努力设法减轻或消除不协调。也就是说,如果一个人的观点与所在的群体不同,那么由于害怕寂寞或者是担心关系的破裂等原因,他会学着避免接触与已有认知因素相矛盾的信息、隐藏或者避免表达自己的观点还可能直接选择随大流。

某个谣言产生之后,由于在传播的过程中不可能始终保持它的原貌,而是在传播中不断地演化和发展,待到它回到其源点的时候,可能就连最初的传谣者都无法辨认出来。

## 13.3 实验实现

### 13.3.1 实验的实现

此计算实验模型是基于 Java 平台,整个虚拟的世界是一个  $800 \times 800$  像素的二维格点。一定数量的人个体可根据需要按一定规律分布在二维格点之上,每个个体在虚拟世界中占一个格点,但是为了看得清晰,它的显示区域可以在  $1 \times 1$  像素与  $7 \times 7$  像素之间改变。人的数量也可以根据研究的特殊需要或者是个人偏好在 0 与 640000 之间进行改变。它的数目不能够太小,这样研究结果会不可取,但是当人的数量在 5000—100000 之间时,通过实验我们并没有发现明显的可辨别的差别。所以,在本文中,人个体的缺省值设置为 10000。

在仿真实验中时间步的更新依据以下假设:当出现一个人将要进行二次传播或者一个在该时间内才相信谣言的人要进行传播时,时间步更新。即先将谣言的初始信源放入传播向量 NOW 中,以后参与谣言传播的人也会放入向量 NOW 中。每个时间步的开始,NOW 中表示上一个时间结束后相信谣言的人的

集合,在一个时间段内不会更新,仿真运行,当一个在 NOW 中的人再次传播或者出现一个人并不在 NOW 中而他将要传播谣言时,时间步更新。

对模型的具体实现我们主要采用以下流程:首先,生成虚拟的人在虚拟世界中的分布地图;接下来,依据 WS 模型建立人与人之间的社会关系网络;然后对虚拟人的属性进行初始化,虚拟的社会系统已经初步建立;最后,就可以对谣言传播以及社会公众的交互过程情境实现进行构建及充实。

### 13.3.2 属性及默认值设定

表 13.1 人主体类的属性与默认值

属性	数据类型	取值范围	默认值	注释
编号	INTEGER	0—9999		人的标识
位置	POINT	(0, 0)—(800, 800)	RANDOM	人在二维网格中的位置
自主能力	FLOAT	(0, 1)	RANDOM	人的自主性指标
可信度	FLOAT	(0, 1)	RANDOM	人的可信任程度
影响	FLOAT	(0, 1)	0	谣言给人的印象
状态	INTEGER			人的状态标识
遗忘	FLOAT	(0, 1)	0.3	遗忘的速度
记忆	FLOAT	(0, 1)	1	记忆力
健谈	FLOAT	(0, 1)	RANDOM	传播的欲望

表 13.2 谣言类的属性与默认值

属性	数据类型	取值范围	默认值	注释
不确定性(Uncertainty)	FLOAT	(0, 1)	1	谣言的模糊性
重要性(Importance)	FLOAT	(0, 1)		谣言对受众的重要性
危害性(Fatalness)	FLOAT	(0, 1)	0.7	谣言所设计内容对人客观影响评价

表 13.3 社会网络的属性与默认值

属性	数据类型	取值范围	默认值	注释
人的数量	INTEGER	0—100000	10000	虚拟世界中所设计的人的数目
邻居的数量	INTEGER	0—20	6	个体可以接触的人的数量
断链重连概率	FLOAT	(0, 1)	0.1	WS 模型中断链重连概率

## 13.4 实验结果分析

### 13.4.1 社会网络分析

我们首先基于相同的虚拟人分布与个体属性状态设计了三项实验,分别采用随机网络、规则网络以及小世界网络来生成社会网络关系,并进行了仿真。

通过仿真,我们可以发现,社会网络的拓扑结构对谣言的传播起着十分重要的作用。图 13.2、图 13.3、图 13.4,分别是在基于规则网络、随机网络以及小世界网络拓扑结构的实验中的演化状态的截图。为了能够清晰地识别个人代理的状态,我们并没有把人代理之间的关系连接显示出来。通过截图我们可以很直观的看出,基于随机网络与规则网络的情况不是很合乎常理。当社会网络基于随机网络生成,谣言的传播与爆发呈现出无规律性传播,而当基于规则网络时,谣言的传播则表现为地理性的分布。只有基于小世界网络时的情况比较理性,谣言呈现出地理性的分布但不缺乏超级传播者及集群现象。

当然我们可以把基于随机网络与规则网络的生成关系当作是基于小世界网络关系生成的两个极端的状态,它们分别代表小世界网络中断链重连概率为 1 与 0 时的情况。为了找出断链重连概率对演化状态的影响,我们又分别以不同断链重连概率生成小世界网络关系继续仿真实验。

在图 13.5 中,我们可以看到模型的连通性随着断链重连概率的减小而降低。每个曲线呈现近似“S”状,意味着在谣言传播前期相信谣言的人的数量增加的比较缓慢,然后才进入高速增长的时期。而当断链重连概率增加时,谣言会以更快的速度、更短的时间传播到社会中去。我们分别以断链重连概率在 0 与 1 之间取值对谣言传播进行实验,发现当断链重连概率超过 0.25 时,不论概率多大,模型的仿真过程与结果并不存在十分明显的突出差异性,谣言总是能够很快地传播到其他地区。

从图 13.6 可以分析,当断链重连概率增加,在某一时间上传播谣言的人数是增加的,随着仿真的时间的继续,它会下降得很快,并很快的降到最低点。并且,当断链重连概率增大,最大的传播谣言人数也会增加。

而图 13.7、图 13.8、图 13.9 则反映出,谣言的危害程度与平均传播路径长度也都会随着断链重连概率的减小而增加,平均传播路径长度的提高使得谣言畸变程度也越来越大;同时,谣言传播者的平均传播次数也会随着概率的减小而减小。

谣言的产生跟谣言事件的模糊性有很大关系,事件越是含糊不清,越是能引起人们对它进行探究和传播的兴趣。在对事件的探究过程中,由于个人的知识结构和经验范围非常有限,再加上往往这时候又得不到与事件相关的有效信息,人们对事件的解释就不可避免的添加上了浓厚的个人主观色彩和非理性的色彩,最后这种所谓的“合理解释”也就必然走向了谣传。

谣言形成及传播的必要条件是:谣言涉及内容的模糊性以及谣言对个体的重要程度。这两个因素,缺少任何一个,谣言都不能够得到公众的关注。但是,一旦可以满足传播的基本条件,随着谣言制造过程中的畸变、在其传播过程中的再造,谣言总是可以大范围的传播。而谣言的危害性又仅仅是其传播的充分条件,对谣言的传播有一定的催化作用。

在资讯技术发达的现代社会,谣言原本是最不容易产生的,而传播的快速性同样对现代社会的信息公开又是一个巨大的挑战。对于信息相对较少的东西,公众所给予的关注也往往越大,也最容易妄加猜测与口耳相传。对谣言反应越迟钝,波及的范围越广,处理起来就越被动、损失就越大。因此,信息公开要及时、透明、彻底。对于关系社会公共利益以及民众生命财产安全的重大信息,政府或者相关机构辟谣要及时,信息公开一旦迟延或者公开不透明、不彻底,对事实真相含糊其辞、躲躲闪闪,便会造成谣言四起,民众的猜疑就与日俱增,就会让社会处于混乱与不安之中。谣言的重要性是客观的,无法改变,在谣言的控制中只能对模棱度加以改变。要减少信息的模棱度就要公开真实的情况,所谓“谣言止于公开”就是这个道理。

当然针对某一具体事件或者现象,谣言的形成与传播过程的影响因素是复杂多变的,而且由于人的社会性与异质性使得谣言的传播更加复杂。我们仅仅初步构建了一个比较简单的模型,模型还有进一步丰富的空间。

## 参考文献

- Allport, G. W., Postman, L. J., *The psychology of rumor*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1947.
- Dance, F., *Interactivity*. In Barnes, Susan, B. (Ed.) *Computer-mediated communication* (pp. 20 - 21). New York, NY: Holt, Rinehart and Winston, 1967.
- Deutsch, M., *Cooperation and trust: some theoretical notes*. in M. R. Jones ed., *Nebraska Symposium on Motivation*. Nebraska University Press, 1962.
- Erdős, P., Rényi A., *On random graphs*. *Publications Mathematicae*, 1959, 6: 290~297.
- Erdős, P., Rényi A., *On the evolution of random graphs*. *Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Science*, 1960, 5: 17~61.

- Erdős, P., Rényi, A., On the strength of connectedness of a random graph. *Acta Mathematica Scientia Hungary*, 1961, 12: 261~267.
- Field, S., Self-determination instructional strategies for youth with learning disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 1996, 29: 40~52.
- Festinger, L., A theory of cognitive dissonance. Stanford, CA: Stanford University. 1957.
- Gambetta, D. G., Can we trust? In Trust: making and breaking cooperative relations, edited by Diego Gambetta, Oxford: Blackwell, 1988: 213~237.
- Grice, H. P., Logic and conversation. In Cole, P. and Morgan, J. L. (Eds.), Syntax and semantics: Speech acts. New York: Academic Press. 1957.
- Hovland, C. I., Weiss, W., The influence of source credibility on communication effectiveness. *Public Opinion Quarterly*, 1951, 15: 635~650.
- Kapferer, J. N., Rumors. Transaction Books, New Brunswick, USA, 1991.
- Knapp, R. H., A Psychology of Rumor, *Public Opinion Quarterly*, 1944, 8(1): 22~37.
- Mayer, R. C., Davis, J. H., Schoorman, D., An integrative model of organizational trust, *Academy of Management Review*, 1985, 20(3): 709~734.
- Newman, M. E. J., Watts, D. J., Renormalization group analysis of the small-world network model, *Physics Letters A*, 1999a, 263: 341~346.
- Newman, M. E. J., Watts, D. J., Scaling and percolation in the small-world network model, *Phys. Rev. E*, 1999b, 60: 7332~7342.
- Peterson, W., Gist, N., Rumor and public opinion, *American Journal of Sociology*, 1951, 57: 159~167.
- Rotter, J. B., General expectancy for interpersonal trust, *American Psychologist*, 1971, 26: 443~452.
- Shibutani, T., Improvised news: a sociological study of rumor. Indianapolis, Bobbs Merrill. 1966.
- Watts, D. J., Small world. Princeton, NJ: Princeton University Press. 1999.
- Watts, D. J., Strogatz, S., Collective dynamics of “Small-world” Networks, *Nature*, 1998, 393: 440~442.
- Wrightsman, L. S., Interpersonal trust and attitudes toward human nature. In Robinson, J. P., Shaver, P. R., Wrightsman, L. S. (Eds.), Measures of personality and social psychological attitudes. San Diego: Academic Press. 1991: 373~412.
- Zanette, D H, Dynamics of rumor propagation on small-world networks, *Phys. Rev. E*, 2002, 65: 041908.
- 奥尔波特,波斯特曼.刘水平,梁元元,黄鹂译.谣言心理学.辽宁教育出版社,2003.
- 卡普费雷.谣言.郑若麟,边芹译.郑永慧校.上海人民出版社,1991.
- 胡钰.大众传播效果.新华出版社,2000.
- 刘强,方锦清,李永,梁勇.探索小世界特性产生的一种新方法.复杂系统与复杂性科学,2005,2 (2): 13~18.
- 王怡红.人与人的相遇——人际传播.人民出版社,2003.
- 杨波,陈忠,段文奇.基于个体选择的小世界网络结构演化.系统工程,2004,22(12): 1~5.
- 周晓虹.传播的畸变——对SARS传言的一种社会心理分析.社会学研究,2003(6): 43~54.

## 第 14 章

# 基于主体的消费者购买决策及诱饵效应的模拟<sup>①</sup>

消费者行为的研究涉及各个领域,包括心理学、市场营销学、社会学、经济学以及工程学等。传统的消费者行为模型提出了很多影响顾客购买决策和行为的因素,但是它们都没有揭示消费者作出购买决策时的内在心理过程。英国 Exeter 大学的 Tao Zhang 和 David Zhang 构造的基于主体的消费者购买决策模型弥补了上述不足,并通过在人工市场中创建大量的异质消费者主体模拟了一个市场涌现现象——诱饵效应。该模型的核心是构造一个动机函数,这个函数反映了消费者在作出购买决策时重要的影响因素,如消费者的性格特征、消费者之间的交互作用、外部环境的刺激等。该模型研究了消费者在面临市场中同种产品不同品牌的竞争时的决策行为,并在此基础上揭示了消费者内在心理机制。以下为 Tao Zhang 和 David Zhang 这项研究的主要内容:

### 14.1 问题的描述

长期以来,研究者和从业者们一直高度关注消费者作出购买决策的过程 (Burnett and Lundford, 1994)。该过程以及在此基础上消费者们的相互影响作用构成了市场的动态性,例如难以解释的诱饵效应和锁定现象。通过对消费者购买决策以及消费者之间交互行为的研究,我们提高了对这种市场动态性的

<sup>①</sup> 本章译自:Tao Zhang, David Zhang. Agent-based simulation of consumer purchase decision-making and the decoy effect. *Journal of Business Research*, 2007, 60: 912 – 922. 已取得授权, 授权方: ELSEVIER。

理解和认识。消费者决策模式的传统研究方法,例如数据挖掘技术,主要集中于利用静态的基于等式的数学和统计技术,对消费者的人口统计数据和行为数据进行建模。但就消费者购买决策而言,存在三种类型的数据:1)人口统计数据;2)行为数据;3)心理变数数据(Rud, 2001)。心理变数数据表现为态度、意见、生活方式和个人价值观等,它们在消费者购买决策中起着重要作用。研究者和从业者们所面临的挑战是如何利用心理变数数据对消费者购买决策和市场中的动态涌现现象建模。这个问题涉及心理学、经济学、社会学和市场营销学的研究,同时也和基于主体的复杂社会系统的计算机模拟研究的领域方法相一致。因此,人工智能中新的关于主体的概念大大增加了解决这个问题的可能性。“主体”是一个高度抽象的概念,研究者们对“主体”的确切定义以及对“主体”的构成还未达成一致的意见(Poggi, 1999)。关于人工智能的主体,一般认为,任何具有部分如下特征的实体就可以将其看作为一个智能实体:1)有自主行为;2)有自己的世界观;3)能够交流和合作;4)有智能行为;5)有空间移动性(d'Inverno and Luck, 2004)。基于这些特性,主体被广泛应用于工程学、计算机科学、经济学和社会学。基于主体的模拟是一种自下而上的技术,它为解决复杂系统环境中的复杂事务提供了一个强有力的新工具(Grimm et al., 2005)。研究者们已经把主体的思想应用到上述各学科领域中用以模拟机器、软件实体、经济实体、动物、人类以及人类社会。最近5年,应用“主体”的思想开展市场营销研究已经蓬勃发展,例如,CUBES模型(Ben Said et al., 2001),SimStore模型(Casti, 1999)和J-Pop模拟(Makoto, 2000),这些模型的成功应用说明了基于主体的技术是研究市场营销的有效工具。当下,研究人员热衷于利用主体和多主体系统来模拟消费者行为和市场营销的动态性,其目的是优化供应链、评估政府经济政策对商业的影响,通过对消费者心理和消费者群体的社会性的深入理解,提高企业在市场竞争中的营销业绩。

首先是要在经典的心理理性行为理论(Ajzen and Fishbein, 2005)和显意识意愿和动机概念(McClelland, 1987)以及消费者—社会学层面上的交互作用等等这些理论的基础上,建立一个基于主体的消费者购买决策模型。这个模型的核心在于每种产品品牌都能够激发顾客的购买欲望从而转变为购买行为。当面对多种购买选择时,主体能够计算出所有的购买动机并加以比较,从而选出对自己最有利的一种购买选择。本章提出了一种来源于这种基于主体的消费者行为决策模型的算法,用以控制主体的购买行为。作者用一个动机函数的形式提出了这个算法。该研究利用大量人造消费者主体构建了一个虚拟市场,模拟被人们称为诱饵效应的市场涌现现象。这个算法控制了这些主体的购买行为。对诱饵效应的多主体模拟验证了基于主体的消费者购买决策模型的有效性,并提供

了探索和预测动态市场变化的潜在功能。这些市场动态变化包括市场份额的波动,政府经济政策的影响,技术创新以及市场对预期或突发的事件的反应。本章各部分内容如下:

第二部分阐述了目前市场营销学中所使用的消费者购买决策模型。传统的处理消费者购买决策的模型更多地从管理学的角度出发,这些模型虽然提出了很多影响顾客购买决策和行为的因素,但是它们都没有揭示消费者在作出购买决策时的内在心理过程。而引入了动机概念(这是一个衡量消费者购买意愿程度的心理学术语)的基于主体的模型能够弥补上述不足。将该传统模型和新提出的基于主体的购买决策模型相比较,是本文的创新之处。

第三部分详细介绍了基于主体的模型的建立过程。首先,该部分介绍了一些经典的行为心理理论,如理性行为理论、计划行为理论(Ajzen and Fishbein, 2005)、显意识意愿和动机理论(McClelland, 1987),这些都是基于主体的消费者购买决策模型的理论基础。接下来,在消费者心理和现实市场中两种社会交互作用的基础上,详细说明了建立基于主体模型的过程。随后进一步讲述了消费者行为决策这一算法,并将其用于消费者购买行为的控制。作者用一个动机函数的形式提出该算法,并对该形式提出了详细的建议。

第四部分采用多主体模拟的实验方法演示了一种市场营销的涌现现象——诱饵效应。在详细介绍了诱饵效应的概念和研究近况之后,该部分重点关注模拟试验,特别是一些用到的参数和变量、试验的结果以及对实验结果的分析。

最后,第五、六部分指出了论文的创新性、重要性和局限性,并对进一步的研究提出了一些建议。

## 14.2 消费者购买决策的传统理论框架

从20世纪60年代以来,市场营销学领域内出现了大量有关消费者行为方面的著作。Engel, Blackwell, 和 Miniard在1995年提出了被广泛认可的消费者购买决策模型。该模型将消费者购买决策的过程分为五个阶段:1)确认问题;2)收集信息;3)替代品评估;4)购买决策;5)购买后行为。图14.1说明了这个框架。

基于该模型,Engel等在1995年提出了一些影响消费者购买决策的因素。这些因素大体上归结为三类:1)个人因素;2)心理因素;3)社会因素。这个模型提供了一个可操作的市场营销管理工具,而消费者行为理论也成为了市场营销学中最流行的理论。然而迄今为止,对于这些因素在购买决策过程中是如何起

作用的问题,研究者们并没有用很多笔墨加以说明。

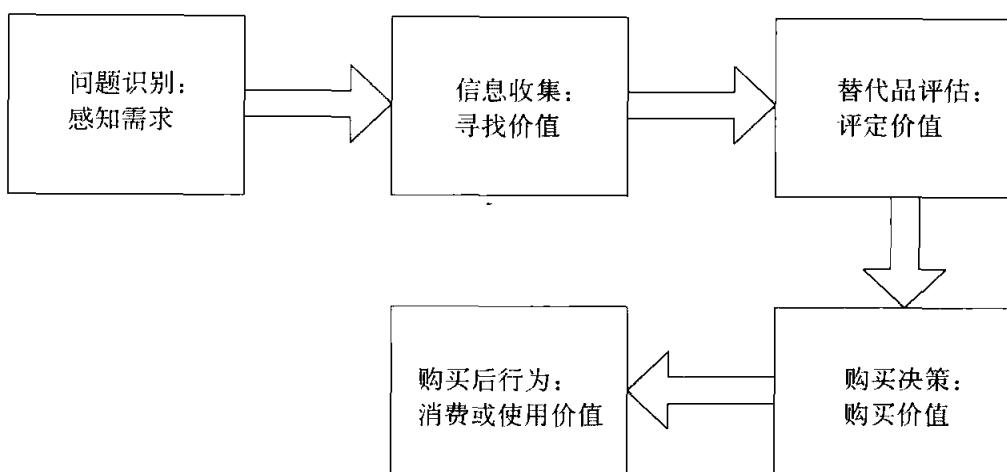


图 14.1 传统理论的消费者购买决策模型

### 14.3 基于主体的消费者购买决策模型

#### 14.3.1 有关行为和决策的心理学理论

决策的形成是一个复杂的认知过程,包括感知、学习以及信息处理。如 Engel 等的模型(图 14.1)所示,绝大多数消费者的购买行为是一种有计划的行为。计划行为理论的核心要素是个体执行某个特定行为的意愿,通常认为意愿能够控制那些影响行为的动机性因素,能够表示人们为了完成某个行为而愿意尝试的问题的难度或者愿意付出的努力程度。通常来说,实施一个行为的意愿越强,人们就越有可能去执行它(Ajzen, 1991, p. 181)。图 14.2 所示的是理性行为模型(Ajzen and Fishbein, 2005),它也指出意愿是实际行为的直接前提,并受众多背景因素的影响。McClelland(1987)把意愿分为两大类:显意识意愿和潜意识意愿,并根据观察实际行为得出结论:动机是由显意识意愿所反映的。

#### 14.3.2 购买动机模型

大部分消费者的购买决策是理性行为。因此,在决定是否购买的过程中,意愿就是指显意识意愿,而且我们可以把动机看成是购买决策的直接决定性因素。发现动机的一种方法是研究促使人们作出合理的决策的影响因素(McFarland, 1974)。根据市场营销学理论,影响消费者在复杂的商业环境中作出购买决定的因素有:商品的价格、质量、品牌、广告效果、家人或朋友的推荐与否,以及之前的购买

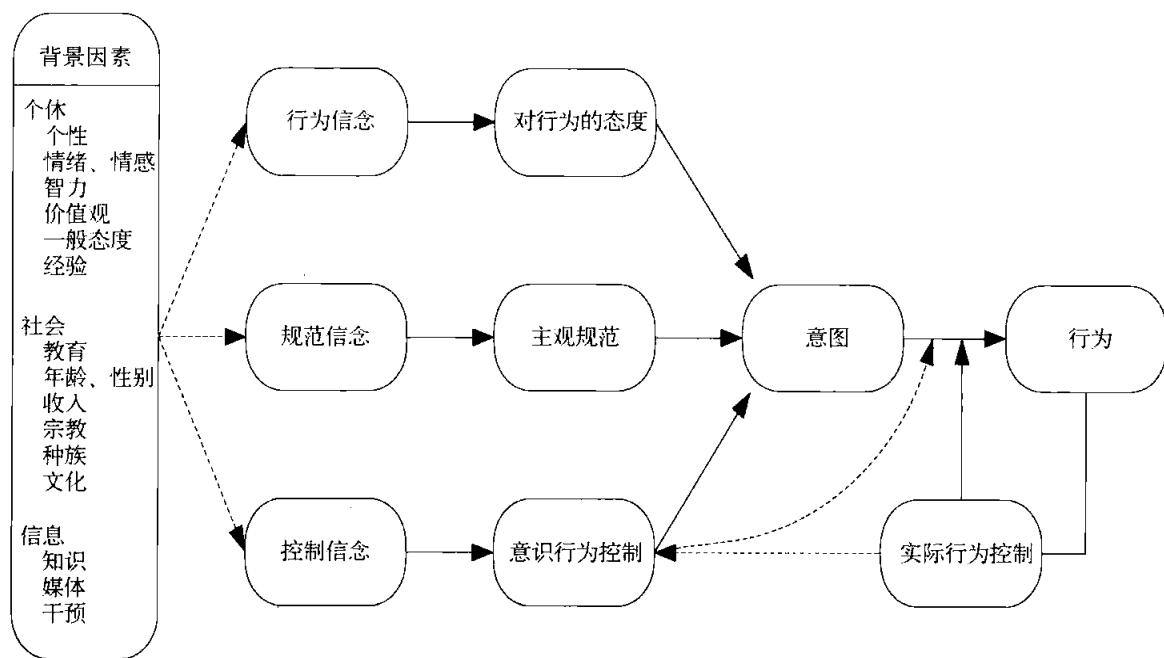


图 14.2 理性行为和计划行为理论(Ajzen and Fishbein, 2005, p194)

经验,而消费者个性特征决定了这些外部因素对他的影响程度。Ajzen(2005)将这种个性特征定义为一种个人的特征,这种特征对很多有关个性的反应普遍具有影响。

在此基础上,消费者购买动机模型包括三部分:外部刺激、个性特征和动机(见图 14.3)

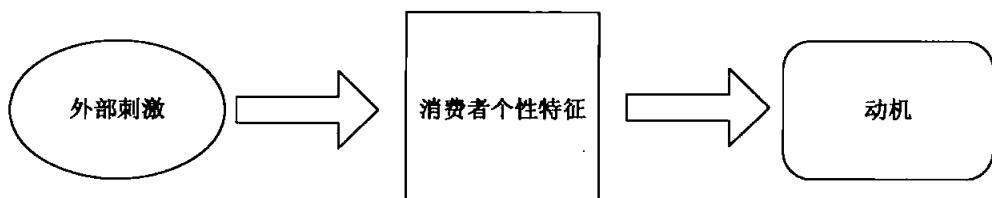


图 14.3 购买动机模型

### 14.3.3 购买决策模型

在构建该模型之前,和理性行为理论与显意识意愿理论一样,我们认为消费者按照理性决策购买商品。从这个视角出发,一个消费者是一个主体,一组人工主体和某种特定产品类别的一些品牌共同构成了人造市场,所有的主体都有各自的个性特征,这些主体在社会经济中的交互作用是基于现实市场中相对应的人或物设定的。如图 14.4 所示,在这个虚拟的市场中,消费者行为取决于每个主体所选择的商品品牌。

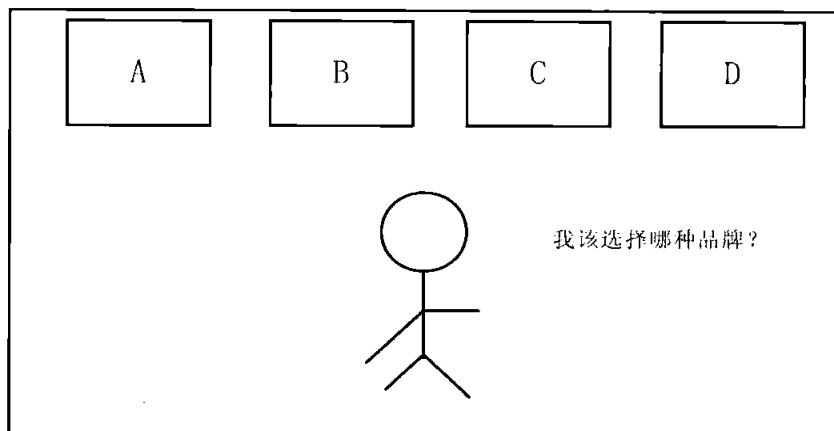


图 14.4 人工市场中的消费者行为

一个主体有两种交互作用。其中一种存在于主体本人和品牌经理之间，这种交互作用存在于各种形式的市场活动中，例如商品的价格、质量、广告以及分销渠道等对主体本人的作用。还有一种交互作用存在于不同种类的消费者主体之间，正如 Ben Said 等在 2001 年指出的，这种交互作用受到家人朋友或意见领袖的推荐与否，或者主体群体中的小道消息等的影响。这两种交互作用如图 14.5 所示。

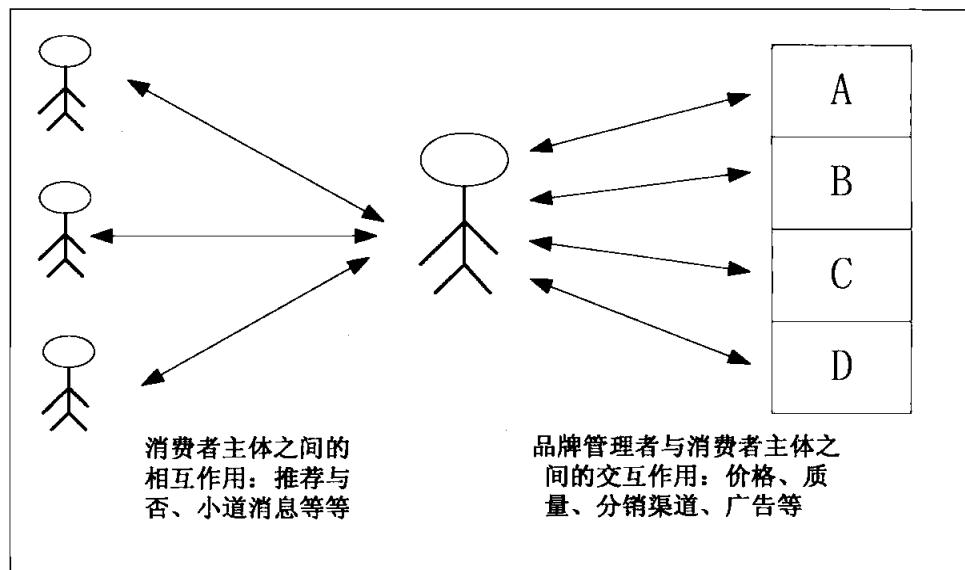


图 14.5 一个主体的两种交互作用

从上述两种交互作用产生的刺激因素对消费者购买商品的动机有着重大影响，但是，正如图 14.3 中的购买动机模型所示，主体的个性特征决定了刺激因素所起作用的强弱。因此，基于这两种交互作用的刺激因素，人们可以表现出他们的个性特征，即对价格、质量的不同的敏感程度、易感性和从众心理。每个刺激因素对

示这个算法的动机函数就如下所示：

$$M_i = PS_i \times P_i + QS_i \times Q_i + sus_i \times ad_i + ft_i \times \inf l_i \quad (14.1)$$

$M_i$  是消费者主体对于品牌  $i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) 的动机,  $QS_i$  是主体对品牌  $i$  的质量敏感度参数,  $Q_i$  代表品牌  $i$  的质量数值,  $sus_i$  是主体对品牌  $i$  的广告量敏感度参数,  $ad_i$  则是品牌  $i$  的广告强度,  $ft_i$  是主体对品牌  $i$  而言, 主体感知到其他消费者的影响而产生的从众心理参数,  $\inf l_i$  则代表其他消费者主体对于该主体的影响力强度,  $PS_i$  是主体对品牌  $i$  的价格敏感度参数,  $P_i$  代表品牌  $i$  的价格。

### 14.3.5 模型校正

为了能够用计算机模拟诱饵效应, 第一步我们需要校准动机函数, 例如计算出详细的公式, 并给参数或系数设置恰当的数值。在函数的第一部分, 主体自身价格敏感参数  $PS_i$  是外部刺激因素的系数。荷兰心理学家 Peter van Westendorp 在 20 世纪 70 年代第一次提出了价格敏感度的概念。价格敏感度是价格弹性分析的一种, 价格弹性是基于消费者对商品或服务的货币价值、实用价值以及情感价值态度的表现。在这个模型中, 价格敏感度是消费者主体个性特征中的一种, 模型引入这个概念来研究何种程度的价格会成为阻碍消费者购买商品动机的因素。由于价格对于购买动机而言肯定是起到消极作用的, 因而价格敏感度一定是个负数, 每个价格  $P_i$  能够根据主体的价格敏感度特质引起一个  $PS_i$  值 ( $i = 1, \dots, N$ )。价格敏感度分布模型(Kim et al., 1995)指出, 一个品牌的实际价格越低, 这个品牌所引起的价格敏感度就越低, 也就是说, 这个品牌对消费者主体购买动机形成的阻碍就越小。Kim 等的研究也说明, 消费者的价格敏感度是这个商品的实际价格  $P_i$  和期望价格  $P_e$  之差的幂函数。见式(14.2)：

$$PS_i = -\alpha^{P_i - P_e} + K \quad (14.2)$$

$\alpha$  是一个大于 1 的参数,  $K$  是一个常数( $K$  的值取决于主体的社会经济属性, 例如百万富翁的价格敏感度值要小于失业者)。 $P_e$  是主体对于这类商品的期望价格, 期望价格  $P_e$  比较难得到, 通常用该类商品的平均价格来替代, 即:

$$Q_e = Q_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i \quad (14.3)$$

$N$  是这种商品的所有品牌数量,  $P_i$  表示第  $i$  种品牌的价格,  $P_{ave}$  就是这种商品所有品牌的平均价格。根据式(14.2)、(14.3), 我们得到

$$PS_i = -\alpha^{P_i - P_{ave}} + K \quad (14.4)$$

和上述动机函数的第一部分一样,质量敏感度  $QS_i$  是外部刺激因素(质量  $Q_i$ )的系数。质量敏感度是一个心理学术语,它用来衡量何种程度的质量能够促使消费者主体购买商品。在质量方面,质量敏感度是一个多维的变量的函数,因为一个产品品牌的质量会涉及很多方面,比如说一部手机可以用来打电话,发文字图片信息,还能用来上网冲浪。假定某产品的第  $i$  种品牌有  $m$  个质量维度,那么这个品牌  $i$  的整体质量就可以用如下公式计算:

$$Q_i = \sum_{j=1}^m W_j Q_{ij}$$

其中的  $Q_{ij}$  是第  $i$  种品牌的第  $j$  个质量维度,而  $W_j$  是用来衡量  $Q_{ij}$  对于主体的重要性,是  $Q_{ij}$  的权重。异常规避消费者心理理论(The outlier avoidance consumer psychological theory)认为,当消费者在选择品牌时,某种品牌的质量与消费者对这种产品质量的期望越是接近,消费者对这种品牌的质量敏感度就越高。用数学公式表示如下:

$$QS_i = \beta^{|Q_i - Q_e|} + L \quad (14.5)$$

$QS_i$  是由第  $i$  种品牌的质量  $Q_e$  决定的主体对于该品牌的质量敏感度参数。 $\beta$  是一个参数且  $0 < \beta < 1$ <sup>①</sup>。 $L$  是一个常量,它的值由主体的社会经济属性所决定,Gardyn(2002)在关于消费者生活方式的研究中发现,上层社会的人群在消费时更加注重商品或服务的质量。 $Q_e$  是主体对于该种产品质量的期望,可以用这种产品所有品牌的平均质量来替换,得到公式如下:

$$Q_e = Q_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i \quad (14.6)$$

其中  $Q_{ave}$  是产品的所有品牌的平均质量。由式(14.5)、(14.6)得出下面的关系式:

$$QS_i = \beta^{|Q_i - Q_{ave}|} + L \quad (14.7)$$

和动机函数的第三和第四部分相一致,主体受到广告和其他消费者的影响,根据各自的个性特征、易感性、从众性等性格特点,经过处理并分别赋给它们(指广告和他人影响)各自的重要性参数。为了突出诱饵效应中的“价格—质量”这一对矛盾,本文对诱饵效应开展的多主体模拟就是建立在一些心理学特性的基础上的,这些心理学特性由人格特征常数、易感性和从众性所产生。从而得到下面两个等式:

<sup>①</sup> 译者注:原文为  $0 > \beta > 1$ , 疑笔误。

$$sus_i = \theta \quad (14.8)$$

$$ft_i = \lambda \quad (14.9)$$

其中  $\theta$  和  $\lambda$  都是常数。

合并式(14.1)、(14.4)、(14.7)—(14.9), 动机函数可以变为下面式子:

$$M_i = (-\alpha^{P_i - P_{ave}} + K) \times P_i + (\beta^{|Q_i - Q_{ave}|} + L) \times Q_i + \theta \times ad_i + \lambda \times \inf l_i$$

于是最终消费者主体的购买选择将由  $\max\{M_1, M_2, M_3, \dots, M_i\}$  这个算法来决定, 能够激发消费者最大购买动机的品牌会成为消费者最终的选择。

## 14.4 诱饵效应的多主体模拟

### 14.4.1 诱饵效应

假设市场中某商品有两种品牌 A 和 B, 消费者需要在这两个品牌中挑选一个。如果 A 品牌的质量比 B 要好但是价格却比 B 高出很多, 消费者就面临了质量和价格的权衡, 但是如果此时有品牌 C(通常称为诱饵)进入市场, 并且 C 的质量比 B 差, 价格也比 B 贵, 则 C 的出现可能会影响消费者的选择。很多实验表明, 尽管没人会选择购买品牌 C(如图 14.7 所示, 品牌 C 有明显的劣势), 但是它的出现却使得消费者的偏好发生了深刻的变化, B 将比 A 更加受欢迎, 市场学研究者将这种效应称为诱饵效应, 这种效应在消费者选择过程中是最顽固的偏好之一。许多产品类别的营销过程, 从巧克力棒、啤酒到电视机, 都采用过这方法(Devetag, 1999)。

在一个由 Huber、Payne 和 Puto(1982)发起的著名的关于诱饵效应的研究实验中, 他们让参与者在一个 25 分钟车程的 5 星级餐馆和另一个只有 5 分钟车程的 3 星级餐馆中选择。主观地说, 5 星级餐馆的优质服务和 3 星级餐馆的较短路程具有等价的优势。此时我们进行两个诱饵试验, 如果我们增加一个 35 分钟车程的 4 星级餐馆作为诱饵以供选择, 则具有 25 分钟车程的 5 星级餐馆将更受欢迎, 而如果诱饵为一个 15 分钟车程的 2 星级餐馆, 那么参与者的偏好转移到了 5 分钟车程的 3 星级餐馆。

诱饵效应阐述了了解消费者心理、了解消费者在购买前如何寻找商品和判断商品质量的重要性(e. g. Doyle et al., 1999), 这些是市场营销学家和心理学家们长期以来关注的焦点。Min(2003)总结了三种类型的诱饵: 不对称的受控诱饵(Heath and Chatterjee, 1995; Huber et al., 1982)、伪诱饵(Highhouse, 1982; Pratkanis and Farquhar, 1992)以及妥协诱饵(Simonson, 1989, 1992)。

$$M_B = (-\alpha^{dP_B} + k) \times P_B + (\beta^{|dQ_B|} + L) \times Q_B + \theta \times ad_B + \lambda \times \inf l_B \quad (14.12)$$

$dP'$  和  $dQ'$  分别表示当引入诱饵 C 之后, 某产品其中一个品牌的价格和该产品所有品牌平均价格之间的差值以及某产品一个品牌的质量和该产品所有品牌的平均质量之间的差值。同样,  $M'_A$  和  $M'_B$  是消费者对品牌 A 和 B 的新的购买动机。 $ad'_A$ ,  $ad'_B$ ,  $\inf l'_A$ ,  $\inf l'_B$ , 分别表示品牌 A 和品牌 B 新的广告强度以及他们对消费者的影响。据此我们也就得到了以下一些等式:

$$\begin{aligned} dP'_A &= P_A - (P_A + P_B + P_C)/3 \\ dP'_B &= P_B - (P_A + P_B + P_C)/3 \\ dQ'_A &= Q_A - (Q_A + Q_B + Q_C)/3 \\ dQ'_B &= Q_B - (Q_A + Q_B + Q_C)/3 \\ M'_A &= (-\alpha^{dP'_A} + k) \times P_A + (\beta^{|dQ'_A|} + L) \times Q_A + \theta \times ad'_A + \lambda \times \inf l'_A \end{aligned} \quad (14.13)$$

$$M'_B = (-\alpha^{dP'_B} + k) \times P_B + (\beta^{|dQ'_B|} + L) \times Q_B + \theta \times ad'_B + \lambda \times \inf l'_B \quad (14.14)$$

用式(14.13)减去式(14.11), 式(14.14)减去式(14.12), 我们得到式(14.15)和(14.16):

$$\begin{aligned} M'_A - M_A &= (\alpha^{dP_A} - \alpha^{dP'_A}) \times P_A + (\beta^{|dQ_A|} - \beta^{|dQ'_A|}) \\ &\quad \times Q_A + (ad'_A - ad_A) \times \theta + (\inf l'_A - \inf l_A) \times \lambda \end{aligned} \quad (14.15)$$

$$\begin{aligned} M'_B - M_B &= (\alpha^{dP_B} - \alpha^{dP'_B}) \times P_B + (\beta^{|dQ_B|} - \beta^{|dQ'_B|}) \\ &\quad \times Q_B + (ad'_B - ad_B) \times \theta + (\inf l'_B - \inf l_B) \times \lambda \end{aligned} \quad (14.16)$$

用式(14.15)减去式(14.16)得到式(14.17):

$$\begin{aligned} M'_A - M'_B &= (\alpha^{dP_A} - \alpha^{dP'_A}) \times P_A - (\alpha^{dP_B} - \alpha^{dP'_B}) \times P_B \\ &\quad + (\beta^{|dQ'_A|} - \beta^{|dQ_A|}) \times Q_A - (\beta^{|dQ'_B|} - \beta^{|dQ_B|}) \times Q_B \\ &\quad + (ad'_A - ad_A - ad'_B + ad_B) \times \theta \\ &\quad + (\inf l'_A - \inf l_A - \inf l'_B + \inf l_B) \times \lambda + e \end{aligned} \quad (14.17)^{\circledR}$$

---

① 译者注: 原文为  $M'_A - M_B = (\alpha^{dP_A} - \alpha^{dP'_A}) \times P_A - (\alpha^{dP_B} - \alpha^{dP'_B}) \times P_B + (\beta^{|dQ'_A|} - \beta^{|dQ_A|}) \times Q_A - (\beta^{|dQ'_B|} - \beta^{|dQ_B|}) \times Q_B + (ad'_A - ad_A - ad'_B + ad_B) \times \theta + (\inf l'_A - \inf l_A - \inf l'_B + \inf l_B) \times \lambda + e$ , 疑误。

假设  $E_1$  是诱饵出现之前的质量价格均衡点,  $E_2$  是诱饵出现之后的质量价格均衡点, 图 14.8 展示了它们之间的关系。

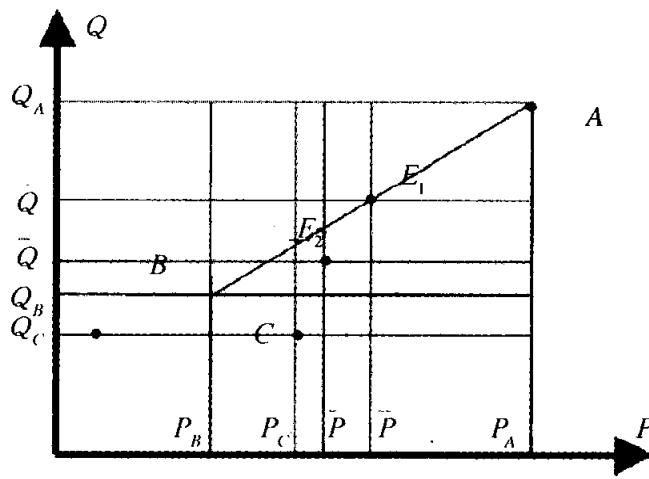


图 14.8 均衡点

我们可以根据指数函数的性质来分析式(14.17)的结果。

如图 14.9 所示,  $\alpha^{dP_A} - \alpha^{dP'_A} > \alpha^{dP_B} - \alpha^{dP'_B} > 0$ ,  $P_A > P_B > 0$ , 因此,

$$(\alpha^{dP_A} - \alpha^{dP'_A}) \times P_A - (\alpha^{dP_B} - \alpha^{dP'_B}) \times P_B > 0.$$

另外, 根据图 14.10,  $\beta^{|dQ'_A|} - \beta^{|dQ_A|} > 0$ ;  $\beta^{|dQ'_B|} - \beta^{|dQ_B|} > 0$

再有  $P_A > 0$ ,  $P_B > 0$ , 得到

$$(\beta^{|dQ'_A|} - \beta^{|dQ_A|}) \times Q_A - (\beta^{|dQ'_B|} - \beta^{|dQ_B|}) \times Q_B > 0$$

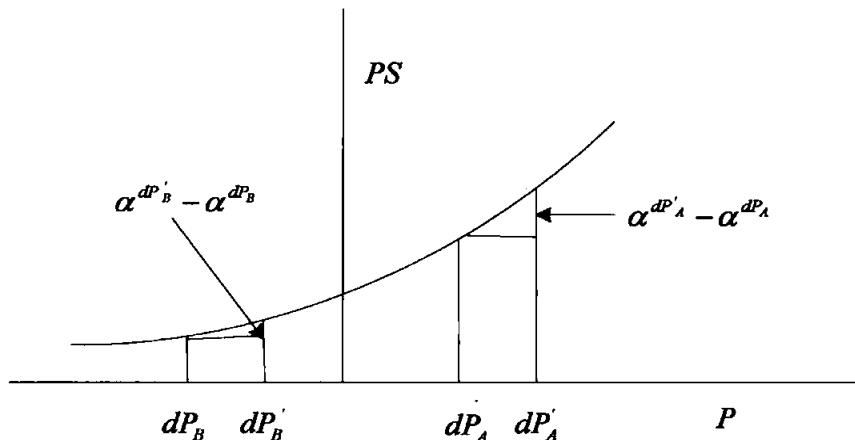


图 14.9 价格敏感度的变化

由于我们主要研究单个消费者的诱饵效应, 模型假设引进诱饵并没有改变  $ad_A$ ,  $ad_B$ ,  $\inf l_A$ ,  $\inf l_B$  这些变量的值(即受诱饵效应影响的消费者并没有对其他消费者施加影响), 因此  $(ad'_A - ad_A - ad'_B + ad_B) \times \theta = 0$ ,  $(\inf l'_A - \inf l_A - \inf l'_B + \inf l_B) \times \lambda = 0$ 。而  $e$  是被假设为接近于 0 的值, 我们可以推导出式

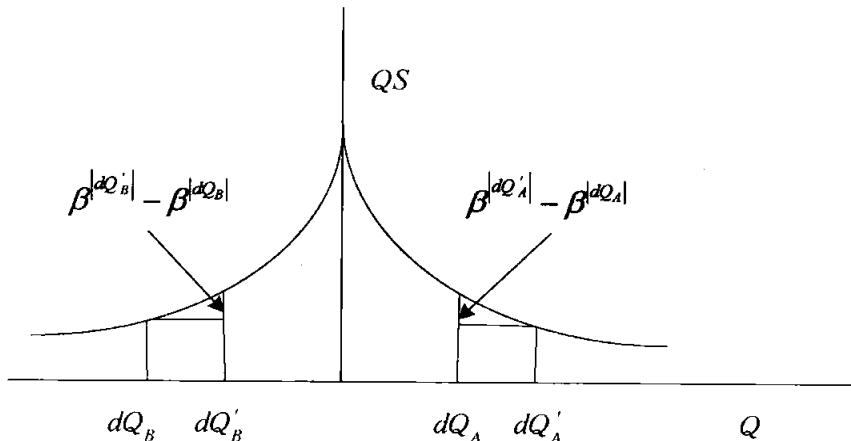


图 14.10 质量敏感度的变化

(14.17)是小于 0 的。即

$$M'_A - M'_B < 0;$$

我们发现,从开始的  $M_A > M_B$  到现在的  $M'_A < M'_B$ ,消费者的偏好从 A 转向 B。

这种用数学方法分析单个消费者偏好的转移和先前核心刊物上的研究很相似,它们都重点关注于单个消费者的心理和选择行为。但是,这种基于等式方程组的静态分析方法存在很多的假设。比如: $e$  是一个很小的数,诱饵在市场上的出现并没有改变  $ad_A$ ,  $ad_B$ ,  $\inf l_A$ ,  $\inf l_B$  的值。而且数学分析方法只能部分地解释诱饵效应。例如当诱饵的价格在平均价格  $\bar{P}$  和  $P_A$  之间,此时,数学分析方法很难判断式(14.17)的结果究竟是大于 0 还是小于 0,从而带来不确定性。事实上,单个消费者偏好的转移不仅是一个独立的个体行为模式,而且在一些乃至更多情况下与消费者群体(或网络)的社会特性紧密相关,例如在现实市场中,诱饵的出现将改变  $ad_A$ ,  $ad_B$ ,  $\inf l_A$ ,  $\inf l_B$  的值。静态的数学模型不能充分有效地揭示这个动态的过程。从宏观观点上来看,诱饵效应是一个动态涌现的市场营销现象,它涉及大量消费者的交互作用和他们偏好的改变。因此,尽管诱饵效应不仅仅是消费者交互作用的产物,但是通过多主体计算机模拟试验,并考虑不同种类的消费者之间的交互作用,我们能够进一步研究诱饵效应。而迄今为止,很少有用计算机模拟方法研究诱饵效应的论文发表,在先前提到的基于主体的购买决策模型的基础上,本文作者用计算机模拟的方法动态地展示了诱饵效应。

### 14.4.3 模拟实验

作者用 NetLogo 3.0.2 对这个动机函数进行编程。为了减少对虚拟市场模拟的复杂性,作者用收入来代表所有社会经济学属性,如年龄,住房状况,以及职业地位等等。这里将消费者的收入取值为 0 到 1000 之间,服从  $\mu = 600$ ,  $\sigma = 75$

的正态分布。主体的质量和价格敏感度取值为 0 到 100 之间，并在主体的收入状况基础上受常数  $K$  与  $L$  的影响。为了达到模型的最优化， $\alpha$  和  $\beta$  的值经过重复的测试和调整。常量  $\theta$  和  $\lambda$  的值在 0 到 100 之间（ $\theta$  和  $\lambda$  表示主体的易感性和从众性这些个性特征，服从  $\mu = 55$ ,  $\sigma = 20$  的正态分布）。

模拟过程将虚拟的消费者主体随机分在不同的区域内，每个消费者主体与离自己  $X$  倍半径范围内的其他主体有交互作用（ $X$  是可调整的）（如图 14.11）。 $X$  越大，该主体受到的交互作用的影响就越大。在每个区域中，广告的强度是随机的，取值从 0 到 100 不等。变量  $influ\_out$  在 0 到 100 之内取值，代表该主体对别的主体的影响大小，服从  $\mu = 30$ ,  $\sigma = 0$  为正态分布。另一个变量  $influ\_in$  表示该主体受到其他有交互作用的主体的影响大小。在模拟的开始，我们假设一个主体在离自己 3 倍半径范围内与其他主体相互作用。该主体的  $influ\_in$  的值等于其他所有主体  $influ\_out$  的值的总和。随着模拟中交互作用的增加，半径的倍数值增加，模型也变得越来越复杂。A 品牌的质量和价格的随机分布在 80 到 100 之间，而 B 则在 0 到 20 之间取值。表 1 列出了这些变量和参数的取值范围和分布情况。

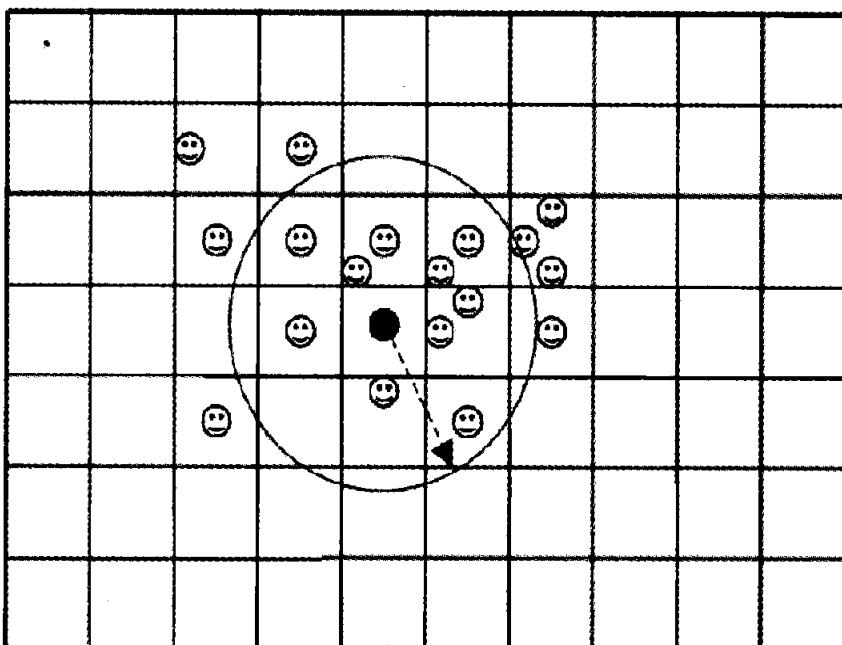


图 14.11 主体的分布和交换作用<sup>①</sup>

<sup>①</sup> 注：每个主体被分在 NetLogo 中一个被称为“瓦片”(patch)的格子中。在模拟中，每个“瓦片”也就是每个主体活动的区域。一个格子中可以没有也可以有多个主体。该模拟假设主体与离自身所在点 3 倍半径范围内的其他主体发生交互作用。半径倍数越大，主体受到的交互作用就越强。若是半径倍数等于视图的 x 边界(screen-edge-x)的值，由于此时每个主体都充分地和人工市场中的其他主体发生交互作用，因而该模拟也就成为一个小世界模拟。广告强度在 0 到 100 之间随机取值。关于瓦片(patches)、海龟(turtles)、半径倍数和视图的 x 边界(screen-edge-x)的详细信息，请参见 NetLogo 3.0.2 的手册。

表 14.1 该模拟中变量和参数的分布及范围

变量/参数	范 围	分 布
<i>Income</i>	0—1000	$\mu = 600, \sigma = 75$ 的随机正态分布
<i>L</i>	0—100	取决于收入
<i>K</i>	—100—0	取决于收入
<i>ad</i>	0—100	随机分布
<i>P<sub>A</sub></i>	80—100	随机分布
<i>Q<sub>A</sub></i>	80—100	随机分布
<i>P<sub>B</sub></i>	0—20	随机分布
<i>Q<sub>B</sub></i>	0—20	随机分布
<i>P<sub>decoy</sub></i>	<i>P<sub>B</sub> &gt; P<sub>decoy</sub> &gt; P<sub>A</sub></i>	随机分布
<i>Q<sub>decoy</sub></i>	<i>Q<sub>decoy</sub> &gt; Q<sub>B</sub></i>	随机分布
inf <i>lu_out</i>	0—100	$\mu = 30, \sigma = 20$ 的随机正态分布
<i>sus<sub>i</sub></i>	0—100	$\mu = 55, \sigma = 20$ 的随机正态分布
<i>ft<sub>i</sub></i>	0—100	$\mu = 30, \sigma = 20$ 的随机正态分布
<i>A</i>	$\alpha > 1$	取决于训练和测试
<i>B</i>	$0 < \beta < 1$ ①	取决于训练和测试

#### 14.4.4 实验结果

模型过程创建了含有 1000 个消费者主体的 1 个虚拟市场, 计算机按照表 14.1 中的设置随机给各主体的参数和变量赋值, 这使得该人工市场具有高度的多样性, 模拟的结果显示, 在诱饵进入市场后诱饵效应明显出现。图 14.12 显示了当模型运作了一个时间步长后的结果。黄色和蓝色的主体分别表示那些选择品牌 B 和品牌 A 的消费者主体。我们发现诱饵在市场上的出现使得 B 比 A 明显更加受到欢迎。

通过检查那些转移偏好的主体的参数后我们发现, 他们购买品牌 A 的动机 ( $M_A$ ) 和购买品牌 B 的动机 ( $M_B$ ) 的差别很小, 因而这些主体更容易受到外部刺激物的诱惑。所以在现实市场上, 这些消费者主体也将轻易地受到产品促销策略的影响。这一发现和用数学方法分析单个消费者偏好的改变中所假设的  $e$  是一个很小的数相一致。而当我们观察那些从不改变自己消费偏好的主体时发现, 这些主体的  $M_A$  和  $M_B$  之间的值相差很多。这些主体是品牌 A 或 B 的忠实拥护者。模拟的另一个成果是发现了最佳诱饵区域(图 14.14 中所示)。观察诱饵的价格和市场占有率之间的关系时, 结果显示当诱饵价格  $P_{decoy}$  在 B 的价格

① 译者注: 原文为  $0 > \beta > 1$ , 疑笔误。

围,定义主体;2)根据主体在现实中对应的实体设计合适的算法,用以控制主体的行为、交互行为和行动;3)校准算法和模型;4)编程和运行模型;5)测试、验证并优化模型;6)观察和分析实验结果。这套流程可以作为复杂系统模拟的一般研究方法。在这6个步骤中,最重要而且最困难的是根据主体在现实中对应的实体设计合适的算法。现实世界中实体的行为和行动可能会非常复杂,如果算法设计得不恰当,主体的保真度会很低,这将大大降低模拟结果的质量。因此,研究人员必须谨慎地设计算法。

## 14.6 建议和进一步探索

在这种类型的模拟实验中,一个争论的焦点是消费者的选择是否理性。MPSI 系统公司的主席和首席执行官 Dr. Bryan D. Gross 在伦敦经济学院发表的一篇演说可能回答了这个问题。当被问到这个问题时,Gross 博士回答道:“我们每个人都是消费者,如果我们的行为是完全随机的,那么,我们将无法预测消费者的行为,一开始我们会看着那些数字然后说只要考虑了商店的地点,消费者们的行为会是随机的,但当我们加入其他的因素并开始将这些多样性的因素进行分类时,我们可以看到,尽管地理位置是一个重要的因素,但是,消费者们做出的却是合理的决定。我们发现消费者们通常较为善变。通过对价格敏感度的分析我们得出,根据对价格弹性的分析我们发现,消费者时而把价格因素当作首要因素,时而不是。这说明我们开始看到不连续点,而不只是看到一段平滑的非线性连续曲线。但这仍是理性选择的结果。”

该模型的一个局限性是它忽略了消费者的自我学习能力。在现实生活中,消费者可以主动地从环境中学习并积累经验。这些经验对购买行为有一定的解释作用。模型的另一个局限是为了降低模型的复杂性,作者用收入代替了主体所有的社会经济属性,包括婚姻状况、住房状况以及职业状况,这在某种程度上降低了主体信息的保真度。

下一步的研究将集中解决这些局限,旨在建立一个保真度更高的基于主体的消费者行为模型,并用多主体系统对模型的系统水平进行改进,并模拟另一个市场涌现现象——锁定现象。

## 参考文献

Ajzen, I., The theory of planned behavior. Org Behav Human Decis Process 1991;50:179~

- 211.
- Ajzen, I., Fishbein, M., The influence of attitudes on behavior. In: Albarracin D, B. Johnson B, Zanna M, editors. *The handbook of attitudes*. Mahwah, NJ: Erlbaum; 2005. pp. 173~221.
- Ben Said, L., Drogoul, A., Bouron T. Multi-agent based simulation of consumer behavior: towards a new marketing approach; 2001. MODSIM.
- Burnett, M. S., Lundford, D. A., Conceptualizing guilt in the consumer decisionmaking process. *J Consum Mark* 1994;11(3):33~43.
- Casti J., Firm forecast. *New Sci* 1999;24:37~40 (April).
- Choplin, J. M., Hummel J. E., Comparison-induced decoy effects. *Mem Cogn* 2005;33(2): 332~343.
- Devetag, M. G., From utilities to mental models: a critical survey on decision rules and cognition in consumer choice. *Ind Corp Change* 1999;8(2):289~351.
- d'Inverno, M., Luck, M., Understanding agent system. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag; 2004.
- Doyle, J., O'Connor, D., Reynolds, G., Bottomley, P., The robustness of the asymmetrically dominated effect: buying frames, phantom alternatives, and in-store purchases. *Psychol Mark* 1999;16:225~243.
- Engel, J. F., Blackwell, R. D., Miniard, P. W., *Consumer Behavior*. 8th ed. Philadelphia: The Dryden Press; 1995.
- Gardyn, R., Oh, the good life. *Am Demogr*, November 2002;24(10):30~5.
- Grimm, V., Revila, E., Berger, U., Jeltsch, F., Mooij, W. M., Railsback, S. F., et al. Patternoriented modelling of agent-based complex system: lessons from ecology. *Science* 2005;310:987~991.
- Gross, B. D., Complexity science and 21st century issue. Presentation at LSE, 2004;2004.
- Heath, T. B., Chatterjee, S., Asymmetric decoy effects on lower-quality versus higher-quality brands: meta-analytic and experimental evidence. *J Consum Res* 1995; 22: 411~420.
- Highhouse, S., Context-dependent selection: the effects of decoy and phantom job candidates. *Org Behav Human Decis Process* 1982;65:68~76.
- Huber, J., Payne, J. W., Puto, C., Adding asymmetrically dominated alternatives: violations of regularity and the similarity hypothesis. *J Consum Res* 1982;9:90~8.
- Kim, B., Blattberg, R. C., Rossi, P. E., Modeling the distribution of price sensitivity and implications for optimal retail pricing. *J Bus Econ Stat* 1995;13(3):291~303.
- Kivetz, R., Netzer, O., Srinivasan, V., Extending compromise effect models to complex buying situations and other context effects. *J Mark Res* 2004;41:262~8.
- Makoto, M., Forecasting hits in the J-Pop market: a practical application of multiagent simulation in Japan. SFI business network: tutorial on complex and agent based modeling; 2000.
- McClelland, D. C., *Human motivation*. Cambridge: Cambridge University Press; 1987.
- McFarland, D. J., *Motivational control systems analysis*. London: Academic Press

- Inc; 1974.
- Min, K. S., Consumer response to product unavailability. Unpublished PhD Thesis, the Ohio State University; 2003.
- Park, J., Kim, J., The effects of decoys on preference reversals: the role of perspective and providing justification. *J Consum Psychol* 2005;15(2):94~107.
- Patel, S., Schlijper, A., Models of consumer behavior. Report on ESGI 2004;2004.
- Poggi, A., Developing real applications with agent technologies. *J Syst Integr* 1999; 9(4):311~328.
- Pratkanis, A. R., Farquhar, P. H., A brief history of research on phantom alternatives: evidence for seven empirical generalizations about phantoms. *Basic Appl Soc Psychol* 1992;13(1):103~122.
- Quesada, J., Chater, N., Otto, P., An explanation of decoy effects without assuming numerical attributes. Proceedings of the 27th annual meeting of the Cognitive Science Society; 2005.
- Rud, O. P., Data mining cookbook: modeling data for marketing, risk, and customer relationship management. New York: John Wiley & Sons, Inc; 2001.
- Simonson, I., Choice based on reasons: the case of attraction and compromise effects. *J Consum Res* 1989;16:158~174.
- Simonson, I., Tversky, A., Choice in context: tradeoff contrast and extremeness aversion. *J Mark Res* 1992;29:281~295.
- Tversky, A., Kahneman, D., Loss aversion in riskless choice: a reference dependent model. *Q J Econ* 1991;1039~61 (November 1991).
- Wedell, D. H., Pettibone, J. C., Using judgments to understand decoy effects in choice. *Org Behav Human Decis Process* 1996;24:49~65.

# 第 15 章

## 森林地区人与自然的动力学模型 ——跨地区和跨文化的整合<sup>①</sup>

人类—自然具有多维度的关联性：基本需求的满足，心理文化的相关性和对自然资源利用的调节，通过对此进行简化和抽象，美国和委内瑞拉的学者 Acevedo 和 Callicot 等人整合了对跨区域和跨文化的人类—自然耦合系统的研究。对于价值驱动的人为环境变化和反应，他们给出了着眼局部的和总体性的认识。有两个问题引导着这个研究：哪些核心的价值观驱使利益相关者作出土地使用的决策从而使得土地覆盖发生变化？这些价值观如何影响决策和政策的制定，并使得人类和自然系统能够在同一个地方共存？为了探索这些问题，他们对四个研究地区建立了模拟模型：两个在美国的得克萨斯州，另外两个在委内瑞拉。虽然它们在植被和土地利用上有着细微的差别，但全都包含保护区。在得克萨斯地区，相对富裕的个人正合法地将森林转化为居住地、商业和工业用地。而在委内瑞拉，无土地的移民将森林转化为维持生计的耕地都是违法的。当代的建模技术能够促进对利益相关者和生态系统动力的模拟，以揭示涌现的模式。这种人类—自然耦合系统在目前被认为是生态复杂性的一种形式。他们的模型框架具有足够的灵活性来适应每个研究地区，且能够分别抓住自然和人为的土地利用变化和利益相关者的反应的本质特点。他们用多主体模型来模拟人类利益相关者之间的相互作用，使这些主体作用在森林景观模型上，并接受这些作用对生态居住地和水文效应的反馈。这个多主体模型对委内瑞拉地区使用正规的

<sup>①</sup> 文章译自：Acevedo Miguel F., Callicott J. Baird, Monticino Michael, Lyons Donald, Palomino Jenny, Rosales Judith, Delgado Luz, Ablan Magdiel, Davila Jacinto, Tonella Giorgio, Ramírez Hirmaz, Vilanova Emilio. Models of natural and human dynamics in forest landscapes: Cross-site and cross-cultural synthesis. Geoforum, 2008, 39: 846–866. 已取得授权，授权方：ELSEVIER。

逻辑方法,而对得克萨斯地区使用基于多属性效用函数的决策分析方法,两者虽在形式和侧重点上不太一样,但实质是相同的。他们的自然系统模型是通用的,可以根据具体的地区作出修改。所有研究地区都使用相似的树生长和斑块转变(Patch Transitions)模型,但他们对每个地区的物种和地形条件都给定了它们对环境变量的不同反应。下面为这篇论文的主要内容:

## 15.1 背景介绍

人类自古以来就有的一些行为,如砍伐森林以便围林造田或是修建道路及住房,在20世纪里已成为全球性的行动。这些行为持续且快速地增多使人们开始意识到土地利用/土地覆盖的变化是21世纪全球环境问题的一个主要挑战(Houghton, 1994; Lambin et al., 2001; Lepers et al., 2005; Moran and Ostrom, 2005; Ojima et al., 1994; Walker, 2004; Watson et al., 2000)。社会科学主要研究人类的发展模式,自然科学则主要研究生态系统的演变以及生物地球化学过程。但是最近,社会科学家们却发现了生态对人类行为的影响(Evans and Moran, 2002; Kellert, 1997),而生态学者则认识到土地利用史作为生态意识基础的重要性(e. g., Foster et al., 1998; Harding et al., 1998)。人与自然的交互作用可产生复杂骤变的土地利用/土地覆盖变化现象,这种情形可以用人类—自然耦合系统模型进行很好的描述。这类耦合模型不仅需要解释人类利益相关者和自然环境之间的交互作用及人类利益相关者之间的交互作用,同时也要解释人们觉察到因干预环境而造成环境变化时的反应。

人类—自然耦合系统的研究在几个维度上与地理学研究是相一致的。它有助于传达 Openshaw 先生提出的一种主张——在人类地理学领域内,针对同时包含数字数据和符号数据的问题,形成一种可以找出其计算解的方法论(Parker et al., 2003)。同时它也可以看作是一张人类和自然地理沟通之桥的蓝图(见图 15.1)。此外,人类对于环境的态度和价值观与地理和哲学上的地方观念是息息相关的(Buttimer and Seamon, 1980; Callicott et al., 2006)。许多地理学者划分了地点、空间和它们的不同嵌套等级,这种区分和空间模型中所采用的空间等级划分相似(Sheppard and McMaster, 2004; Tuan, 1977)。最近,对这些概念发展历史的讨论说明了它们与人类环境价值观的关系以及人类与自然的相关度和相互作用能多大程度上根植于地方观念(Agnew and Smith, 2002; Casey, 1993, 1997; Entrikin, 1991; Malpas, 1999, 2001; Schein, 1997; Snyder, 1995; Smith, 2001; Tuan, 1973)。地方不只是被简单

地看作是区域内的一个点,而且包含动态联结网络,以及社会成员之间的相互作用及地方之间的相互依存(Massey, 1999; Oakes, 1997)。当地方概念着眼于社会层面时,它被认为是人类与非人类交互作用的地理学表述(Oakes, 1997)。同时,这种交互作用在空间上的延展将一个地方及其中的人与另一个地方和其中的人联系了起来。

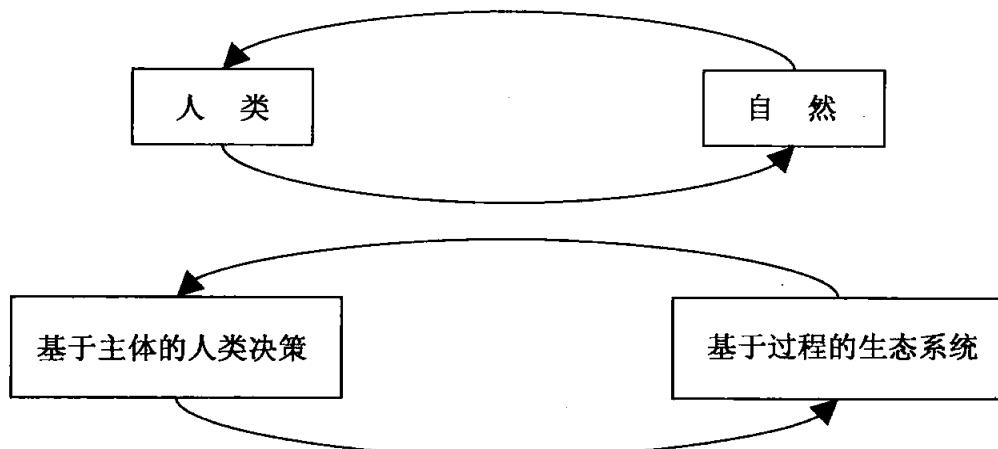


图 15.1 人类—自然耦合系统(上图)相互反馈(下图)模型方法

这种人与自然环境的相互关系,尤其是基于长期历史的和史前的观点,多年来已经成为地理学家和其他学者系统研究的对象(e. g., Gomez-Pompa and Kaus, 1990, 1992; Gragson, 1998; Kasperson et al., 1995; Redman, 1992, 1999; Sauer, 1927; Turner, 1976; Turner et al., 1990a; Vidal de la Blache, 1926)。虽然人与环境的交互作用不是一个新的研究领域,但新近发展起来的数学和计算技术在很大程度上使我们对这些交互作用的理解更深入。

当代的多主体模型技术促进了对人类系统行为的模拟。这些模型抓住了导致土地利用变化的本质特征:人类决策过程和利益相关者价值观,并且通过基于过程的模型模拟,这些模型还抓住了此变化对自然系统的影响(参见图 15.1 的下图)。另外,计算能力的提高允许人们对人类自然耦合系统的涌现模式(现被认为是生物复杂性的一种形式)进行更为深入的分析。生物复杂性的研究有几个独特的方面:时空维度的多级性、生物组织的多层次性、相互作用的反馈性以及行为的非线性(Anderson, 2003; Cottingham, 2002; Covich, 2000; Dybas, 2001; Michener et al., 2001; Pickett et al., 2005)。

多主体模型已被证实是研究人类—自然耦合系统及分析综合的环境和生态系统政策的有效工具(Bousquet and Le Page, 2004; Hare and Deadman, 2004; Parker and Meretsky, 2004)。使用基于主体的模型对人类决策和由此引发的土地覆盖变化进行模拟的方法已经得到了快速的发展(Deadman et al., 2004;

Evans et al., 2001; Hoffman et al., 2002; Ligtenberg et al., 2001; Parker et al., 2003; Schneider and Pontius, 2001)。多主体模型已被用来分析绿化带对延迟发展的有效性(Brown et al., 2004),郊区的景观变化(Loibl and Toetzer, 2003),以及热带森林的砍伐现象(Huigen, 2002; Lim et al., 2002; Manson, 2002)。特别是在对自然资源的需求不断增长使得土地利用加速变化的地区,这类研究是相当有效的。这类模型的特点包括:各模型之间以及模型与地理空间信息技术之间具有丰富的联系(Arima et al., 2005; Bhaduri et al., 2000; Mas et al., 2004);社会经济和人口因素的重要性(Walker et al., 2002; Walker, 2003);人为因素的精确考量(Aspinall, 2004);对各种导致土地利用变化从而影响土地覆盖变化的因素进行分别模拟的能力;利益相关者与潜在的管理实践的关系(Pahl-Wostl, 2004, 2005);以及多种空间尺度的整合(Evans and Kelley, 2004)。

同时,景观生态学还认为当人类是积极参与到景观中的主体或者实体时,生态过程和土地覆盖动态变化过程中的空间格局是相当重要的(e. g., Brandt et al., 2002; Lundberg, 2002; Zube, 1987)。当考虑景观破碎度和生物多样性保护时,这一点尤其重要(Metzger, 2000)。在识别主体在景观生态学中的重要性时,Haber(2004)指出在研究过程中,我们既要考虑人类在物质层面上扮演的角色,也要考虑其在精神层面上扮演的角色,他通过作用和反作用的循环来说明“人类—景观的相互作用”。

人类的价值观决定着某一地理范围内的利益相关者的决策(Lambin et al., 2001)。由于建立模型的需要,这些价值观应以一个函数形式进行量化表示来代表影响利益相关者行为的竞争因素。传统方式是通过货币尺度来衡量的,这种方式的缺点在于它降低了问题的复杂性,把具有多元特点的人类价值观转变成了单一的经济价值观念(Hargrove, 2000; Norton, 1991; Rolston, 1985)。虽然经济学家们认为货币是唯一用来描述其他不可测量的价值观的一种尺度,否则价值观将无法比较(Freeman, 1993)。然而,当人们被问及愿意为一些“无价之宝”,如:文化标志、自然美景、可信赖的生态服务系统支付何种价格时,他们常常会感觉到无所适从,有时甚至会陷入“抗议出价”的状态(Sagoff, 1988)。我们的研究动机之一就是在人类—自然耦合系统多主体模型中找到另一种可以量化价值观的方法。在下文中,我们将对这种方法进行更为详细的描述。

本章上面提出了一个具有一定地理学研究意义的问题:土地利用和由此引发的土地覆盖是否能够在长期中保持持续。进一步说,我们提出两个问题:什么是关键的利益相关者价值观,并且这些价值观能够驱使利益相关者做出使用土地的决定,从而使得在同一个地方正式(法律的)和非正式(文化的)两种不同的

管理体制下土地覆盖发生变化,以及如何利用这些价值观知识来引导决策和政策的制定,使得人类和自然系统能够在同一个地区共存。

这篇论文有双重目的。首先,我们给出人类—自然耦合系统的综合概念,这一系统可以潜在地说明我们前面提出的地理问题。为了达到这个目的,我们着眼于四个研究地区,两个在美国,另外两个在委内瑞拉(见图 15.2),在那里,人类开发自然资源以获得经济增长与保存景观的自然特征之间存在着激烈的矛盾。其次,我们将描述其中的两个地区(一个在美国,一个在委内瑞拉)的模型来探索这些问题。我们的模型框架具有足够的灵活性来适应每个研究地区,且能够分别抓住自然和人为土地利用/土地覆盖变化以及利益相关者反应的本质特征。这个框架不仅能对不同的环境价值观如何使每个地区具有独特的土地利用变化提供一致的分析,同时还能对整体进行概括。我们用多主体模型来模拟人类利益相关者之间的相互作用,它以土地覆盖变化的形式作用在森林景观模型上;多主体模型通过森林景观模型中的生态居住标准和水文反应得到这些行为效果的反馈。利益相关者和政策制定者能够看到目前土地使用决策对他们居住地的潜在影响,进而重新考虑这些决策使之更好地满足他们的优先价值。

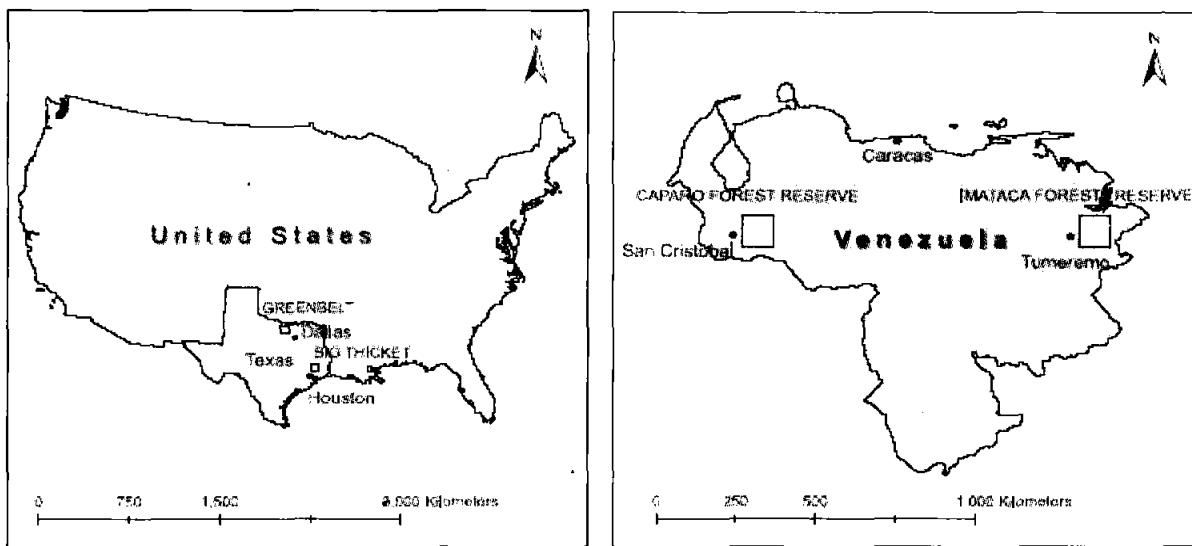


图 15.2 两个位于美国得克萨斯的研究地区和两个位于委内瑞拉的研究地区

我们的人类—自然耦合系统模型能够抓住决策制定过程和利益相关者价值观的本质特点,正是这个价值观导致我们的研究地区的土地使用发生变化。这个模型的目的是通过揭示土地覆盖趋势来阐述前面提出的问题,更重要的是为了给政策制定者提供土地利用变化对利益相关者行为的敏感度,包括有着不同价值观的利益相关者的空间分布。人类地理领域最感兴趣的部分是我们用何种

方法对价值观进行定量描述。在得克萨斯区域模型中,我们在利用多属性效用函数的统计决策分析框架下清晰地表示了利益相关者的价值观(e.g. Keeney and Raiffa, 1993)。这个效用函数解析了当主体对当地政府和文化语境中的经济机会作出反应时利益相关者决策中的价值权衡和不确定性。例如,当地主考虑出售还是持有土地时,他们会权衡直接出售土地得到的附加价值与他们居住地的生物文化的完整性。模型中的主体会通过多属性效用函数来评估他们从每种活动中能够获得的价值,并从中选择那些具有最高期望效用的行动。与纯粹的经济标准相比,我们认为通过这种方式获得价值更为现实,更能抓住促使人们做出土地使用决策的价值观的本质。

我们建立的是动态模型,不仅考虑土地利用/土地覆盖的变化,同时考虑导致这种变化的利益相关者价值观。主体会根据其他主体的决策、他们所在地区的正式或非正式的管理结构的变化、他们所“觉察”的土地使用/土地覆盖变化来改变自己的特征,这反映了现实中的利益相关者价值观的演变过程。比如说,由于渗水地面区域的减少而导致当地洪涝灾害增加,德克萨斯模型中的房东主体对这一土地利用变化的反应很可能是调整自己的价值观结构,他们将会更加关注环境变化对发展的影响,而不是关注发展对自己房产价值的影响。房东主体也可能通过投票来影响政府主体的变动,他们会选择一个更加注重发展政策对环境影响的政府,而不是一个只关注商业关系和最大化税基的政府。这些模型并未能精确地模拟价值观的大规模文化转向,尽管如此,这个模型具有足够的灵活性来模仿价值动态。目前,我们偏向于在认识论上采用保守的方法并集中对价值观的转变进行研究,这些转变可以从时空上对这些本地条件作出反应,因为关于未来大规模的社会价值观转变这一假设是通过推理得出的,并且相信它们会发生的信念常常受愿望和启示思维的影响。

在下面的章节中,我们将对研究区域进行简短的描述,并对多维度的人类—自然耦合系统的关联性进行概念整合。为此,我们将描述模型的方法论,样本的模拟运行结果,以及评论涌现模式。我们将模型进行比较,这有利于概念整合过程。我们指出用人类—自然耦合系统研究生物复杂性的方法如何能够通过一系列的简化和抽象得到跨区域和跨文化的整合,从而得到能够应用于遭受人类干扰的森林景观的一般方法。这种整合是通过结合模型结果和基于地方意识的环境态度以及各个利益相关者的价值观来揭示人类,地方和环境的关系。这同样有利于利益相关者及政策制定者作出谨慎的决策。我们所研究的每个地区不仅凭借它的规模与其所在空间发生联系,同时还通过自然和人类系统的相互作用来形成自身的特点。

之交,那时候人们热心于采伐树木和开采石油。大丛林是如此的荒凉和不宜居住,因此一开始,那里只是逃跑的奴隶的避难所,而后在内战时期成为逃避征兵和拒服兵役的人们的藏身地。到了 20 世纪,罪犯和逃亡者也相继前往——尽管树木和石油工业已经减少了(Cozine, 2004)。

绿地廊道研究地区是得克萨斯中北部的一个区域,它位于丹敦的城郊和农业矩形区,在三一河厄尔姆岔口的一个冲积平原上并处于两个水库之间。它的保护区包括 20 平方千米的混交林和大草原生物地理区,它由得克萨斯公园和野生生物部门管理。绿地廊道历史上被低地阔叶林和山地橡树草原覆盖,而如今是成片状的,从开阔的草原区域演变为后来的高森林代表。这个区域的人类史和大丛林的历史一样不浪漫,但它的遗迹比大丛林地区遭到更激烈的殖民行为的破坏抹杀。开始是由农民和牧民,然后是由郊区居民和住在城市远郊的居民来定居(Bates, 1976)。历史上的美国印第安人延续了登上平原的传统,郡和首都的名称是由为美国殖民地服务的“印第安战士”得来的(Allen, 190)。目前这个地区快速的居民增加和商业增长出现在大达拉斯三角形城市群的顶点处。丹敦县的人数从 1990 年的 273575 人增长到 2004 年的 531450 人。开发的土地比例从 1995 年的 13% 翻倍到 2000 年的 26.8%。2000 年到 2005 年的五年时间,住房单元的增长幅度超过 26%(NTCOG, 2005)。在这个研究地区得到的经验对目前正在建立的东南得克萨斯的大丛林模型具有指导作用。

### 15.2.3 委内瑞拉区域:卡帕罗森林保护区和伊马塔加山森林保护区

卡帕罗森林保护区覆盖了大约 1800 平方千米的委内瑞拉西部的冲积平原,这个冲积平原由来自安第斯山的沉淀物形成。这个森林处于热带干旱森林和热带湿润森林的过渡地带。卡帕罗是在 1961 年为了支持采运行业的发展而建的,同时保留了委内瑞拉另一个更富产出的森林。它被分为三个管理单元(见图 15.4)。我们的研究主要集中在第一单元(大约 530 平方千米),其中包括被用作教育和研究基地的试点。目前,保留地只有 70 平方千米的森林,全部位于该试点。不恰当的森林管理政策、不同政体和政策间的矛盾、贫穷、对耕地的需求以及政治因素都导致了卡帕罗森林的恶化(Ablan et al., 2003)。

根据 Rojas 的描述,卡帕罗区域位于委内瑞拉西部平原的森林保护区经历了典型的森林耕地化的过程。在“第一阶段”或者说“初始周期”中,一个居民在保护区中拥有一块土地,并从事轮歇农业(刀耕火种)。他们可能定居在荒地(先前开垦过的森林或未被占领的土地)也可能定居在林地,之后这林地将会被居民清理出来。典型的情况是,在 5 年内土壤将耗竭,收成将不足以维持居民和他们

家人的生活。一些居民会试图通过开垦邻地来扩张他们的农地,尽管如此,5年以后,他们又将面临同样的困境。

“第二个阶段”或者说是“土地市场周期”是播种牧草来防止土壤侵蚀,然后将这些长出新草的土地出售给较大的地主用来牧牛的时期。在售出这些草地之后居民可以从最近的居民那买进土地试图从农业转化为牧业,或者开始一个新的入侵“初始周期”,或者为买他们草地的地主打工。这个阶段包括两个显著的正反馈过程:(1)在耕种改革法律之下,清理地的所有权授予居民,然后以一个很低的价格转让给政客,军官和农场主,(2)然后他们利用其政治影响力来支撑起初的移民周期(Centeno, 1997)。结果是,在第二阶段小规模的牧场开始取代刀耕火种成为主要的土地利用方式。

第三阶段“牧牛场联盟”导致牧牛成为先前林地主要的利用方式。大型农场主从居民和小型农场主那里买进土地所有权并加强草地种植用以放牧牛群,这一般是在一个股份公司的赞助之下完成。这个过程以土地所有权的集中为特点,导致更多的人没有土地,而这些无地的人们只能重新开始最初的移民周期或者转到大牧场打工为生(Sánchez, 1989)。

关于伊马塔加山的研究主要集中在圭亚那地盾区的 Botanamo 河上游一个大约 2500 平方千米的地区,圭亚那地盾主要在受联邦保护的伊马塔加山森林保护区(图 15.4)。在这个大的保护区,伴随着空间降水梯度的变化,在林区内从高到低分布着常绿阔叶林,半落叶林(也就是一种常绿和落叶品种的混合)以及分散的无树大草原(CVG TECMIN, 1987)。常绿阔叶林的冠层高度一般超过 25 米。伊马塔加山被认为是南美和委内瑞拉最有价值的保护区之一。它独具特色,不仅盛产极具商业价值的各类木材和丰富的遗传资源,而且总体物种丰富并具有各种各样的脆弱生态系统(Miranda et al., 1998; UCV-MARNR, 2002)。伊马塔加山居住着五个民族:Warao, Arawako, Karin~a, Akawaio and Pemón Indians(Mansutti et al., 2000)。他们的生活方式和文化取决于自然环境(Mansutti et al., 2000)。在保护区边缘的 Tumeremo 镇附近,由于农业和牧业的发展,西部森林已经遭到破坏。直到 17 世纪中叶,这个地方只有 kamaracoto 土著居民,正如居住在伊马塔加山连续森林的土著人一直做的那样,他们从事着刀耕火种农业。18 世纪后期,西班牙人在 Tumeremo 成立了一个代表团,他们选择此处是因为这个地方最适合牧牛,这样便开始了森林破碎化。到 19 世纪,牧牛公地在以 Tumeremo 为中心半径为 5 千米的范围内。20 世纪上半叶这个地区开始提取胶乳和挖掘金矿,20 世纪后半叶,这个地区第一个木材采伐许可证被批准(Callicott et al., in press)。

目前,Botanamo 研究地区 83% 被森林覆盖,其中有 56% 被指定为伊马塔加

山保护区的林业用地,大约 12% 为大草原和牛牧场。剩下的 5% 被用于农业,住房和城区。移民加剧了森林转换。采伐木材、挖掘矿产和牧业是最有利可图的土地利用方式,农业仍然是小规模的生计活动,并且还没导致具有卡帕罗特色的第三阶段过程,那是因为土著居民在部落土地上大规模从事农业。采伐木材和对金矿、钻石和别的矿物的挖掘的增加是对这个区域最大的威胁。

### 15.3 人类—自然耦合系统的概念整合

为了理解和指导如何在土地利用/土地覆盖的变化与保存景观的自然特征之间达到平衡,我们有必要先对人类系统和自然系统的接合范围有个大概的分析。我们假定人类—自然耦合系统的一个重要特征就是人类系统和自然系统之间的关联性。我们鉴别了三方面的关联性:人类基本物质需求的满足、心理文化的关联以及人类对使用自然资源的调控。最后一种相关性可进一步分为两种形式:正式的和非正式的。我们通过图 15.5 和图 15.6 来说明这些概念。

图 15.5 中的横轴代表了人类基本物质需求的满足程度,也就是当地自然系统在多大程度上提供给利益相关者食物、衣服、住房、医药等等。图 15.5 中的纵轴代表了心理和文化的关联度——利益相关者在当地的自然系统中的投资在多大程度上是由于对文化的认可、象征意义和宗教的实践等等。两种调控形式是强制的正式(法律)治理机制(图 15.6 中的横轴)和文化传统、习俗、期望等非正式治理机制(图 15.6 中的纵轴)。我们把四个研究区域大致地列入图中。未来的研究中我们有必要更详尽地描述这些关系。

委内瑞拉的两个区域的利益相关者直接从当地自然系统中获得的物质资源需要多于得克萨斯州的利益相关者。尽管如此,卡帕罗的居民可以在国内或国际市场上购买商品来补给生活物资。相比之下,伊马塔加山当地的利益相关者更多地从当地自然系统中获取物资。得克萨斯州的两个区域在这个方面也不具有相同的相关性。大丛林与绿地长廊相比,前者更多在农村,经济不如后者发达,很多的利益相关者在农场、牧场劳作,打鱼捕猎,抽取饮用水和收获木材。绿地长廊的很多利益相关者有着更细的分工,他们可能经营着消遣性农场或牧场,通过国际市场来满足自己几乎所有的基本物质需求,尽管有些人也通过种植和畜牧来生产有机蔬菜和肉类。因此,绿地长廊利益相关者的在这方面的相关性就不如大丛林了。

在这 4 个研究区域中,伊马塔加山地区和卡帕罗地区的利益相关者在心理文化方面分别有着最高和最低的相关度,在卡帕罗,无地的居民、牧场主和伐木

工人大多是外来人员,他们几乎不会对当地的自然景观赋予个人认同、文化认同或精神寄托。在得克萨斯,大体上来说,自然景观被赋予了强烈的个人认同和文化认同。的确,得克萨斯的人类系统模型中的主体倾向于一个价值观,即持有土地并不售出它的传统价值,这点我们将在后面详尽描述。但是,我们提出大丛林在心理文化方面的相关度要高于绿地长廊,部分原因是它有着很长的居民在自然中寻找避难所的历史,随着大丛林的发展和更多大都市的移民迁入,平均而言,大丛林的利益相关者在这方面的关联度可能会低于绿地长廊(图 15.5)。

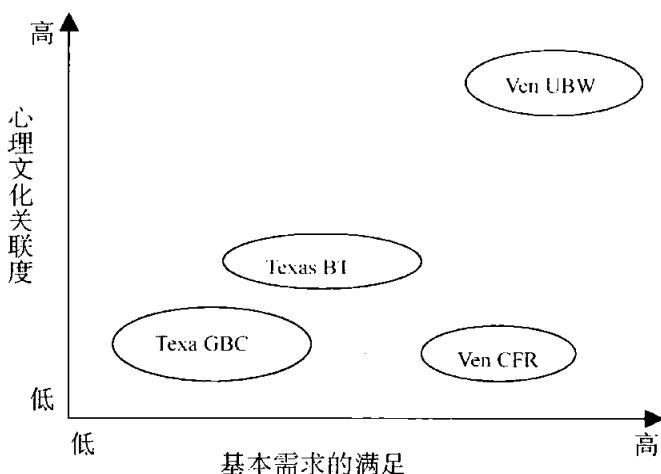


图 15.5 研究地区在 CNH 连通性的多维空间中的二维截面图中所在位置

在得克萨斯区域,主要通过法律的强制性来管理对自然系统的利用。最基本的,多数的土地利用受土地所有权的约束。住房、商业和工业开发商首先要获得他们所转化的土地的所有权。市政府法律上通过分区和别的限制来调节土地利用,比如建筑法规、供水和污水处理服务。有关私人财产和公共财产的法律管理着运动狩猎,生计狩猎及捕鱼业。得克萨斯的两个区域在强制法规调节方面处于相近的位置。由于大丛林是逃犯的避难所,土地的利用比绿地长廊稍有不合法。委内瑞拉地区也有正式的土地使用法规,但它们并不被严格地遵守和执行(图 15.6)。

在我们的研究地区,除了对土地利用的强制约束外,社会传统、习俗、期望在不同程度上限制着利益相关者对土地的利用。在一篇著名的论文中,Garret Hardin(1968)认为在缺乏正式法律的调节下,对公共的自然系统的开发总是导致悲剧的发生。后来的研究表明,土著居民已经形成了一套土地使用的非正式系统(Ostrom, 1990)。这一系统在伊马塔加山的本土利益相关者中得到了很好的发展,所以这个地区在这一维度上处于高端。另外三个区域的这一系统没有得到好的发展:在卡帕罗,对土地利用的本土制约并不健全,得克萨斯的两个区域主要依靠正式的法规来管理土地使用。在得克萨斯,私有财产具有神圣性,他

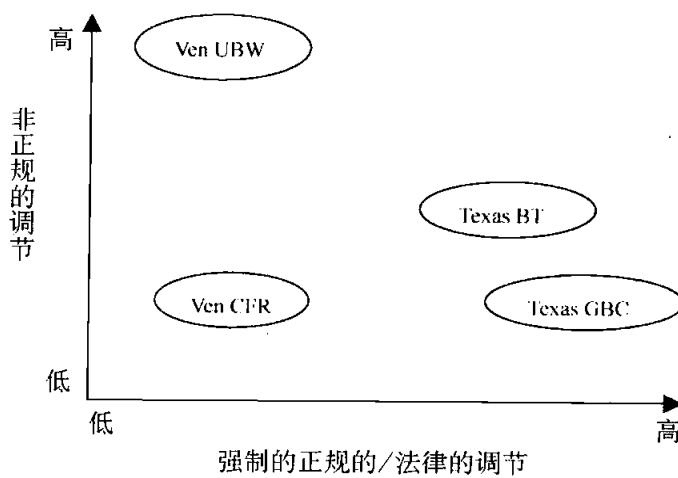


图 15.6 研究地区在 CNH 连通性的多维空间中另一个二维截面图中所在位置。  
该截面图代表了对使用自然资源的管理

们利用法律调节各种活动,包括对土地利用进行法律调节。但得克萨斯人普遍认为每个土地所有者应该有随心所欲使用他们土地的权利。所以在绿地廊道,一个土地所有者会在自己土地上立一个无线电发射塔哪怕遭到相邻土地的所有者的反对,也可能会在受保护的河岸长廊林旁边的泛滥平原建立一个小水泥厂。总的来说,得克萨斯的利益相关者并不遵守区域的土地使用传统,也不会考虑相邻土地所有者的意愿;取而代之,他们希望有来自政府的正式法规来管理他们对土地的利用。

图 15.5 和图 15.6 只是为了给整合提供一个概念基础,并引出后面我们将用模拟模型来测试的假设,我们正利用这样的假设和持续的衡量标准来比较模拟结果。比如:在得克萨斯,如果政府极力调节资源开发并提出环境保护来约束城市扩张的话会发生什么结果,将此与委内瑞拉建立环境保护法但并不强制实行相比较。这种分析同样适用于多维度的相互作用,比如,在伊马塔加山缺乏正式法律的调节是否会带来更高程度的人类—自然关联性,这种关联包括精神文化方面和人类基本需求的满足,又是否会带来更多的非正式调节?目前,我们正着手完成大丛林和伊马塔加的模型,这些模型使得我们能够进行这种分析。除此之外,研究区域之外的地区也可以放在这个多维空间模型中从而对其人类—自然耦合系统有个大体的认识。

虽然这些图形只是概念性的,它们仍可以用来形成人类—自然耦合系统的生物复杂性指数。一些研究已经能够以一个更加量化的形式来表示生物复杂性,比如说,Anderson(2003)给出了一个原生生物群落生物复杂性的三维模型(原生生物包括很多微生物,其中包括黏菌,原生动物和藻类)。这三个指标都是生物层面的:物种的丰富性、空间的多样性、分布的斑块性。在这个模型中,生物

复杂性指数由点所在的位置和这点到原点的距离决定。

## 15.4 建模方法

我们的模型框架是基于自然和人为的土地利用/土地覆盖变化及利益相关者的反应的本质特点建立起来的(见图 15.7)。图 15.7 左边部分描述的是基于主体的人类系统模型在几种社会经济情景下的相互作用,并接受来自自然系统的反馈,自然系统的描述如 15.7 所示。在这个图形中,景观模型和水文模型受到主体行为的影响,并在气候和自然干扰情景下使居住地和水的质量发生变化。这些变化再反馈到人类系统模型中。我们已经对得克萨斯的绿地廊道和委内瑞拉的卡帕罗森林保护区建立了模型。我们将在下面的两小节中来描述它们。表 15.1 概括了模型中描述主体(人类决策制定者)用到的技术。在关于人类系统模型的相似点和不同点这一节中,我们将进一步讨论各种方法的使用范围,优点和缺点。

### 15.4.1 得克萨斯:绿地廊道地区

得克萨斯的人类系统模型中的每个主体都有一个指定的价值观系统,行动的集合和决策框架。每个主体与模型中的其他主体相互作用,并对来自自然系统的反馈作出回应。主体的价值观系统会根据其他主体的行为和自然系统中得到的反馈发生变化(Monticino et al. , 2005)。

#### 1. 主体

我们定义了代表利益相关者的四类主要的主体:(1)地主主体,代表拥有大片的适宜居住或用来发展商业或工业土地的人;(2)开发商主体,代表住宅、商业或工业用地的开发者;(3)房东主体,代表研究地区的居民群体;(4)政府主体,代表有权批准、修改或否决发展提议的市政府。对于大丛林模型(正在进展中),木材公司和非正式组织也属于主体。

#### 2. 主体行为:编码价值观和指导决策

每一类主体根据价值观结构的不同又分为几种类型,正是这些价值观决定了主体对行为的选择。对每个主体我们都给定了他们一系列的可选行为。主体选择最符合他们价值观的行为。这些价值观在统计决策分析的框架内进行度量(Keeney and Raiffa, 1993)。主体根据多属性效用函数来衡量每种可选行为的价值,然后选择一种具有最高效用的行为。该效用函数表示了重要的价值观属性和利益相关者决策中的权衡。对于绿地廊道,效用函数的形成来自地主、开发商和政府的专题小组会议以及对房东主体的结合分析调查。我们用聚类分析法

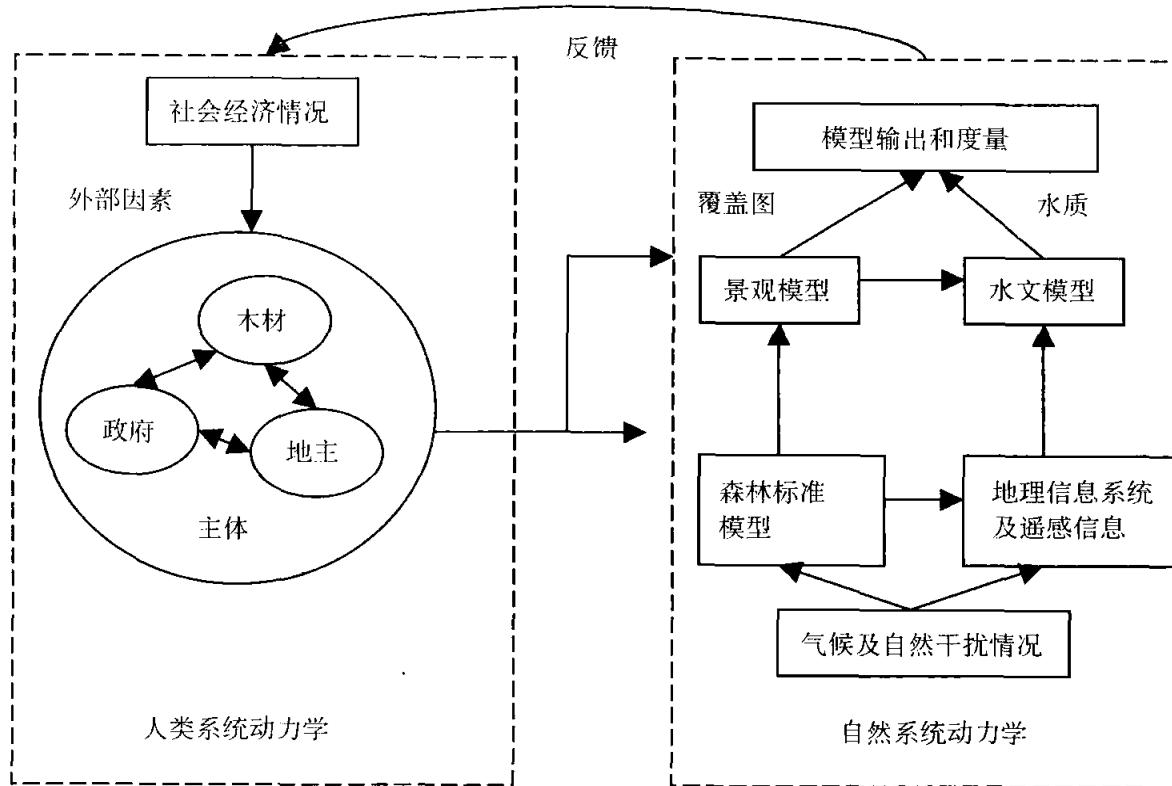


图 15.7 CNH 主要组成部分及它们之间相互作用的模型框架

来划分房东主体,将具有相似价值观的主体归为一类。我们给出几类典型的价值观结构再依此确定每个房东的价值观类型。这套房东类型构成了模型中的居民,我们将相似但较为不正式的方法与重要的小组数据并用,导出了地主、开发商和政府主体类型。

当主体面临决策,他们会给出每个可选行为  $A$  导致的一系列可能的结果  $\{c_1(A), c_2(A), \dots, c_m(A)\}$ , 以及每种结果的概率  $\{p_1(A), p_2(A), \dots, p_m(A)\}$ , 每种结果  $c_i(A)$  的价值我们用多属性效用函数来衡量,一般形式是:  $U(c_i(A)) = k_1 U_1(c_i(A)) + \dots + k_n U_n(c_i(A))$ 。函数  $U_i$  代表了决策中每种价值观属性的效用。数  $k_1, k_2, \dots, k_n \geq 0$ , 表示每种价值观属性上的权重。特别的,  $k_i$  的大小和  $U_i$  的形式表示了每个主体的价值观结构,行为  $A$  的期望效用是:  $E[U, A] = \sum_{i=1}^m p_i U(c_i(A))$  主体会选择具有最高期望效用的行为。

我们将每个具有一块未开发的私有地的人指定为一个地主主体。地主主体有两种可选行为——持有土地并维持土地现状或者出售它。地主选择哪种行为与三种价值观属性有关——财富,传统价值观和周边土地的使用。财富就是从一种行为中能够获得的金钱回报——持有土地时的农业或牧业收入,或者出售土地时得到的利润。主体会根据土地的价格趋势模型和一段时间内农业或牧业收入的现值来对金钱回报作出评估。每个主体会被分配一个初始财富以及财富

的部分效用  $U_w$ 。根据边际效用递减模型,我们允许地主对农业/牧业收入和土地价格的变化有不同的敏感度。传统价值代表了土地对于地主的内在价值。一个家庭中几代人一直拥有的一块农场一般比一个新近买进的“消遣性牧场”具有更高的传统价值。传统的部分效用我们用  $U_{Tr}$  来表示,对于一个已经拥有这块土地的主体来说,这个效用并不会随着时间的推移而减少。周边土地使用这个属性表示处在发展边境时,坚持农村土地利用将会带来积极的外部效应。周边土地利用属性的部分效用  $U_{NL}$  是一个关于周边土地开发百分比的减函数。为了评估周边土地利用属性这部分的效用以决定到底持有还是出售土地,地主会预测发展趋势以及回顾模拟开始时的邻近土地的使用情况,用以评价发展趋势到底会带来的还是负的外部效应。邻近土地使用这一属性会影响地主主体之间的相互作用,如果周边土地被出售,那么地主主体也很可能在下次的模拟迭代中会出售自己的土地。地主会多大程度上受到周边地主决策的影响取决于地主在周边土地效用属性上的权重。地主的总效用函数是:  $U = k_w U_w + k_{Tr} U_{Tr} + k_{NL} U_{NL}$ ,  $k_w$ 、 $k_{Tr}$  和  $k_{NL}$  分别表示地主在财富价值观,传统价值观及周边土地使用价值观这三种属性上的权重。地主类型是根据属性权重,初始财富和财富的贴现率来界定的。比如说,  $k_w = 0.8$ ,  $k_{Tr} = 0.1$  和  $k_{NL} = 0.1$  代表地主的兴趣在于最大化自己的财富价值,而  $k_w = 0.5$ ,  $k_{Tr} = 0.1$  和  $k_{NL} = 0.4$  的模型代表地主更加注重他周围的环境。

表 15.1 主体描述

模型	输入—观察	主体角色	决策规则	偏好	学习	输出—行动
得克萨斯 绿地走廊	列出所有的 观察类型		决策分析模型的 有限理性 最大化期望效用 的选择行动	属性的权重,比如,在 经济价值属性上比在 传统价值属性上有较 高权重的地主主体更 可能出售土地	主体会调节它 们的偏好,以 此来适应它们 的行动	列出所有 的类型
委内瑞拉 卡帕罗	土地使 用/土 地 覆盖	居民 特许权所 有者 地主 政府	一系列规则来定 义角色。一个主 体包含很多角 色。比如,一个居 民主体可以表 示具有高目标的 居民的集合,这 会随着模拟的进 行而变化	通过特殊条件的 方法,把偏好嵌入在规 则中。尽管如此,这 种方法并不排除使用 决策理论机制。我们 使用前者是因为他比 后者更适合对难以收 集数据的系统进行 建模	现在还未执 行,我们将建 立一个除了权 重调节外的学 习类型来获得 行为的新规则 ( Da'vila and Uzca'tegui, 2005)	定居 种植 砍伐 移动 出售 购买土地 讨价还价 管辖
委内瑞拉 伊马塔加 山 Botana mo	土地所有 权	土著 特许权所 有者 农 民 政府 采矿者	一系列规则来定 义角色。一个主 体有多个角色	属性的权重(经济、文 化和生态),比如在经 济价值属性上比在传 统价值属性上有较高 权重的地主主体更可 能出售土地		

如果地主决定出售土地,开发商主体就会得到这些土地。开发商主体根据发展潜力模型来选择这块地的开发类型(住房、商业和工业用地)。发展潜力模型会对每种开发类型对这块地的适合度及潜力进行评分,从而导出这块地采用每种开发类型的概率,进而主体可以依此选择一种开发类型。对一块土地发展潜力的评估包括:与最近的主道的距离,与最近道路(主道或小道)的距离,以这个地区为中心的一定范围内的人口密度以及各种开发类型的密度,在这块土地内或者周围存在的自然障碍——比如,存在一个洪泛区。对每种开发类型我们都界定了三种开发者主体类型——环境敏感型,环境中性型和环境不敏感型。不同的开发者主体类型会提出不同的开发类型。比如,环境敏感型的主体会提倡保留高比例的树木覆盖面和更多的开放空间。界定开发类型的标准包括:住房密度,不渗水地面的比例,树木覆盖面的比例和污染物排放量。选择某种开发商主体类型的概率是现有的政府主体类型和开发类型的函数。比如说,如果一个进步的政府主体在位,相对于只注重经济发展的政府主体,在前种情况下环境不敏感型的商业开发商就比较不可能获得土地。

如前所述,房产主体代表了一定范围内的城市居民的集合,我们把这块土地上的居民总数和他们对土地利用决策影响的权重赋给这个主体。比如说,一个代表大量高收入居民的主体就会比一个代表少量低收入的主体具有更高的权重。房东主体面对邻居的发展提议时会有两种可能的行为——反对或者不反对发展。一个房东主体的效用函数有四个属性:经济财产价值、居住环境、周边土地利用和社团努力成效。经济财产价值部分效用评价的是所提出的发展建议对主体的住房价值的影响。居住环境表示主体所在地的住房发展的和谐性。周边土地利用指的是在主体周围的更大范围内的,相当于适合度和可察觉的环境外在性的发展效果。社团努力成效衡量的是社区团体采取具体行动时取得的可觉察的成果。我们将房东主体分为四类——冷漠型、财产价值型、邻里关系型和环保型。冷漠型的房东主体对社区团体的努力成效来说,冷漠型的房东也对其产生部分效用,但这一部分效用使得可察觉的社团努力成效迅速下降,这使得冷漠型的房东不可能反对发展计划。环保型的房东主体更看重居住环境和周边土地利用,而且它的部分效用函数会对环境不敏感的发展提议给予低的评价。因此,环保型的房东可能会反对大多数的发展提议。财产价值型的房东注重房产的价值并对价值的下降高度敏感,而邻里关系型的房东主体重视居住环境。房东可能根据政府的发展决策以及自然系统的反馈改变自己的类型。比如说一个财产价值型的主体原来反对的商业发展计划最终被政府主体批准了,由于停车场径流而导致局部洪水的增加,那么这个房东主体很可能就会转变成环保型主体。但是,房东主体也可能退回到更冷漠的房东主体。因此,我们允许房东主体价值

系统随着时间的推移而改变。

面对开发商主体的开发建议,政府主体会选择下面三个行为之一:批准,在一个更高的环境敏感级别上有条件地批准,或者否决。政府主体根据四个属性选择他们的行为——商业关系、公民关系、环境后果和税基效应。我们界定了三种类型的政府主体——经济增长型、温和型和进步型。经济增长型的政府主体相当重视商业关系和税基效应,而温和型和进步型的政府主体更加注重社区关系以及环境后果。政府主体类型会影响他们对某种行为结果的知觉,比如一个进步型的政府主体比一个经济增长型的政府更能觉察到潜在行为给环境带来的后果的严重性。

### 3. 模拟算法

利益相关者主体之间以及自然系统和人类系统之间的决策流和信息流一旦初始化,接下来就会按照下面的算法来运行。

(1) 在一个时间步长(一般是1年为一个步长)的开始阶段,地主主体决定是否出售土地,如果决定出售,那么发展潜力模型将选择这块土地的发展类型。

(2) 根据当前的政府主体类型选择一个开发商类型。开发商呈交发展建议给政府主体,房东主体将受到所公布的建议的影响。

(3) 房东主体决定是否反对此发展提议。这个决策是根据房东主体类型、发展提议以及房东所在地的居住发展类型而作出的。

(4) 政府主体决定批准,或者修改再批准,或者否决发展提案。这一决定根据政府主体类型,发展提案,房东主体反对的强度和自然系统模型的反馈作出。

(5) 土地利用的任何变化都会被传给自然系统模型,自然系统模型将告知人类系统模型土地利用变化导致的土地覆盖变化和水文效应。然后房东主体会据此修正自己的价值观,即改变主体类型。用来发展住房的土地会被分配给房东主体。房东主体的类型和权重是被批准的提案类型的函数。

(6) 房东主体对政府主体进行投票,这一结果将会在下次迭代中起作用。不同的房东类型以不同的概率投票给不同的政府主体类型。选举的结果取决于房东主体投票的权重。新政府主体将在下一个时间步长的起始点开始生效。

(7) 下次迭代再次从当前地主主体决定持有还是出售土地开始。

### 4. 模拟情景和结果

我们在不同的地主初始分布、房东类型和政府类型及经济假设的情景下对土地利用变化动力进行了模拟。我们观察到模型中这些情景的一个普遍的趋势是:刚开始会有一个相当快速的发展阶段,到后来开发的土地的百分比就会稳定在一定的水平上。这种同步性与库兹涅茨建筑经济增长周期类似(Berry, 1991),在这个模型中,经济发展过头而后崩溃。在这个模拟模型中,快速的发展引起了房东主体的消极反应,这会影响他们对掌握着增长管理权的政府的选择,

因此会放慢(至少是暂时放慢)进一步的发展。类似的居民对快速增长的反应在美国也有文件记载(e. g., Austin, TX; Eugene, OR; Loudoun County, VA) (Duerksen and Snyder, 2005)。开发土地的“稳定”的百分比的大小是关于发展高峰出现的时间和地主类型的地理分布的函数。事实上,稳定开发土地的百分比的变动大部分直接取决于地主类型的空间交互作用。已有人曾对那些导致了地主价值观的主动增长的管理策略进行过研究。政府和非政府组织采用的维持未开发土地的一个管理措施是创造空地保护区。通常情况下,土地和开发权的购买是出于对生态的关注或者土地只是意外获得。我们的模拟已经检验了基于地主价值观的目标土地的影响,目标是利用周边地主的土地利用价值观来有效保护更多的土地,避免它们被开发。结果显示空地保护策略会导致未被购买的土地不被开发,而在缺少这一策略的地方这样的土地是被开发的。这种保留为那种对周边土地利用敏感的地主提供了一个“发展缓冲器”。特别是,在这种策略下,在注重周边土地使用的地主附近购买土地对经济的减缓作用要比在价值导向型的地主附近购买土地更为有效。图 15.8 展示了三个模拟模型的发展结果。这三个模型只是在初始地主类型分布上有所不同,但他们都是在空地策略下购买周边土地利用型的地主附近的土地。这个数据表明动力的变化归因于地主价值观的空间分布。在三个模型中,地主类型的初始百分比都是一样的。

### 15.4.2 委内瑞拉:卡帕罗森林保护区

我们的模型只描述了委内瑞拉西部也就是卡帕罗森林保护区所在地“第一阶段”经历的耕地殖民过程。也就是说,一个居民在保护区占据一块土地并从事轮歇农业,但通常情况下,这块土地的土壤在五年内将流失。在这种情况下,一些居民会扩张他们的农场,这导致了对森林新的砍伐,或者过渡到第二个阶段(我们的模型并未模仿此阶段),这涉及将其对土地的占领权出售给牧场主。

#### 1. 主体

居民、特许权所有人和政府官员构成了这个模型中的主体。居民是指具有有限的经济资源并从事轮歇农业的人们。他们到这个地区目的是要提高自己的经济地位并且获得他们原来非法占有的土地的所有权。特许权所有人是在政府的监督管理体制下被批准有权采伐木材的木材公司。政府主体负责管理这个保护区,他们负责监督木材的砍伐。因为居民的行为是非法的,而且要接近这个地区相当困难,所以直接调查当地居民的价值观是不切实际的。所以,模型中居民主体的信息只能来自于以前的调查研究(CESIMO, 1998; Rojas, 1993; Sa'nchez, 1989)。因为当前版本的该模型只关注第一阶段过程,所以尽管它包括了 100 个居民主体,但只有一个特许权所有人主体和一个政府主体。

实施“护林”和“农林并重”政策的政府主体都监管着特许权所有人主体的收成和种植配额。如果特许权所有人主体不符合政府指定的配额,这个特许权就会被撤销三年。政府对特许权所有人进行监管是为了使这个地方更适宜居住(这是河流周围,边界和道路的缓冲器)。

居民主体的行为是从一个居住函数开始的,这个函数考虑对居民主体最具吸引力的地区:土地利用不被监管的地区,比如树林、次生灌丛等等。同时,这个函数利用矢量模拟居民的运动,而矢量的权重由到河流、边界和道路的距离决定——因为它们是这个保护区的入口。100名居民主体被安排在不同的初始地方。在模拟过程中,这些居民主体占领土地的时间和范围不同,他们对森林环境的影响也不同。居民主体实施他的领土扩张的逻辑如下:如果一个地区被认为:(a)没被占领,(b)不在监管之下,(c)以前未被占领过,(d)它当前的土地使用属于下列类型:原生或次生林、原生或次生灌木、休耕地、种植园或者伐林,那么主体就被允许在那里定居或扩张(假定并不超越一定的扩张限度)。

特许权所有人主体选取具有商业价值的树种并创建和管理森林种植园(Ablan et al., 2003)。当特许权所有人主体发现有居民在他的特许领地时,它会继续在未被居民主体占领的土地上从事种植。根据政府主体政策的不同,特许权所有者主体有两种可选行为,当政府主体采用放手不管的态度时,特许权所有者主体会忽略居民主体;如果政府采用“护林”或者“农林并重”的政策时,他会令居民主体搬离他们的特许领地。特许权所有者主体在一个为期30年的伐木周期下运作,特许权所有者将他们的林地分为30块,按照时间顺序每年收获一块,这一块林地被砍伐之后,这块地的土地利用类型就变成了“伐地”。当30年的周期结束时,特许所有者又开始收割第一块林地。

形式上,每个主体都会朝着约束目标进行推理,然后从选择目标回溯到与此相符的行动,并将这些行动作为实现目标的方法。当主体观察到周边主体实现了这样的一个目标时,他同样也会追求这个目标。系统状态(全球或当地)的改变也会受代表主体行为偏好的规则所驱动。这些规则提供了一个清晰的,人性化的,考虑到了主体的意图的,特别适合口头讨论的定性的验证。其中一种验证模型的方法就是看它能否模拟现实世界中的一些行为模式。如果模型建立得良好,我们就会希望模型和现实世界应该要有某种程度的一致性。尽管如此,定性验证仍然是必要的,因为一个模型可能产生多种不同的系统状态,而同种系统状态又可能来自不同的模拟假设。对多主体模型中出现的模式进行数学分析有助于验证模型假设的有效性,但定性验证是基于假设的清晰和可理解性上的。它们与现实中人类价值观和行为的实证信息的相符程度是对模型能力的一种重要测试,因而能够引导个人选择和公共决策,上述的模型能力包括可靠的确认未来

趋势和敏感度的能力。

### 3. 模拟算法

卡帕罗多主体模型在空间上是很精确的(比如,主体对其他主体的反应部分取决于他们相对的空间位置),它与一个次生林演替模型相连,这个模型是以元胞自动机的形式运行的(Hogeweg, 1988)。元胞转换规则是使用下列要素来定义的,包括土地使用/土地覆盖状态以及这种状态上所持续的时间,居民及特许权所有者对土地的占领以及正如在管理计划中规定的特许权所有者主体所遵循的隔间顺序(*compartment's sequence*)。一个元胞在所要求的转换时间到达之前都会保持同样的状态。在缺少主体行为的情况下,这个系统路径将由自然演替来指明。综合的多主体元胞自动机模型运行如下:

- (1) 居民主体可以占领一块未被占领的土地用来耕种,这将改变土地利用/土地覆盖。
- (2) 政府主体可以将居民主体驱逐出这个地区,同时土地利用/土地覆盖变回到未被占领的森林。
- (3) 一个居民主体可以将未被占领的相邻元胞占为己有。
- (4) 5年以后,土壤耗竭,居民主体将转移到另一元胞,同时先前被占领的那个元胞变为休耕地。
- (5) 当一个特许权所有者主体砍伐木材时,一个未被占领的森林元胞变为伐林。
- (6) 特许权所有者主体为了造林,会在未被占领的休耕或次生灌丛上植树,这样土地使用/土地覆盖类型就变成了种植园。

### 4. 模拟情景和结果

我们的模型对一个长为65年的时期进行了模拟,以6个月为一个步长,初始状态是1987年的土地利用/土地覆盖,分别在三种政策情景:“放手”型、“护林”型、“农林并重”型下进行了模拟。我们选择这个时间是因为这是一个从伐林到成熟林的过渡阶段。图15.9显示了在模拟结束时模型在三种政策下的结果。在“护林”政策下,这个地区的空间格局比较同构和完整,而在放手不管及“农林并重”的政策之下,空间格局比较异构,破碎度也较高,特别是在边界附近的地区。在这些地区,牧场的小块土地分裂成了一个次生森林模型(Secondary forest matrix)。在所有的情形中,原来的成熟林都被伐林和次生林代替,但每种情形下代替的速度不同,特许权所有者及居民主体对土地利用/土地覆盖变化的影响也不同。

在模拟结束时,在所有的情形下,成熟林的覆盖率都降到了15%左右,而耕地少于2%。这说明,“初始周期”会最终导致耕地的下降和牧场的增加。在“护

伊马塔加山模型中已经包括的变量描述了陆地和水生系统影响了利益相关者对土地的认识,这由他们的基本物质需求、文化价值观和信仰决定的。这是驱动社会状态变量——空间分布、移民和利益相关者的死亡率变化的动力,反过来,这些变量会通过决策规则和效用函数来影响土地利用/土地覆盖变化。

## 15.5 模型框架合成

### 15.5.1 模型的独特性和共性

“我们的自然系统模型对所有的地区都是通用的和相似的,因而人类能够感知和重视的生态系统服务及设施,如水量和水质及生物多样性,在各个地区都是相似的。但由于不同地区的物种组成,对法琳的水文响应和生态系统过程和功能不一样,所以不同模型中的这些参数是不同的。”我们试图用一些普通元素(如树和水)来决定模型的结构从而使得土地利用/土地覆盖变化的影响可以通过自然系统模型来整合。因此,我们对各个地区都运用相似的模型,比如,斑块转变或森林演替模型(Acevedo et al., 2001)。植被—自然的种类内的动力主要是通过继承来控制,通过使用根据详细的差异模型模拟所估计的过渡参数来建模(Acevedo et al., 2001; Monticino et al., 2002)。该模型使用了基于遥感研究所得到的土地覆盖类型(CWRAM, 2002; Newell et al., 1997; Pozzobon, 1996)。对一些地区我们也使用水文模型和野生居住模型。每个自然系统模型的结构都是通用的,足以容纳这个研究项目里的所有地区,但也足够精细的使它能够准确代表某个具体的系统。

人类系统模型采用类似的方法,但是表现形式有所不同。表15.1总结了用来描述主体(模仿人类决策制定者)的技术。对委内瑞拉地区,模型采用正式的基于逻辑的方法,明确指定了一系列限制主体行动的规则,而得克萨斯模型强调利益相关者的价值观集合,在效用函数基础之上遵循决策分析方法。这些方法更多的是形式上的差异,但本质是类似的。当基于逻辑的方法明确定义了决策规则时,它并没有清晰地定义相关主体的价值观集合和效用函数。类似的,决策分析方法虽然明确指明了价值观集合,但它并没有定义一套决策规则。

我们是根据每个研究地区的需要和情况来使用这些方法的。卡帕罗地区的数据来源于现有的文献和专家意见(间接的或者是二手资料),因此,基于规则的模型被认为更适合这个地区。而绿地长廊地区有足够的原始数据(来自调查或者专题小组会议)来支撑决策分析方法。在伊马塔加山,我们综合了卡帕罗地区

基于规则的方法以及绿地廊道地区的基于实地调查的决策分析方法。

在所有的模型中,主体都代表了利益相关者——个人、集体、私人组织和政府机构——他们的行为都会直接或间接地影响土地利用/土地覆盖。在绿地长廊模型中,只有开发商主体直接改变了土地使用,而在卡帕罗和伊马塔加山模型中,大多数的主体直接影响了土地使用。模型主体之间的相互作用是以广泛的交叉分类为特征的。所有的模型在每个类别里面都包含相互作用,这些模型在主体的相互作用这个层面的区别主要在于这些相互作用有多明确。在绿地长廊模型中,地主主体和决策历史之间的空间交互作用就不大明确;每个主体并不直接对相邻主体的行为进行反应,但会对系统当前的状态有所反应,而这个状态则包含了过去的决策史。比如,一个地主主体出售土地的决策是受周边的发展影响的,而周边的发展是由周边出售土地导致的(并不直接受周边出售土地的影响)。另一方面,房东主体和政府主体之间的相互作用是明确的。政府主体对待发展提案时会考虑到房东主体的反抗,而房东主体也会对政府主体的决策作出反应。卡帕罗模型包括了明确的空间相互作用和决策史。主体直接对别的主体和之前的行为作出响应。这使得模型更加的清晰(主体利用这个附加信息来作出决策),但加重了计算量。

为了进一步的整合,我们所使用的两种决策方法可以相互转化。例如,决策规则可以使用效用函数。这个效用函数使用二元变量,也就是说将 0 或者 1 赋值给主体,用来表示主体的类型、信仰和偏好。属性、相关部分效用函数以及属性权重都可以被指定用来代表决策规则。同样,决策分析方法也可以转换成基于逻辑的方法,因为每个主体都有个相关的集合,这个集合包括观测值、行为、结果、概率以及结果的效用。利用这个集合,主体可以形成选择规则,并结合对主体的指令,使得主体能够选择具有高优先级的行为,并最终会扩展到包括未来导向的进程,如计划。决策分析通过提供价值观变化的框架(如改变属性权重)和对土地利用最终结果的调查来呈现决策和土地使用变化模式之间的联系。

### 15.5.2 功能共性

虽然现实生活中的人们都是基于一系列的价值观和偏好来作出土地利用决策的,而我们模型中的主体只具有土地利用/土地覆盖决策过程中的价值观结构的本质特征;主体的可选行为代表的只是土地利用/土地覆盖的多种类型。因此,一个现实中的居民决定种植玉米还是其他作物对他来说很重要,但我们的模型只抓住了主体清理林地并将它转化成农业用地而不是保留林地这种决策的本质。同样,房子和场地的大小对房产开发商来说会有很大的经济差异,我们的模型只抓住了土地利用/土地覆盖变化的特征,这种变化是由于地主出售林地给单

个家庭用来发展住房引起的。更一般地来说，贫困居民清理林地用以轮歇农业或是富裕的开发商清理林地用来建造高大的住房，它们对自然系统和生态服务的影响是类似的。

因此，跨区域的主体在人类自然系统中出现了他们在土地利用活动和随之产生的土地覆盖变化上的功能相似性。因此，我们可以通过将它们比较从而整合在一起。尽管如此，它们是在不同的法律和规则下运行的。在得克萨斯模型中，我们考虑的是美国的法律法规对土地使用的监管，包括经济条件和政府主体之间的相互作用，这反过来会影响地主后来的行为。卡帕罗模型采用委内瑞拉的土地使用法律以及它的执行与否。更深层次的，这会对所有权和占有年限的不同产生重要的影响。虽然委内瑞拉居民和得克萨斯州的开发商可能有类似的功能，但后者拥有土地的所有权而前者却没有。同样，委内瑞拉采伐木材特许权所有者与得克萨斯的木材公司相比，后者拥有土地而前者不拥有。卡帕罗地区完全处于森林保留地，除非它失去法律保留地的地位否则它将一直属于公共财产。得克萨斯的土地既包括政府所有的公有地也包括房东、非正式组织、木材公司或者开发公司拥有的私人地。

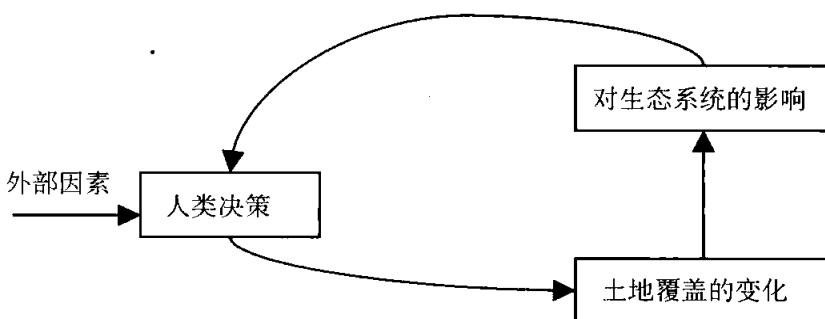


图 15.10 概念化土地覆盖变化及生态系统影响。CNH 相互作用的一般方式。

模型中使用的所有土地利用/土地覆盖分类也可以分为几组。虽然模型中使用了多种不同的类型，但它们大致可以分为四大类：(1) 开发地；(2) 农地或牧地；(3) 成熟林；(4) 演替林。图 15.10 描述了所有地区人类决策和自然系统相互影响的过程，外部因素是指影响人类决策并不受主体控制的因素，包括当今的经济环境（稳定、增长、衰退等等），以及当前事件，如自然灾害和联邦政策。

## 15.6 结 论

本章中我们用了多种方法来模拟土地利用/土地覆盖变化。有些模型是基于实证的，它们建立在对过去所观测到的变化模式进行推断的基础上，它对这些

变化的驱动力的代表程度是有限的。这种多主体和斑片转换结合的模型能够代表驱动土地利用/土地覆盖变化的人类决策，并且它具有空间代表性的优势，也就是它能抓住变化的位置和变化的大小。模拟产生的土地利用/土地变化模式与在绿地长廊和卡帕罗观察到的类似。这有助于我们在研究别的地区时，能够更好地证明总体模型方法的有效性以及从模型中得到更有质量的结果。

绿地长廊模型的模拟结果说明，当制定增长管理策略时考虑到主体的价值观会带来更成功的结果。主体之间的相互作用产生了复杂的动力机制，模拟揭示了这些动力的主要敏感因素。特别是土地利用变化的主要驱动是土地价格的假设，地主主体对土地价格变化和周边发展的敏感度，以及地主之间的相互作用。对经济价值的敏感度不出所料的同时，我们的模拟揭示了另一个敏感因素，此因素对政府控制蔓延、管理发展和保持自然系统和生态系统服务都可能会起到重要作用。高度重视周边土地使用和传统的地主主体在周边土地不开发的情况下更有可能坚持持有土地。因此，如果政府为了“开放空间策略”从具有较低的价格门槛的地主手中购买了土地或者所有权。他周边的对周边土地利用非常敏感的地主会抵制以一个稍微较高的价格出售自己土地的诱惑。那些本来应该花在大块土地上用于公有空地的美元若花在分散的小块土地上则更加地有效，因为它会对邻居的私人财产有传染效应——每一美元将会产生更多的空地。

同时，当地政府必须知道这种策略潜在的负面影响。低密度的发展会导致当地的服务成本的提高，空气和光污染的增加会导致跨越式的发展，而这又会加剧前面的这些问题。尽管如此，通过指导那些价值观更偏向于以利润为导向的地主主体进行开发，这种策略可能会集中于开发较小块的区域，该策略同时会通过影响那些价值观更偏向于使用周边土地的地主以及（或）传统的地主来增加购买开发权或地块的公共花费。这种策略会减少以级联式发展为特征的地方数量，最后有助于达到人类和自然系统的相互维持的目标。因此，当前大丛林研究工作的一个重要组成部分就是对那个地区的地主进行综合的土地利用价值观调查，目的是为了分析具体地方的地主类型的土地使用变化动力（同时尊重被调查者的隐私）。

卡帕罗模型是通过定性评估的，将这个结果与这个地区已知的土地利用史相比较。模拟结果与我们已知的这个地区的土地利用变化，热带森林演变和森林管理相一致，并再次揭示了重要的敏感性。卡帕罗模型显示，强制执行的法律和法规管理着所有的土地使用活动是这个地区的人类和自然系统能够相互维持的关键因素。我们猜测，在伊马塔加山确定土著居民的权利是这个地区取得人类和自然系统相互维持的最有效政策（Callicott press）。本土模式的生存与森林特征的伊马塔加山自古以来就是共存的。但正如卡帕罗经验表明的一样，只

有保持低的人口密度,轮歇农业和持续的森林覆盖才有可能共存。因此在伊马塔加山地区,控制移民同样很可能会是维持人类和自然系统相互关系的关键政策。运行殖民地的概念模型的所有周期,在卡帕罗就会利用景观指标(e.g. Turner et al., 1990b)来比较模拟结果和现实的土地利用情况以进行更多的定量验证。然而正如许多作者,如帕克等人(2003)、Bousquet 和 Le Page(2004),对基于主体的模型的验证提出了一个重要的挑战,有待于进一步的讨论和研究。

## 参考文献

- Abian, M., Dávila, J., Moreno, N., Quintero, R., Uzcátegui, M., 2003. Agent modelling of the Caparo Forest Reserve. In: Di Marino, B., Yang, L. T., Bobeanu, C. (Eds.), The 2003 European Simulation and Modelling Conference, Section: Simulation and Biology, Subsection: Simulation of Ecosystems. EUROSIS-ETI, Ghent, Belgium, pp. 367~372.
- Acevedo, M. F., Pamarti, S., Abian, M., Urban, D. L., Mikler, A., 2001. Modelling forest landscapes: parameter estimation from gap models over heterogeneous terrain. *Simulation* 77, 53~68.
- Agnew, J., Smith, J., 2002. American Space/American Place: Geographies of the Contemporary United States. Routledge, London.
- Allen, W., 1905. Captain John B. Denton, Preacher, Lawyer, and Soldier: His Life and Times in Tennessee, Arkansaw, and Texas. R. R. Donnelle, Chicago.
- Anderson, O. R., 2003. A model of biocomplexity and its application to the analysis of some terrestrial and marsh eukaryotic microbial communities with an emphasis on amoeboid protists. *The Journal of Eukaryotic Microbiology* 50(2), 86~91.
- Arima, E. Y., Walker, R. T., Perz, S. G., Caldas, M., 2005. Loggers and forest fragmentation: behavioral models of road building in the Amazon Basin. *Annals of the Association of American Geographers* 95(3), 525~541.
- Aspinall, R., 2004. Modelling land use change with generalized linear models — a multi-model analysis of change between 1860 and 2000 in Gallatin Valley Montana. *Journal of Environmental Management* 72(1~2), 94~103.
- Bates, E. F., 1976. History and Reminiscences of Denton County. T. Wheeler Printing, Denton, TX.
- Berry, B. J. L., 1991. Long-wave rhythms in economic development and political behavior. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Bhaduri, B., Harbor, J., Engel, B., Grove, M., 2000. Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using a GISNPS model. *Environmental Management* 26(6), 643~658.
- Bousquet, F., Le Page, C., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling* 176, 313~332.

- Brandt, J. J. E., Bunce, R. G. H., Howard, D. C., Petit, S., 2002. General principles of monitoring land cover change based on two case studies in Britain and Denmark. *Landscape and Urban Planning* 62(1), 37~51.
- Brown, D. G., Pijanowski, B. C., Duh, J. D., 2000. Modelling relationships between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest, USA. *Journal of Environmental Management* 59(4), 247~263.
- Brown, D. G., Page, S. E., Riolo, R., Rand, W., 2004. Agent-based and analytical modelling to evaluate the effectiveness of Greenbelts. *Environmental Modelling & Software* 19 (12), 1097~1109.
- Buttimer, A., Seamon, D., 1980. *The Human Experience of Place and Space*. Croom Helm, London.
- Callicott, J. B., Acevedo, M. F., Gunter, P., Harcombe, P., Lindquist, C., Monticino, M., 2006. Biocomplexity in the Big Thicket. *Ethics, Place and Environment* 9, 21~45.
- Callicott, J. B., Rozzi, R., Delgado, L., Monticino, M., Acevedo, M., Harcombe, P., in press. Biocomplexity and conservation of biodiversity hotspots: three case studies from the Americas. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*.
- Casey, E. S., 1993. *Getting back into place: toward a renewed understanding of the Place-World*. Indiana University Press, Bloomington.
- Casey, E. S., 1997. *The fate of place: a philosophical history*. University of California Press, Berkeley.
- Centeno, J. C., 1997. Deforestaciones fuera de control en Venezuela. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- CESIMO, 1998. Gaia. Caso Venezuela: deforestación y políticas de la propiedad de la tierra en la reserva forestal de caparo. Centro de Simulación y Modelos de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. <http://cesimo.ing.ula.ve/GAIA/CASES/VEN/INGLES/firstp.html>.
- Cottingham, K. L., 2002. Tackling biocomplexity: the role of people, tools, and scale. *BioScience* 52(9), 793~799.
- Covich, A., 2000. Biocomplexity and the future: the need to unite disciplines. *BioScience* 51, 908~914.
- Cozine, J. J., 2004. *Saving the big thicket: from exploration to preservation*, 1685~2003. University of North Texas Press, Denton, TX.
- CVG TECMIN, 1987. Informe de avance de clima, geología geomorfología suelos y vegetación. Hoja NB - 20 - 4. Ciudad Bolívar, Venezuela: CVG Técnica Minera C. A. Proyecto Inventario de los Recursos Naturales.
- CWRAM, 2002. Watershed atlas for ray roberts, lewisville, and grapevine. Center for watershed and reservoir assessment and management at the University of North Texas, Denton.
- Dávila, J., Uzcátegui, M., 2005. Agents that learn to behave in multi-agent simulations. In: Tonella, G. (Ed.), *Proceedings of the Fifth International Conference on Modelling, Simulation, and Optimization (MSO 2005)*, The International Association of Science and

- Technology for Development (IASTED). Acta Press, Anaheim, pp.51~55.
- Deadman, P. J., Robinson, D. T., Moran, E., Brondizio, E., 2004. Effects of colonist household structure on land use change in the Amazon Rainforest: a stakeholder based simulation approach. *Environment and Planning B: Planning and Design* 31, 693~709.
- Delgado, L., Rosales, J., Blanca, R., Castellanos, H., Figueroa, J., Leal, S., Mansutti, A., Rodríguez, A., Sanchez, B., Valeri, C., 2005. A conceptual model of biocomplexity in the upper Botanamo river basin. In: Tonella, G. (Ed.), *Proceedings of the Fifth International Conference on Modelling, Simulation, and Optimization (MSO 2005)*, The International Association of Science and Technology for Development (IASTED). Acta Press, Anaheim, pp.297~302.
- Duerksen, C., Snyder, C., 2005. *Nature Friendly Communities: Habitat Protection and Land Use*. Island Press, Washington, DC.
- Dybas, C. L., 2001. From biodiversity to biocomplexity: a multidisciplinary step toward understanding our environment. *BioScience* 51(6), 426~430.
- Entrikin, N., 1991. *The Betweenness of Place: Towards a Geography of Modernity*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Evans, T. P., Kelley, H., 2004. Multi-scale analysis of a household level agent-based model of land-cover change. *Journal of Environmental Management* 72, 57~72.
- Evans, T. P., Moran, E. F., 2002. Spatial integration of social and biophysical factors related to land cover change. *Population and Development Review* 28, 165~186.
- Evans, T. P., Manire, A., de Castro, A., Brondizio, E., McCracken, S., 2001. A dynamic model of household decision making and parcel level land-cover change in the eastern Amazon. *Ecological Modelling* 143, 95~113.
- Foster, D. R., Motzkin, G., Slater, B., 1998. Land-use history as long-term broad-scale disturbance: regional forest dynamics in central New England. *Ecosystems* 1, 96~119.
- Freeman III, A. M., 1993. *The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods*. Resources for the Future, Washington.
- Gomez-Pompa, A., Kaus, A., 1990. Traditional management of tropical forests in Mexico. In: Anderson, A. B. (Ed.), *Alternatives to Deforestation: Steps Toward Sustainable Use of the Amazon Rainforest*. Columbia University Press, New York, pp.45~64.
- Gomez-Pompa, A., Kaus, A., 1992. Taming the wilderness myth. *BioScience* 42, 271~279.
- Gragson, T. L., 1998. Potential vs. actual vegetation: human behaviorina landscape medium. In: Baleć, W., (Ed.), *Advances in Historical Ecology*, pp.213~231.
- Gunter, P. A. Y., 1993. *The Big Thicket: An Ecological Evaluation*. University of North Texas Press, Denton, TX.
- Haber, W., 2004. Landscape ecology as a bridge from ecosystems to human ecology. *Ecological Research* 19, 99~106.
- Hardin, G., 1968. Tragedy of the commons. *Science* 162, 1243~1248.
- Harding, J. S., Benfield, E. F., Bolstad, P. V., Helfman, G. S., Jones III, E. B. D., 1998. Stream biodiversity: the ghost of land use past. *Ecology* 95, 14843~14847.

- Hare, M., Deadman, P., 2004. Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management. *Mathematics and Computers in Simulation* 64, 25~40.
- Hargrove, E. C., 2000. Toward teaching environmental ethics: exploring problems in the language of evolving social values. *Canadian Journal of Environmental Education* 5, 1~20.
- Hogeweg, P., 1988. Cellular automata as a paradigm for ecological modelling. *Applied Math and Computation* 27, 81~100.
- Hoffman, M., Kelly, H., Evans, T., 2002. Simulating land-cover change in Indiana: an agent-based model of de/reforestation. In: Janssen, M. A. (Ed.), *Complexity and Ecosystem Management: The Theory and Practice of Multi-agent Systems*. Edward Elgar Publisher, Northampton, pp. 218~247.
- Houghton, R. A., 1994. The worldwide extent of land-use change. *Bioscience* 44, 305~313.
- Huigen, M. G. A., 2002. Spatially explicit modelling of land-use change in the Sierra Madre, Philippines, The MameLuke Project. In: Parker, D. C., Berger, T., Manson, S. M. (Eds.), *Agent-based Models of Land-use and Land-cover Change, Report and Review of an International Workshop* Irvine, California October 4~7, 2001. LUCC International Project Office, Bloomington, Indiana.
- Kasperson, J. X., Kasperson, R. E., Turner, B. L., III (Eds.), 1995. *Regions at Risk: Comparisons of Threatened Environments*. United Nations University, Tokyo.
- Keeney, R. L., Raiffa, H., 1993. *Decisions with Multiple Objectives*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kellert, S. R., 1997. *Kinship to Mastery: Biophilia in Human Evolution and Development*. Island Press, Washington, DC.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U., Veldkamp, T. A., Vogel, C., Xu, J., 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 11, 261~269.
- Lepers, E., Lambin, E. F., Janetos, A. C., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N., Scholes, R. J., 2005. A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981~2000. *Bioscience* 55, 115~124.
- Ligtenberg, A., Bregt, A. K., Lammeren, R. V., 2001. Multi-actor-based land use modelling: spatial planning using agents. *Landscape and Urban Planning* 56, 21~33.
- Lim, K., Deadman, P., Moran, E., Brondizio, E., McCracken, S., 2002. Agent based simulations of household decision making and land use change near Altamira, Brazil. In: Gimblett, H. R. (Ed.), *Integrating Geographic Information Systems and Agent-based Modelling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes*. Oxford University Press, Oxford, pp. 277~309.
- Loibl, W., Toetzer, T., 2003. Modelling growth and densification processes in suburban regions — simulation of landscape transition with spatial agents. *Environmental Modelling*

- and Software 18, 553~563.
- Lundberg, A., 2002. The interpretation of culture in nature: landscape transformation and vegetation change during two centuries at Hystad, SW Norway. Norwegian Journal of Geography 56, 246~256.
- Malpas, J. E., 1999. Place and Experience: A Philosophical Topography. Cambridge University Press, Cambridge.
- Malpas, J. E., 2001. Comparing topographies: across paths/around place: a reply to Casey. Philosophy and Geography 4, 231~238.
- Manson, S. M., 2002. Integrated assessment and projection of land-use/land-cover change in the southern Yucatán peninsular region of Mexico. In: Parker, D. C., Berger, T., Manson, S. M. (Eds.), Agent-based Models of Land-use and Land-cover Change, Report and Review of an International Workshop Irvine, California October 4~7, 2001. LUCC International Project Office, Bloomington, Indiana, pp. 56~59.
- Mansutti, A., Flores, A. L., Perozo, A., Rigores, A., Figueroa, I., Sevilla, V., Navarro, A., Hernández, L., Castellanos, H., De Martino, A., 2000. Diagnóstico de los conflictos socio-ambientales en Imataca: Líneas estratégicas para el resguardo y la consolidación de los asentamientos humanos ubicados en la Reserva Forestal Imataca. UNEG/Banco Mundial/MARN, Ciudad Bolívar.
- Mas, J. F., Puig, H., Palacio, J. L., Sosa-Lopez, A., 2004. Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. Environmental Modelling and Software 19, 461~471.
- Massey, D., 1999. Space-time, ‘science’ and the relationship between physical geography and human geography. Transactions of the Institute of British Geographers, New Series 24 (3), 261~276.
- Metzger, J., 2000. Tree functional group richness and landscape structure in a Brazilian tropical fragmented landscape. Ecological Applications 10, 1147~1161.
- Michener, W. K., Baerwald, T. J., Firth, P., Palmer, M. A., Rosenberger, J. L., Sandlin, E. A., Zimmerman, H., 2001. Defining and Unraveling Biocomplexity. Bioscience 51, 1018~1023.
- Miranda, M., Hernández, L., Ochoa, J., Yerena, E., Blanco-Uribe, A., 1998. All That Glitters is Not Gold: Balancing Conservation and Development in Venezuela’s Frontier Forests. World Resource Institute, Washington.
- Monticino, M. G., Cogdill, T., Acevedo, M. F., 2002. Cell interaction in semi-Markov forest landscape models. In: Rizzoli, A. E., Jakeman, A. J. (Eds.), Integrated Assessment and Decision Support: Proceedings of the 1st Biennial Meeting of the IEMSS. IEMSS, Lugano, Switzerland, pp. 227~232.
- Monticino, M. G., Acevedo, M., Callicott, B., Cogdill, T., Ji, M., Lindquist, C., 2004. Coupled human and natural systems: a multi-agent based approach. In: Pahl-Wostl, C., Schmidt, S., Rizzoli, A. E., Jakeman, A. J. (Eds.), Complexity and Integrated Resources Management: Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society (IEMSS), vol. 1. IEMSS, Manno, Switzerland, pp. 196~202.

- Monticino, M. G., Acevedo, M., Callicott, B., Cogdill, T., 2005. Multi-agent model of human values and land-use change. In: Tonella, G. (Ed.), Proceedings of the 5th International Conference on Modelling, Simulation and Optimization (MSO2005) of the International Association of Science and Technology for Development (IASTED). Acta Press, Anaheim, pp. 279~284.
- Moran, E. F., Ostrom, E. (Eds.), 2005. Seeing the Forest and the Trees: Interactions in forest ecosystems. MIT Press, Cambridge, MA.
- Newell, J., Dickson, K. L., Fitzgerald, J. W., Atkinson, S. F., Acevedo, M. F., 1997. A landscape ecological characterization of the Ray Roberts Lake study area, north-central Texas: temporal variations in landscape pattern 1987 ~ 1992. Romanian Journal of Optoelectronics 5, 95~110.
- Norton, B. G., 1991. Thoreau's insect analogies: or why environmentalists hate mainstream economists. *Environmental Ethics* 13, 235~251.
- NTCOG, 2005. North Central Texas Council of Governments. Demographic Estimates. Retrieved 10. 12. 2005. <<http://www.nctcog.org/>>.
- Oakes, T., 1997. Place and the paradox of modernity. *Annals of the Association of American Geographers* 87, 509~531.
- Ojima, D. S., Galvin, K. A., Turner II, B. L., 1994. The global impact of land-use change. *Bioscience* 44, 300~304.
- Openshaw, S., 1994. A geographical study of scale and aggregation problems in region building, partitioning, and spatial modeling. *Transactions of the Institute of British Geographers. New Series* 2, 499~508.
- Openshaw, S., 1995. Human systems modeling as a new grand challenge area in science: what has happened to the science in social science? *Environment and Planning A* 26, 499~508.
- Ostrom, E., 1990. Governing the commons: the evolution of institutions of collective action. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Pahl-Wostl, C., 2004. The implication of complexity of integrated resources management. In: Pahl-Wostl, C., Schmidt, S., Rizzoli, A. E., Jakeman, A. J. (Eds.), Complexity and Integrated Resources Management: Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society (IEMSS), vol. 1. IEMSS, Manno, Switzerland, pp. 25~33.
- Pahl-Wostl, C., 2005. Information, public empowerment, and the management of urban watersheds. *Environmental Modelling and Software* 20, 457~467.
- Parker, D. C., Manson, S. M., Janssen, M. A., Hoffman, M. J., Deadman, P., 2003. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review. *Annals of the Association of American Geographers* 93, 313~337.
- Parker, D. C., Meretsky, V., 2004. Measuring pattern outcomes in an agent-based model of edge-effect externalities using spatial metrics. *Agriculture, Ecosystems, and Environment* 101, 233~250.
- Pickett, S. T. A., Cadenasso, M. L., Grove, J. M., 2005. Biocomplexity in coupled

- natural — human systems: a multidimensional framework. *Ecosystems* 8, 225~232.
- Pozzobón, E., 1996. Estudio de la dinámica de las deforestaciones en la Reserva Forestal de Caparo mediante imágenes HRV SPOT. Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Escuela de Ingeniería Forestal. Departamento de Ingeniería. Mérida-Venezuela.
- Quintero, R., Barros, R., Dávila, J., Moreno, N., Tonella, G., Ablan, M., 2004. A Model of the biocomplexity of deforestation in tropical forest: Caparo case study. In: Pahl-Wostl, C., Schmidt, S., Rizzoli, A. E., Jakeman, A. J. (Eds.), Complexity and Integrated Resources Management: Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society (IEMSS), vol. 2. IEMSS, Manno, Switzerland, pp. 840~845.
- Redman, C. L., 1992. The impact of food production: short-term strategies and long-term consequences. In: Jacobsen, J. E., Firor, J. (Eds.), Human impact on the environment: ancient roots, current challenges. Westview Press, Boulder, CO, USA, pp. 35~49.
- Redman, C. L., 1999. Human Impact on Ancient Environments. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, USA.
- Rojas, J., 1993. La colonización agraria de las Reservas Forestales: un proceso sin solución? Universidad de los Andes, Instituto de Geografía, Mérida, Venezuela, Cuaderno Geográficos 10, pp. 110.
- Rolston III, H., 1985. Valuing wildlands. *Environmental Ethics* 7, 113~128.
- Sagoff, M., 1988. The Economy of the Earth. Cambridge University Press, Cambridge.
- Sánchez, M., 1989. Situación actual del proceso de ocupación de la Reserva Forestal en Caparo. Universidad de los Andes, Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales, Mérida, Venezuela.
- Sauer, C. O., 1927. Recent developments in cultural geography. In: Hayes, E. C. (Ed.), Recent Developments in the Social Sciences. J. B. Lippincott, Philadelphia.
- Schneider, L. C., Pontius, R. G., 2001. Modelling land-use change in the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85, 85~94.
- Schein, R. H., 1997. The place of landscape: a conceptual framework for interpreting an American scene. *Annals of the Association of American Geographers* 87, 660~680.
- Sheppard, E., McMaster, R. B., 2004. Scale and Geographic Inquiry: Nature, society and method. Blackwell, Malden, MA.
- Snyder, G., 1995. A Place in Space: Ethics, Aesthetics and Watersheds. Counterpoint, Washington, DC.
- Smith, M., 2001. An Ethics of Place: Radical Ecology, Postmodernity, and Social Theory. State University of New York Press, Albany.
- Terán, O., Alvarez, J., Jaimes, M., Ablan, M., 2005. Land occupation and land use change in a forest reserve: A MABS Approach. CABMHRMA-SMGET Joint International Conference on Multi-Agent Modelling for Environmental Management, Saint Maurice — Les Arcs, France, 21~25 March, 2005.
- Tuan, Y. F., 1973. Ambiguity in attitudes toward environment. *Annals of the Association of*

- American Geographers 63, 411~423.
- Tuan, Y. F., 1977. Place and Space: The Perspective of Experience. The University of Missouri Press, Minneapolis.
- Turner, B. L., 1976. Population density in the classic Maya lowlands: new evidence for old approaches. *Geographical Review* 66, 73~82.
- Turner, B. L., III, Clark, W. C., Kates, R. W., Richards, J. F., Mathews, J. T., Meyer, W. B. (Eds.), 1990a. The Earth as Transformed by Human Action: Global and Regional Changes in the Biosphere over the Past 300 Years. Cambridge University Press, Cambridge.
- Turner, S. J., O'Neill, R. V., Conley, W., Conley, M. R., Humphries, H. C., 1990b. Pattern and scale: statistics for landscape ecology. In: Turner, M. G., Gardner (Eds.), Quantitative Methods in Landscape Ecology. Springer, USA, pp. 17~49.
- UCV-MARNR., 2002. Ordenamiento territorial de la Reserva Forestal Imataca y sus áreas adyacentes. II Etapa. Bases del Plan de Ordenamiento. II Informe Técnico. Caracas, Venezuela: MARN.
- Vidal de la Blache, P., 1926. Principles of human geography. In: Emmanuel de Martonne (Ed.). Bingham, Holt and Company, New York (translated from the French by Millicent Todd).
- Walker, R., 2003. Mapping process to pattern in the landscape change of the Amazonian frontier. *Annals of the Association of American Geographers* 93(2), 376~398.
- Walker, R., 2004. Theorizing land-cover and land-use change: the case of tropical deforestation. *International Regional Science Review* 27, 247~270.
- Walker, R., Perz, S., Caldas, M., Silva, L. G. T., 2002. Land use and land cover change in forest frontiers: the role of household life cycles. *International Regional Science Review* 25, 169~199.
- Watson, R. T., Noble, I. R., Bolin, B., Ravindranath, N. H., Verardo, D. J. (Eds.), 2000. Land use, Land-use Change, and Forestry: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Zube, E., 1987. Perceived land use patterns and landscape values. *Landscape Ecology* 1, 37~44.

## 第 16 章

# 一个基于主体的原始农业社会的模拟模型<sup>①</sup>

英国的研究者 Macmillan 和中国的研究者 Huang 联合发表了一篇描述农业社会模型的论文。在这个模型中,主体生活在一个孤立的聚居地上,通过使用周围的土地来生产必需和非必需的生活用品。主体制订并且尽量满足消费和生产计划,但市场的需求并不总是明确,且商品可以以不同价格在不同主体间交换。该模型描绘了大部分的农业活动景象,包括经典的冯·屠能经济模型中的那些农业活动。在人口统计方面,该模型能够产生从正常增长到由周期性饥荒导致的周期性衰退的一系列不同结果。下文将对该模型作出详细的介绍。

### 16.1 介 绍

本章与一个被 Epstein 和 Axtell(1996)称作“生长社会科学”的项目有关。文章涉及其中(op. cit. p. 177)关于使用“某些足以产生我们感兴趣的宏观结构的微观规则(即初始主体、环境和规则)”的部分。

这里所讨论的宏观结构,即系统的涌现特性,包括了农田的各种利用方式。而这些异质性土地的中心是一个小镇,即市场。该项目主要关注于主体间以及主体与物理环境之间的相互影响。

Epstein 和 Axtell(1996)的模型描述了一个简单的资源收集型社会。这个

① 本章译自:W. Macmillan, H. Q. Huang. An agent-based simulation model of a primitive agricultural society. *Geoforum*, 2008, 39: 643 – 658. 已取得授权,授权方:ELSEVIER。

社会在一个只提供两种消费资源的环境中运行。而我们所做的是试图将此模型改进以适用于一个稳定的农业社会,以便进一步发展它,从而探索都市形式的演化过程。我们所构造的地块上有一个孤立的聚居地,这个聚居地具有一些恒定特征(例如,最大居住量等)。正是这些特征的存在导致了农田的变化。从技术上讲,这种模型与模拟都市演化相比更为简单,因为除交通网络以外,聚居地以外的土地并不是一成不变的。主体不会在土地上修建住宅或者做其他的半永久性标志,并且所有地块的使用痕迹都会在每个期间的结尾被清除以便地块能被再次使用。另一方面,除去人口方面的特征,我们的模型中还有土地所有制、生产、运输、市场贸易、存贮和消费。以上这些都是建立模型模拟都市形式变化的很好的基础。

将智能主体模型和相关的技术应用在城市研究方面,已经有很多重要的研究成果。Benenson 和 Torrens(2004)作了一个很好的概述。Clarke 等(1996),Batty 等,Whit 和 Engelen(1997, 2000), White 等(1997), Clarke 和 Gaydos (1998), O'Sullivan(2001a, b)和其他人致力于将元胞自动机(CA)的方法应用于探索城市发展和形态,与此同时 Takeyama 和 Couclelis(1997)扩大了 CA 模型的基本概念以便重点解决远距离作用的棘手问题(Couclelis, 1997)。由于应用了智能主体,Benenson 和 Portugali(1997)以及 Benenson(1998)在模拟城市社会的相互影响方面已取得了显著进展。其他人则尝试将智能主体应用于不同地域环境(Kohler and Gumerman, 2000),而 Parker 等人(2003)则回顾了一系列用于土地利用和土地覆盖的模拟模型的变化。但是正如我们所知,迄今为止在如何处理生产(和土地使用)决策、消费决策和市场与某个空间的智能主体间的连接问题还没有人研究。能够成功解决这个问题成为了攻克建立城市经济模型这一难题的一个先决条件。因为城市经济模型中需要这些特征,另外还包括投资决策、资本折旧、土地市场和资本资产,也许还有其他属性。而我们的模型通过分析单一市场周围土地的改变为城市经济模型的建立做了一些基础性的研究。

这个问题本身属于最古老的空间分析问题,但我们采用了全新的,可以认为属于新兴的人工生命(AL, artificial life)领域的研究方法。除了上面提及的智能主体、CA 以及 AL 方法,该研究领域还包括自繁殖自动机、元胞自动机、生物形态、L-系统、自催化网络、生物诱发多主体系统、演化计算、演化机器人、演化硬件、人造核苷酸等。众多专家对于这类系统相关的技术和哲学问题进行了广泛讨论(例如 Langton, 1988; Heudin, 1999; Tesfatsion, 2002; Wooldridge, 2002; Gilbert and Troitzsch, 1999)。

## 16.2 生长人工社会

Epstein 和 Axtell 的“糖域”有两个特征引起了地理学家的兴趣。第一,社会的主体在空间内相互影响;有一片网格形式的土地,在网格内分布着资源(糖和香料)。第二,主体之间以及主体与环境之间的关系是多维度的。举例来说,这些关系不仅仅是纯粹的经济关系,还包括生理、人口、社会、经济、政治和文化方面。此外,尽管主体相对简单,但是它们之间的相互作用会产生复杂的模式和进程,而其中至少有一个是真正与实际关系对应的。因此,一般的模拟策略看起来不仅与基本的地理学所关注的内容相符,而且在其生成的宏观行为方面也具有良好的前景。

要达到这个前景所制定的目标是一个巨大挑战。因为 Epstein 和 Axtell 定义的世界与现实的地理形态存在本质的差别。首先,他们的世界中没有生产。虽然模型中存在使用劳力采集资源,但是除消费以外并没有对这些资源的运输。因此,除了因采集而产生的有限影响外,土地并不受主体活动的影响。由于没有生产,就没有什么必要将那些仅需在劳作中就能学会的简单劳动进行分类以达到专业化的劳动分工。主体经济实力的唯一区别在于它们本身的身体素质以及囤积的商品数量。只有当主体开始进行采集活动时,交易才可能通过个体间的偶遇发生。贸易网(从联系人网络的意义上说)会涌现出来,但是其中没有实体。事实上,Epstein 和 Axtell 的模型中没有任何形式的基础生产,就如同没有为消费而进行的生产。因此,在该模型中没有房屋、存储设施和社会公用设施等。简而言之,网格上只有地点没有位于该地点上的场所(*In short, there are locations on the lattice but no places*)。

尤其重要的是模型中没有市场。其原因是深层次的。Epstein 和 Axtell 的模型中的主体在各自当前定居点的邻近区域活动,而这个邻近区域受主体“视野”的限制。主体在邻近区域内活动并采集资源。它们没有远距离(超越邻近区域的边界)活动的能力。因为没有记忆,它们对当前定居点以外的土地也没有意识。而且聚居地上的每个网格只能被一个主体占领。这种处理主体在空间内的行为的方法主要来自元胞自动机的一贯做法。虽然从中继承了很多有用的特点,但同时它也使描述市场和其他地方变得很困难。

除此之外,还有很多可能的经济限制,在其他学科维度也有类似的缺点。这并非是对模型的批评,而是呼吁采取优化的措施。本文中,多数的优化集中在经济层面,尤其是上文提及的局限之处。由于在多主体模型中,经济和人口问题是密不可分的,因此本文也作了一些人口方面的思考。正如 Epstein 和 Axtell 所

说(ibid. p. 158),“如果在马尔萨斯时代基于主体的模型就已经存在,我们不知道经济和人口领域是否还能如此独立地发展。”

### 16.3 模型概述

我们的模型假定存在一个孤立的聚居地,它四周的土地自然条件不同,但都能进行农业生产。这个聚居地就是市场,并且在聚居地内有固定数量的住房,每座房子都有一个仓库。主体的生存需要住所、不少于某个数量的必需品(被称为“主要要素”的食品)和一些劳动之余的小憩(闲暇)。主体可以种植必需品以外的其他粮食产品,因而导致了消费的多元化,包括必需品、非必需品和闲暇。每个主体有不同的消费偏好。

主体都生活在聚居地内,每人都拥有唯一的领土。在任何时候,这块领土只能生产一种产品。主体根据预期的产量和市场价格选择生产的产品。主体从聚居地前往领土进行劳作,将收获的产品运回聚居地先储存起来,然后再在市场上交易。同时,每个主体都有记忆,因而会根据各自的经验预期产品的价格。主体的这些预期连同他们的偏好,将支配他们在市场上的买卖行为。

闭市后主体各自回家,消耗其所拥有的部分物资,并将剩余的储存起来。如果主体没有足够维持生存的物资,他就会死去。另一方面,如果可以储存的物资超过了主体存量的上限,一个新的主体就会诞生,多余的粮食将作为其初始资产。新的主体从他们的父母身上遗传了偏好,并且从父母处获得知识。为了生存,新的主体必须找到一块土地,并声明其为自己的领土。一旦声明,这块土地的所有权便不能更改直至所有者死亡。为了找到土地,新的主体离开聚居地,根据现存的路径(同时也创造新的路径)搜索,直至发现一块空地。如果领土距离聚居地太远以至于主体在前往领土劳作后没有足够的劳力将产品运回,它就会死去。

随着时间的流转,主体社会不断进化,土地的使用、人口以及交通网络都会不断地变化发展。模型中的物理环境还包括了随季节变化的天气,它会影响作物产量。土地的产能也随地域不同而变化,同时交通网络的变化也会导致可到达地点的变化。

### 16.4 空间、时间和界限

本章中模型的假设与 Epstein 和 Axtell 的假设存在很多不同点。尤其在空

间、时间和界限的处理方面,两者之间存在本质的差别。

主体在空间上的分布是备受瞩目的“糖域”的一大特色。对于一个地理学家而言,这些分布产生的方式具有某些特定的反直观的特征。首先,“糖域”中的土地没有边界。通过假设“糖域”的矩形元胞空间是从北向南缠绕着形成了圆柱,同时从东向西缠绕形成了圆环,从而消除了边界(因而主体不用考虑这些边界)。这就意味着,所有的地点都拥有相同的空间属性(因为没有边界,所以没有所谓的中心地带)。而实际的土地是有边界的,主体必须处理由此带来的问题。考虑到此种可能性,我们必须修改关于土地的说明。在我们的模型中:

(1) 地点被描述为网格中的一个有限且规则的矩形晶格。

其次,为了消除边界形变以及由此产生的中心位置改变,Epstein 和 Axtell 建立了“糖之山”并将后者放进了模型。实际上“糖域”中主体的群聚集结行为都依赖于这个假定。类似的,Dean 等人于 2000 年发表的一篇论文模拟了阿纳萨齐部落。在这个部落中,任何群体都是资源分布的结果。在另一方面,实际生活中的人常因为与物质资源无关的原因形成群体。

每个元胞只能被一个主体占领的假设也存在一些问题。该假设的一个作用是限制我们在聚居地中发现的人类集群现象(human-scale clustering)扩散的程度。原则上,我们可以通过使用一个庞大的元胞空间并保留单一主体的居住权来研究这个问题。或者,我们可以允许不止一个主体在同一元胞内,同时设计一个结构体系允许同地协作的主体相互关联。这创造了一个直观的挑战,但是它提供了一种模拟的可能性,这种模拟允许一个低密度的、流动的、聚居的群落向位于另一个人口稀薄区域且具有不同人口密度的聚居地系统迁徙。

对时间的讨论引发了关于尺度的更深远的议题。在 Epstein 和 Axtell 的模型中,时间区间具有一个内在因素,它允许谈判的发生,并导致产品的交易。更广泛的时间区间的嵌套在其他场合更具有价值。就聚居地周围的农田利用模型而言,将以下参数加入到模型中将是有益的:诸如每天从聚居地到领土的行程,每月对储存品的消耗,季节性的收割和销售等等。从长远来看,需要一个更加适合聚居地形成和发展的时间尺度。和空间一样,可以使用大量的时间点表示不同类型、频率的事件,但采用不同的时间尺度(具有内在因素的时间间隔)具有更大的吸引力。我们假设:

(2) 时间是一个等间隔的序列。每个间隔可以被视为一年,并且在这一年中只有一个农作季节。

## 16.5 环境

相对于土地的变化，“糖域”更集中关注于主体间的分配。由于主体对环境的影响很小，所以值得注意的土地变化很少。但是对于一个研究农田使用的模型来说，这是不可行的。根据定义，这样的模型应当描述土地使用情况的变化，但是它不需要体现引起这些变化的主体。我们的网格由三种元胞组成，分别是一块孤立的聚居地、农田和荒地，而模拟程序则显示出当前各元胞中的土地使用情况。

(3) 模型中有一块孤立的聚居地，上面建有固定数量的住房。这块聚居地是一个庇护所，同时也是一个农产品市场。

(4) 对于一个主体来说，除了聚居地以外的所有其他元胞都可以作为农田使用(用于农业生产)；农田的生产力各不相同。

(5) 在任意一个时间区间内，每个主体的农田只能生产一种产品。

假设(3)允许聚居地元胞中包含几个主体，而假设(4)则限制每块农田仅被一个主体使用。假设(4)提供了这样一种可能性：在某一个给定的时间区间内，一个元胞可能是空的(当它没有被任何一个主体声明用于农业生产时)。它同样允许每个元胞的生产力被设定为同一个值(如冯·屠能模型的经典版本)，或者将之以一个简单二元变量的形式表示(肥沃的或者不肥沃的)，又或者以更精细的等级表示土地的质量。尽管在此模型中模拟土地退化非常简单，但我们目前还没有这样做。

导致收益在空间上发生变化的因素是土地肥沃度(生产力)的差异，而收益在时间上发生的变化则是由天气的变化导致的。天气的不确定性并不是必要条件，但它的存在增强了应对脆弱性的能力，同时为更先进的研究发展铺平了道路，包括研究气候以及类似洪水、风暴等极端事件对聚居地模式的影响。

(6) 有一个天气变量影响输出。

最后，模型中会有一个交通网络连接农田与聚居地。由于物理环境的这个要素是由主体创造的，因此我们将在考虑主体属性时更详细地描述它的发展。

(7) 有一个交通网络。当一个新的主体声明一个未被使用的元胞成为它的领土，那么它就创造了一条连接该元胞与网络的新路径。每条新的路径将成为土地上的永久特征。路径的运输能力不断扩展以便满足所有使用它的主体的需求。但是，这里暗含的路径的“扩展”并不会影响产量。关于这点可以从主体通过的元胞中获得。

## 16.6 商 品

商品生产的性质以及生产所需的其他资源需要与主体的属性一起讨论。居住在“糖域”中的主体的基本属性是新陈代谢和视力。主体对各种资源的代谢速度代表主体为了维持生存在每个时间区间内所必需的消耗量。而实际的消耗总量则是由存活数量决定的，只要这个数量小于等于当时可用的产品数量。如果主体从食物中摄取的能量超过了生存所需量，那么多余的能量将被存在体内。主体的视力是指主体在东西南北四个主要方向上能看到的格点数（这是在冯·诺依曼型邻居关系的基础上扩充得到的）。对于主体而言，这个十字形的区域都可以被看成是它所能获取到信息的区域，在此区域内视觉是获取信息的唯一方式。

Epstein 和 Axtell 的模型中的主体没有上文讨论的一些属性。例如它们没有记忆。因此，如果主体第二次到达一块肥沃的土地，那仅仅表示它们重新发现了这块地，而并非是由于记忆。与此相反，在 Lake(2000)提出的狩猎者—采集者模型中，关于地区资源（浅色坚果）方面的信息的交流会对模型的发展起着重要的作用。

另一个缺失的属性是劳力。“糖域”中的主体的移动受到它们视力而非体力的约束。而在运输商品的过程中保护它们不受损坏是不需要劳力的。而且收集信息、参与交易也不需要劳力。

从经济学或地理学的角度讲，以上的这些特征都是非常规的。关于“糖域”模型中没有生产活动上文已经提及，而上文中的其他观测结果表明消耗是最基本的特征。消耗的数量是恒定的，等于生存所需要的量，因为只有生存才会消耗能量。事实上，在稳定的农业背景下以及实际的采集系统中，如果主体的生存不会立即受到威胁，其他事件也会影响消耗。非必需的商品被获得并消耗，休闲（劳动之余的空闲时间）是有价值的，积蓄与当下的消费将同样重要。

为了使上述这些变为可能，我们对商品集合做了如下的假设：

- (8) 商品分为两种类型——必要的和非必要的；
- (9) 主食（基础食品）是一种必需品；
- (10) 闲暇（劳动中的休息时间）是一种必需品。

另外有两种商品——庇护所和仓库，也被添加到该组合中。在此，我们仅仅采用了一个非常简单的庇护方法，但是如果我们试图模拟聚居地自身的发展，这是远远不够的。假设(3)明确了聚居地上只能有固定数量的房屋。因此，我们作

了一个更深层次的假设：

(11) 庇护所是一种必需品。在每个时期，每所房屋都会提供一个单元庇护所。

连同假设(16)，它们确保了系统中主体数量的最大值由聚居地固定的房屋数量决定。

对仓库的需求与长期的生存需求以及市场的运作相关。一般来说市场并不会出清，因此剩余的产品将会被储存起来在以后消耗或者卖出。这是基于以下两个假设：

(12) 每座房屋都有一个仓库。每个时期(time period)仓库的容量是有限的。

(13) 每个时期，每种可存储的商品在一单位空间的存储数量都是有限的。

正如上文所说，与 Epstein 和 Axtell 的处理方法相比，这两个假设使得主体外出时携带的商品数量不受限制。

最后，还有一种商品，它对于该模型非常有用，那就是货币。和“糖域”一样，货币可能依赖于实物交易，但是以下这个假设不仅在技术方面是有益的而且从经验上讲也是合理的：

(14) 货币是交易的媒介，并且是价值的一种存储方式。

## 16.7 主体的属性

这节中我们将更正式地考虑主体的属性。与“糖域”不同，我们的模型假设主体可以进行新陈代谢，并且拥有在一定范围内的视力。这个假设基于一些概念，包括劳动能力、生存需求、信息获取、记忆以及计算能力。我们首先假定：

(15) 每个主体在每个时期内能够提供有限的劳力。

假设中包含了新陈代谢的概念，即主体生存所需要的最低数量的必需品。在我们的模型中，生活必需品包括住房、闲暇、食物。因此主体可以看成是一种比较精细的生物；在风吹日晒、劳累过度或者缺乏食物的情况下，主体的生存会受到威胁。虽然上文关于必需品的假设中隐含了主体的这些特征，但是为了与 Epstein 和 Axtell 关于主体新陈代谢的假设相对应，现正式说明如下：

(16) 一个主体为了生存，在每个时期必须消耗一定量(大于零)的必需品。如果是住房，则这个最低数量的单位是单元；如果是闲暇，就必须严格小于能提供劳动的时间。

视力对于“糖域”中的主体的行为来说是至关重要的。每个主体基于它现在

持有和未来可能持有的糖和香料而产生一定的偏好。我们定义了一个福利函数,其参数依赖于主体的代谢速度。这就使得参数的选择过程将会通过主体持有资源的消耗程度反映与之生存相关的威胁。主体在视野内依据福利函数最大化的原则选择下一个目的地。如果主体的目标是获得更多的糖和香料,那么此时该函数变量是目的地可以获得的糖和香料的数量。因而主体的视力提供了信息,从而主导了主体的迁徙。

在我们的模型中,一个新的主体必须离开聚居地并寻找一个尚未被声明为私人领土的元胞作为自己的领土,且必须确保这块土地的产量至少能满足主体的生存所需。一种处理寻找过程的办法是假设主体有视力,这会允许他们看见所在地周围一定范围内的空的元胞(土地),同时规定它们必须沿着已有的交通网络移动直至到达一块空地。然后主体就可以进入这块空地,与此同时到达该元胞的交通网络也被扩展(见假设(7))。主体进入空地后就会发表声明,宣告这块土地已经属于自己了。在模拟程序中,这个移动不会被显示的,因为模拟程序是以年为单位显示土地使用模式的变化,而不显示单个主体在领地上的移动。但是这种移动将会通过出现一块新开发的土地、一条连接该地块的新路径(除非该地块原来的所有者已经将其与交通网络连接,并且这个所有者现在已死亡)间接的显示出来。

另一方法就是认为新的主体在离开聚居地之前,就会得到关于空地的信息。而后,新主体不需要依靠视力就能根据各种提示到达目的地。与前一个方法一样,新主体的所有活动可以通过一块新开发的土地、一条连接该地块的新路径或者一块由于原所有者已死而被重新耕作的土地间接的显示出来。综上所述,我们假设:

(17) 一个新生的主体具有寻找自己领土的能力,或者是向其他同伴主体收集信息,或者自己独立搜索。

(18) 一旦主体找到了自己的领土就会记住它,并且永远不会改变选择(或者扩张自己的领土)。

(19) 主体能够辨识从聚居点到领土的最短路径,并且总是使用这条路径。

我们用了两种方法使假设(17)起作用。第一种方法是进行一个小范围的目测搜索,根据结果主体沿着交通网络的分支随机地移动。但是这样一来,主体总是不断的远离聚居地直到它偶然遇见一块空地(在到达之前,主体不会预知到空地存在于此)。第二种方法引入了 DLA (diffusion limited aggregation, 扩散置限凝聚) 模型。DLA 由 Witten 和 Sander (1981, 1983) 提出,因其具有产生动态分形图案这个极具吸引力的性质而得到了广泛的应用。DLA 提供了一个模型用以模拟各种现象。

在这些现象中,扩散都作为一种主要的生长机制(Halsey, 2001)。由于城市的发展类似于一个DLA模型的输出结果,因此该技术广泛应用于城市发展研究领域(例如Batty, 1991; Longley et al., 1991; Batty and Longley, 1994; Ward et al., 2003)。对我们而言,DLA是一种计算上简便的方法,用以实现新生主体从同伴主体处搜集关于空地的信息的构想。DLA描述了这个过程的结果,却没有描述过程本身。

## 16.8 生产和消费

上文中的假设设定了主体拥有记忆和计算能力。这两种属性是生产和消费过程的必要组成部分。

标准的微观经济学方法是将生产和消费决策分开讨论,前者用企业理论分析而后者使用家庭理论研究。在生产方面,企业选择将输入与输出相结合从而达到利润最大化。在消费方面,劳动力和其他的家庭资源被卖出,获得的收益的预算被花费在一系列消费品上(包括闲暇)从而使得家庭效用最大化。资源和产品的价格由市场决定,并且这些价格使得供给和需求之间达到平衡。

在我们的原始农业社会中,这种方法是存在问题的。关于市场出清的假定可能是此种基于前数字计算的经济模型中最值得质疑的部分。一个多主体模拟方法必须做的一件事就是取消市场的自动出清的假定,但又不将其发生出清的可能性排除。此外,将生产决策与消费决策明确的分离用于分析类似农户的主体时是不适宜的。尽管农民部分地参与市场交易,但他们却是典型的为自身个体生产的主体。农民可能不愿高强度的劳作,惧怕风险,期望利益得到最大化,或者同时具有多个此类的特征,当然他们也有其他特征(Ellis, 1993)。他们在基于家庭人口结构的收入和闲暇方面,可能只有最低限度的要求。在劳动力市场上,他们可能是买方也可能是卖方。对于期望收入最大化的农民,我们可将其作为一个管理传统企业的家族来对待,但是需要对他们的生产决策进行约束;而对一个厌恶苦力的农民来,其效用函数应赋予闲暇较大的权重;对于风险厌恶者来说,需要有众多不同的约束方式,例如将进入“饥饿集合”的可能性减到最小(Sen, 1981; Ravallion, 1987)。

长久以来我们试图在假设中将生产和消费决策分离出来,但这种分离究竟在何种程度上是理想又切实可行的呢?如果没有一种价格可以使市场达到出清状态同时成为主体决策的依据,那么我们就需要另一种机制。我们考虑了多种可能,其中最具有发展前景的一种机制是基于以下假设的:

极限获得),那么主体的消费计划中将没有闲暇,只有主食。<sup>①</sup>

(23) 否则的话,消费计划将在期望消费不会超过预期收入的约束下以最大化效用为目标,对主食和闲暇的消费将不会少于生存所需的数量。

生产计划(步骤2)的产生过程类似于消费计划,主要根据主观价格、消费计划中闲暇的制定以及主体对于劳力输入和产量之间的关系的预期(主体并不确切地知道生产函数,因此它们不能进行准确的计划)来制订。生产计划很简单,它只详细说明了一个事物,那就是将要生产的农作物。在生产计划中,生存问题再次被作为首要考虑因素。这是因为当主体当前必要商品的存储量低到威胁生存时,它们总是会选择生产必要商品。

(24) 主体制订好消费计划后,会制订一份生产计划,其中包括本期应该种植何种作物。

(25) 如果主体当前的主食存储量低于某一缓冲值,主体会选择种植主食。

(26) 否则主体会种植那些使自己的净收入最大化的庄稼。

(27) 无论是生产,还是在田间来往,或者产品运输都需要劳动力的输入。除了为享受闲暇预留的劳动力以外,所有可用的劳动力都会被利用。

(28) 实际的产出依赖于农作物的选择、提供给生产的劳动力以及环境条件(土地的肥力和天气)。

相对于寻求一个(主观的)利润最大化生产决策而言,我们认为拥有一个简单的基于邻居行为的生产决策规则可能会更符合多主体建模的主旨,同时也可能会使得模型对邻居关系的概念更为敏感。例如,一个主体可以决定种植它的邻居上一期种的农作物,因为该邻居上一期的收益或者财富是最高的(根据它自己的主观价格判断)。主体甚至可能忽视它们的主观价格而选择上一期邻居中最广泛种植的作物。当然,相对于方案一,方案二的吸引力不强而言吸引力不强,因为该方案中市场信号不起作用,而且使得生产决策的制定与交易和消费的过程分离。迄今为止,我们尚未试验这些方法。

## 16.9 市 场

一旦主体知道了实际产量,它就会考虑以前获得的商品的存量,并且通过在

---

<sup>①</sup> 原文为:If the expected cost of acquiring the survival quantity of staple is less than the agent's holding of cash, or less than the agent's maximum expected income (the income obtainable by working up to the survival limit for the supply of labour), then the agent's consumption plan is to have no leisure and consume only staple. 疑误。

市场上进行买卖调节生产和消费计划(步骤3)。模型假设:

(29) 在每一期,每个主体将当期的产量添加到自己的库存中,而后扣除消费计划上需要的商品,所得到的剩余商品(过剩物资)投入市场交易。消费计划与实际的差额(过剩需求)将形成主体的采购计划或购买清单。

(30) 主体为自己出售的商品制订价格;每次交易的开价是卖者估计的当期价格。

我们注意到,这个假设的典型结果是不同的主体将会为同样的商品设置不同的价格。由于不同生产者的产品质量没有区别,因此消费者只会根据价格来选择。如果所有的买者都希望得到最低的价格,那么就必须采用一些策略把竞价的消费者安排到一个有序队列中。

(31) 主体以随机的顺序被选中依次进入市场成为买家。

采购过程可以通过各种方式组织。首先,买者可以但只能参观一个卖者的货摊。因为我们认为寻找商品进行交易存在一种成本,这个成本会随着参观货摊的次数的增加而增加。为了让交易规则更加简单,我们允许买者参观每一间货摊并且认为买者在此过程中不需要消耗休息时间。我们同样假设:

(32) 主体是顺着购物清单进行采购的。从清单上的第一项开始,选择出价最低的商家,然后继续向前去搜寻出价次低的商家直到买到足够的量。接下来重复同样的过程购买清单上的第二件商品、第三件……直到完成采购计划或者把所有的现金花完。

在这里要注意,在后一种情况中,买者可能无法买到清单上列示的某些产品。一种替换方案是允许购物清单由各种商品的计划支出而不是具体的数量组成。该方案保证了主体能采购到清单中的所有商品,但是各种商品的采购数量往往会有不同于清单上根据需求量而非支出拟定的采购数量。与第一个方案一样,该方案要求买者为清单上的第一个商品定义其最便宜的卖家。其不同之处在于,该方案要求买方还要向该卖家购买清单上所有的商品,只要该卖家能够提供此种商品,而不考虑其价格因素。更深入的一种变化是只要某种给定商品的要价在买者的(主观)预期价格区间之内,他就会购买。许多可能存在的变更很容易被观察到,它们会使结果发生很大的变化。例如,假设规则允许最穷的主体优先采购,那么我们可以预计,如果换成富人优先,那么人口统计的结果将更加富有戏剧性,但是我们并没有试验过。

我们曾经尝试过一种变动,即让买者和卖者相互杀价。如此一来,成交价格将处于买者出的价格与卖者要的价格之间,而交易过程也因此变得更加平滑。与此同时,这个变动并没有与关于市场运行方式的基本假设产生冲突。

不仅买者可能出现采购计划未满足或现金盈余的情况,卖者同样也会出现

卖不完打包的情况,因而我们需要加入下列假定:

(33) 任何主体会将没有卖完的产品带回家存进仓库。

(34) 所有交易获得的现金加上没有用完的现金就等于下一时期该主体拥有的现金。

## 16.10 人口统计学

除了以上的这些经济规则以外,明确定义系统的人口统计学也是非常有必要的。主体的出生有多种处理的方式。可以假设出生率与主体的人口规模是成比例的。另一种方法是在基本符合微观经济学中关于生产力的理论的情况下,我们可以赋予主体的出生一个行为基础(Razin, 1995)。我们采取了一个简单的,但是在理论上不太吸引人的经济机制。

(35) 如果在一次交易循环结束一个主体的仓库被放满了以后仍有剩余,那么一个新的主体将会出生。剩余的商品会成为这个新生主体的初始禀赋。而且新生主体会带走父母拥有的一半的现金。

这个假设是步骤 3 的最后一个要素。我们选择的这个机制的一大优点在于,它确保了每一个主体都有可辨认的父母,并且能遗传他们身上的特征。

(36) 每个新主体的特征通过遗传变异父母的特征获得,例如初始的主观价格、主观工资率以及对产量的估计,并在此基础上加以一定的调整。

特征包括了类似于提供劳力的能力、效用函数的参数等。因此,如厌恶苦力(通过为闲暇变量取较高的值获得)是可以遗传的。要完成步骤 3,定义婴儿的存活率是非常重要的。

要存活下来,需要享受最低限度的闲暇,消耗最低限度的房屋和主食。我们已经假设提供劳力的能力大于对闲暇的最低需求,并且该假设是不能违反的。因此,每个主体都能通过生存测试。就住房而言,聚居地上的住房足以提供给有限数量的主体生存,每人每一时期消费一个单元。主体作为被提供的对象,其数量不大于其承载能力。于是在提供劳力的能力大于对闲暇的最低需求的条件下,只有当主体没有足够的体力走完从聚居地到领土一个来回的路程时,住房才会成为影响主体生存的问题。因此,我们可以假设一个最大生存距离,如果家和领地之间的距离超过了最大生存距离,那就意味着主体会立即死掉。

(37) 一个新生主体在出生后一段时间内会死去,如果:

(a) 这个新主体使聚居地上的人口增加后大于了可以使用的住房单元数;

(b) 主体的居住地到它选定的领地间距离超过了最大生存距离。

这样,步骤3就完成了。步骤4是消费过程,其中只有两个假设,第二个是关于人口统计的:

(38) 对每个主体而言,某一时期市场上所有的商品加上那些置于一旁的用于满足消费计划的商品就是该时期实际能消费的商品。

(39) 如果一个主体在某一给定时期内没有足以生存的主食可供消耗,他就会死去。

## 16.11 学习

模型中的最后一步即步骤5,是学习阶段。步骤3中,主体在基于价格方面的假设下与市场打交道。他们发现其他卖家以不同的价格出售商品。因此在学习阶段,主体会据此更新他们对商品下一时期评估的价格。

(40) 对每个主体而言,商品的主观价格可以采用移动加权平均法来更新。新的数据是以往市场价格的加权平均值。主观工资率的更新采用了类似的方法,使用主体在当前主观价格下最近输出的劳动力价值除以提供的劳动力数量。

主体也学习生产过程。

(41) 对每个主体而言,通过采用移动加权平均法,实际的产出将用于更新主体对所种植农作物投入产出比的信念(主观生产函数)。

## 16.12 模拟

我们在Java平台上运行该系统,因为Java平台支持我们关于直接使用Internet Web浏览器运行该模型的设想。模拟程序使用了面向对象的Java编程语言编写,而模拟的结果也是通过Java小程序呈现的。图16.2是用户界面。在界面的顶端有一个控制面板,用户可以在此选择模拟的速度以及相关的输出显示方式。除此以外,面板上还有开始(Play)、停止(Stop),重置(Restart)和信息(Information)按钮以及一个时间显示框。最长的运行时间为500个时期或者说500年(时间显示框中的时间一个单位表示一年)。物理环境显示于控制面板左下侧的计划表单中。

环境可设置为如图所示的二维网格坐标或者是三维的数字地面模型。二维网格坐标中共有1140个元胞(30行×38列),可以用来表示该片土地上任何的自然景观结构。图中显示的土地上有一些随机生成的无法进行农业生产的山体

放能力有多大。

基于主体的模拟提供了一定的自由度。它提供了一个新方法,用于构想与模拟主体之间以及主体与所处物理环境间的关系。和所有的模拟一样,基于主体的模拟方法无法提供易于分析的输出结果,但是它能够在地理学研究的复杂系统的行为方面提供一些有价值的观点。需要注意的是,为了捕捉我们感兴趣的真实世界的丰富特性,有必要使模拟模型变得非常复杂。这样一来,涌现出的特征的来源就会变得不清楚,很难区分产生的特征究竟是精确模拟的结果或仅仅只是一个特殊结构产生的特定现象(类似于我们对农产品市场做的刻意安排)。唯一的解决办法就是进行广泛的测试和不断的精炼我们的模拟模型。

## 附录 A

### A. 1. 主体行为: 制订消费计划

处于时间  $t$  的主体  $\alpha$  对消费的计划问题包括根据决策为变量  $x_\alpha^0(t), \dots, x_\alpha^N(t)$  分别赋值  $\tilde{x}_\alpha^0(t), \dots, \tilde{x}_\alpha^N(t)$ 。

其中,  $x_\alpha^0(t)$  是主体  $\alpha$  在时间  $t$  对闲暇的计划需求;

$x_\alpha^1(t)$  是主体  $\alpha$  在时间  $t$  对必需品的计划需求;

$x_\alpha^2(t), \dots, x_\alpha^N(t)$  是主体  $\alpha$  在时间  $t$  对非必需品的计划需求;

决策问题可以表示为:

$$\max_{x_\alpha^0(t), \dots, x_\alpha^n(t)} \prod_{n=0}^1 (x_\alpha^n(t) - \delta_{\min}^n)^{\gamma_\alpha^n} \prod_{n=2}^N (x_\alpha^n(t) + \delta^n)^{\gamma_\alpha^n}$$

约束条件:

$$\begin{aligned} \tilde{w}_\alpha(t)x_\alpha^0(t) + \sum_{n=1}^N \tilde{p}_\alpha^n(t)x_\alpha^n(t) &\leq \tilde{w}_\alpha(t)L_\alpha \\ x_\alpha^n(t) &\geq \delta_{\min}^n, n = 0, 1 \\ x_\alpha^n(t) &\geq 0, n = 2, \dots, N \end{aligned}$$

其中:  $\sum_{n=0}^N \gamma_\alpha^n = 1$

$$\delta_{\min}^0 < L_\alpha$$

上式中的参数定义如下:

$\delta_{\min}^n$  是必需品  $n$  的生存数量, 令  $n = 0, 1$ ;

$\gamma_a^n$  是效用函数的参数, 令  $n = 0, \dots, N$ ;

$L_\alpha$  表示主体  $\alpha$  提供劳动力的能力;

$\tilde{W}_\alpha(t)$  表示主体  $\alpha$  在时间  $t$  的主观工资;

$\tilde{p}_\alpha^n(t)$  表示主体  $\alpha$  对商品  $n$  的主观价格, 令  $n=1\dots N$ 。

可行域为空, 如果

$$\tilde{p}_\alpha^1(t) \geq \tilde{w}_\alpha(t)(L_\alpha - \delta_{\min}^0)/\delta_{\min}^1$$

此时, 主体  $\alpha$  计划仅仅消费满足生存条件数量的必需品:

$$\tilde{x}_\alpha^n(t) = \delta_{\min}^n \quad \text{令 } n = 0, 1$$

$$\tilde{x}_\alpha^n(t) = 0 \quad \text{令 } n = 2, \dots, N$$

如果不能满足上述不等式, 那么效用函数的建立将确保最优解中必需品的计划需求会超过其生存数量。但是对于非必需品来说, 这个差值可能是零, 也可能为正。最优解可以用以下的公式表示:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_\alpha^n(t) &= \frac{\gamma_a^n}{\tilde{p}_\alpha^n(t)\lambda_\alpha(t)} + \delta_{\min}^n, \quad n = 0, 1 \\ \tilde{x}_\alpha^n &= \frac{\gamma_a^n}{\tilde{p}_\alpha^n(t)\lambda_\alpha(t)} - \delta^n, \quad \text{Rank}(n) = R' + 1, \dots, N - 1 \\ \tilde{x}_\alpha^n &= 0, \quad \text{Rank}(n) = 1, \dots, R'\end{aligned}$$

其中,

$$\lambda_\alpha(t) \equiv \frac{1 - \sum_{\text{Rank}(n)=1}^{R'} \gamma_a^n}{\tilde{w}_\alpha(t)L_\alpha + \sum_{\text{Rank}(n)=R'+1}^{N-1} \tilde{p}_\alpha^n(t)\delta^n - \tilde{w}_\alpha(t)\delta_{\min}^0 - \tilde{p}_\alpha^1(t)\delta_{\min}^1}$$

非必需品的等级定义如下:

对于所有的  $n, m$ , 其中  $n, m \in \{2, \dots, N\}$ ,

如果  $\frac{\tilde{p}_\alpha^n(t)\delta^n}{\gamma_a^n} > \frac{\tilde{p}_\alpha^m(t)\delta^m}{\gamma_a^m}$  那么,  $\text{Rank}(n) < \text{Rank}(m)$ 。

并且, 为了解题,

若当  $n \neq m$  时,  $\frac{\tilde{p}_\alpha^n(t)\delta^n}{\gamma_a^n} = \frac{\tilde{p}_\alpha^m(t)\delta^m}{\gamma_a^m}$ , 那么, 当  $n < m$  时, 有  $\text{Rank}(n) < \text{Rank}(m)$ 。

要计算  $\tilde{x}_\alpha^0(t), \dots, \tilde{x}_\alpha^N(t)$ , 首先必须定义等级  $R'$ , 以便将那些具有正需求的非必需商品与其他的分开。这样做以后, 就足以计算

$$\frac{\tilde{p}_\alpha^k(t)\delta^k}{\gamma_\alpha^k}(1 - \sum_{\text{Rank}}^k \gamma_\alpha^n) - \sum_{\text{Rank}(n)=k+1}^{N-1} \tilde{p}_\alpha^n(t)\delta^n, k = 0, \dots, N-1$$

当  $R' = k$  时, 若结果小于  $\tilde{w}_\alpha(t)(L_\alpha - \delta_{\min}^0) - \tilde{p}_\alpha^1(t)\delta_{\min}^1$  的值, 那么就停止计算。然后可以求出  $\lambda_\alpha(t)$ , 进而很快计算出  $\tilde{x}_\alpha^0(t), \dots, \tilde{x}_\alpha^N(t)$  的最优取值。

### A. 2. 主体行为: 制订生产计划

主体  $\alpha$  在  $t$  时期内的生产决策用变量  $n_\alpha(t)$  表示, 其中  $n_\alpha(t) = 1 \dots N$ 。当主要粮食的现有存量低于缓冲数量时, 生产计划就会要求生产主要粮食 ( $n_\alpha(t) = 1$ )。生产计划还包括选择生产能最大化主体  $\alpha$  在  $t$  时期的预期净收入  $\tilde{\pi}_\alpha(t)$  的作物。

对于主体  $\alpha$ ,  $t$  时期的预期净收入为:

$$\tilde{\pi}_\alpha(t) = \sum_{n=0}^N (\tilde{p}_\alpha^n(t)y_\alpha^n(t) - \tilde{w}_\alpha(t)(y_\alpha^{L_n}(t) + y_\alpha^{LT_n}(t) + y_\alpha^{LT_l}(t)))$$

式中,

$y_\alpha^{L_n}(t)$  表示生产商品  $n$  时投入的劳力;

$y_\alpha^n(t)$  表示商品  $n$  的预期产量;

$y_\alpha^{LT_n}(t)$  表示为了运输商品  $n$  预期需要投入的劳力;

$y_\alpha^{LT_l}(t)$  表示在工作的途中预期会消耗的劳力。

生产运输函数如下:

$$\begin{aligned} y_\alpha^n(t) &= \bar{\alpha}_\alpha^n(t)y_\alpha^{L_n}(t) \\ y_\alpha^{LT_n}(t) &= \bar{\alpha}_\alpha^n(t)y_\alpha^{L_n}(t)a^{T_n}d_{\alpha\alpha} \\ y_\alpha^{LT_l}(t) &= y_\alpha^{L_n}(t)a^{T_L}d_{\alpha\alpha} \end{aligned}$$

式中  $\bar{\alpha}_\alpha^n(t)$ ,  $a^{T_n}$ ,  $a^{T_L}$  是生产运输函数的参数;  $d_{\alpha\alpha}$  表示主体的家与领土之间的距离。

将生产运输函数代入预期净收入的表达式:

$$\tilde{\pi}_\alpha(t) = \sum_{n=0}^N y_\alpha^{L_n}(t)(\tilde{p}_\alpha^n(t)\bar{\alpha}_\alpha^n(t) - \tilde{w}_\alpha(t)(1 + \bar{\alpha}_\alpha^n(t)a^{T_n}d_{\alpha\alpha} + a^{T_L}d_{\alpha\alpha}))$$

令  $\bar{\alpha}_\alpha^{L_n}(t) \equiv 1 + \bar{\alpha}_\alpha^n(t)a^{T_n}d_{\alpha\alpha} + a^{T_L}d_{\alpha\alpha}$

$$\tilde{\pi}_\alpha(t) = \sum_{n=0}^N y_\alpha^{L_n}(t)(\tilde{p}_\alpha^n(t)\bar{\alpha}_\alpha^{L_n}(t) - \tilde{w}_\alpha(t)\bar{\alpha}_\alpha^{L_n}(t))$$

上述表达式可以简化为:

$$\pi_\alpha(t) = (L_\alpha - \bar{x}_\alpha^L(t)) \sum_{n=0}^N (\tilde{p}_\alpha^n(t) \bar{\alpha}_\alpha^n(t) / \bar{\alpha}_\alpha^{ln}(t) - \bar{w}_\alpha(t))$$

既然对劳动力的总需求(包括闲暇、生产和运输三个方面)等于总供给,那么

$$\bar{x}_\alpha^L(t) + y_\alpha^{ln}(t) + y_\alpha^{LT_n}(t) + y_\alpha^{LT_l}(t) = L_\alpha$$

即,  $y_\alpha^{ln}(t) = (L_\alpha - \bar{x}_\alpha^L(t)) / \bar{\alpha}_\alpha^{ln}(t)$

因而我们定义  $\delta_{buffer}^l$  为必需品的最低库存量,那么生产计划可以表示为

$$\begin{cases} n_\alpha(t) = 1, & s_\alpha^l(t) < \delta_{buffer}^l \\ n_\alpha(t) = n^*, & \text{其他} \end{cases}$$

式中,  $n^*$  表示当  $n$  取  $n^*$  时,表达式

$\max_n((L_\alpha - \bar{x}_\alpha^L(t))(\tilde{p}_\alpha^n(t) \bar{\alpha}_\alpha^n(t) / \bar{\alpha}_\alpha^{ln}(t) - \bar{w}_\alpha(t)))$  取得最大值。

因此,  $\begin{cases} y_\alpha^{ln^*}(t) = (L_\alpha - \bar{x}_\alpha^L(t)) / \bar{\alpha}_\alpha^{ln^*}(t) \\ y_\alpha^{ln}(t) = 0, \text{ 若 } n \neq n^* \end{cases}$

### A.3. 产量

产量由选择的庄稼、投入的劳力和一个关于天气的随机变量决定:

$$y_\alpha^n(t) = \begin{cases} a^{Mn} y_\alpha^{ln}(t) / (y_\alpha^{ln}(t) + a^n + randnorm(0, a^m)), & n = n^* \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

### A.4. 主体行为: 市场供给和市场需求

主体  $\alpha$  在  $t$  时期内向市场供给或者需求的农产品数量是由前期剩余的库存已转入本期,加上  $t$  时期内作物的产量再减去计划需求量的结果决定的。如果结果非负,它就是主体  $\alpha$  在  $t$  时期内提供给市场的作物的数量,反之则表示对市场的需求。因此,

$$z_\alpha^{sup,n}(t) = \max(s_\alpha^n(t) + y_\alpha^n(t) - \bar{x}_\alpha^n(t), 0), n = 1, \dots, N$$

$$z_\alpha^{dem,n}(t) = \max(\bar{x}_\alpha^n(t) - s_\alpha^n(t) - y_\alpha^n(t), 0), n = 1, \dots, N$$

式中,  $n = 1, \dots, N$ ;  $z_\alpha^{sup,n}(t)$  表示主体  $\alpha$  在  $t$  时期内供给的商品  $n$  的数量;  $z_\alpha^{dem,n}(t)$  表示主体  $\alpha$  在  $t$  时期内对商品  $n$  的需求数量。

### A.5. 市场交易

假设(29)~(34)中描述的市场机制包括了主体之间的交易,满足以下条件:

$$\sum_{\beta \in A(t)} z_\beta^n \leq Z_\alpha^{dem}(t)$$

$$\sum_{\beta \in A(t)} z_{\beta\alpha}^n \leq Z_{\alpha}^{\sup n}(t)$$

式中  $z_{\beta\alpha}^n$  表示在  $t$  时期内  $\beta$  卖给  $\alpha$  的商品  $n$  的数量;  $A(t)$  代表  $t$  时期内活着的主体的集合。

主体  $\alpha$  在  $t$  时期内采购的总值还要满足持有的现金的约束:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{\beta \in A(t)} \tilde{p}_{\beta}^n(t) z_{\beta\alpha}^n(t) \leq C_{\alpha}(t)$$

式中,  $C_{\alpha}(t)$  代表主体  $\alpha$  在  $t$  时期内持有的现金。

#### A.6. 现金、工资和价格

主体  $\alpha$  转入  $t+1$  时期的现金数量等于主体  $\alpha$  挣得的以及所有没有花费的现金的总和:

$$C_{\alpha}(t+1) = C_{\alpha}(t) - \sum_{n=1}^N \sum_{\beta \in A(t)} \tilde{p}_{\beta}^n(t) z_{\beta\alpha}^n(t) + \sum_{n=1}^N \sum_{\beta \in A(t)} \tilde{p}_{\alpha}^n(t) z_{\alpha\beta}^n(t)$$

主体  $\alpha$  的主观价格根据市场的客观情况不断更新。主体  $\alpha$  在  $t$  时期愿意为商品  $n$  支付的加权平均价格为:

$$(\sum_{\beta \in A(t)} \tilde{p}_{\beta}^n(t) z_{\beta\alpha}^n(t)) / (\sum_{\beta \in A(t)} z_{\beta\alpha}^n(t))$$

而  $t+1$  时期的主观价格等于该数据以及以前的价格的加权平均值:

$$\tilde{p}_{\alpha}^n(t+1) = \theta_{\alpha 0} \tilde{p}_{\alpha}^n(t) + \theta_{\alpha 1} (\sum_{\beta \in A(t)} \tilde{p}_{\beta}^n(t) z_{\beta\alpha}^n(t)) / (\sum_{\beta \in A(t)} z_{\beta\alpha}^n(t))$$

式中  $n = 1, \dots, N$ ;  $\theta_{\alpha 0} + \theta_{\alpha 1} = 1$ 。

类似的, 主观工资率会随当前劳动力的主观价值的变化而变化:

$$\tilde{w}_{\alpha}(t+1) = \psi_{\alpha 0} \tilde{w}_{\alpha}(t) + \psi_{\alpha 1} (\tilde{p}_{\alpha}^n(t) y_{\alpha}^n(t)) / (L_{\alpha} - \tilde{x}_{\alpha}^0(t))$$

式中,  $\psi_{\alpha 0} + \psi_{\alpha 1} = 1$ 。

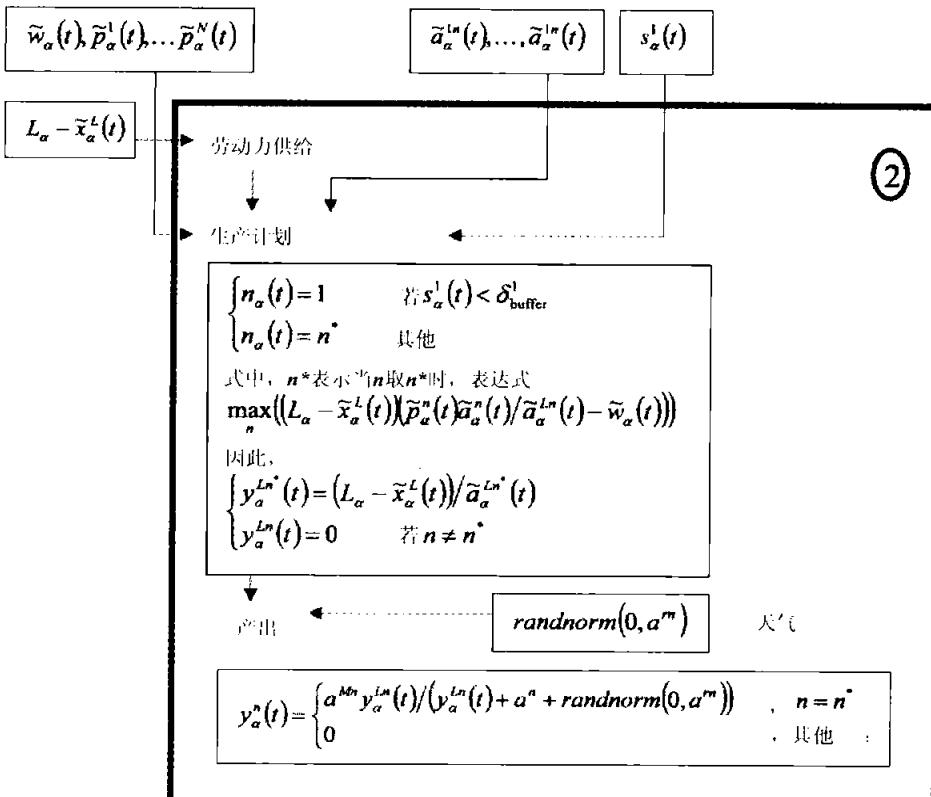
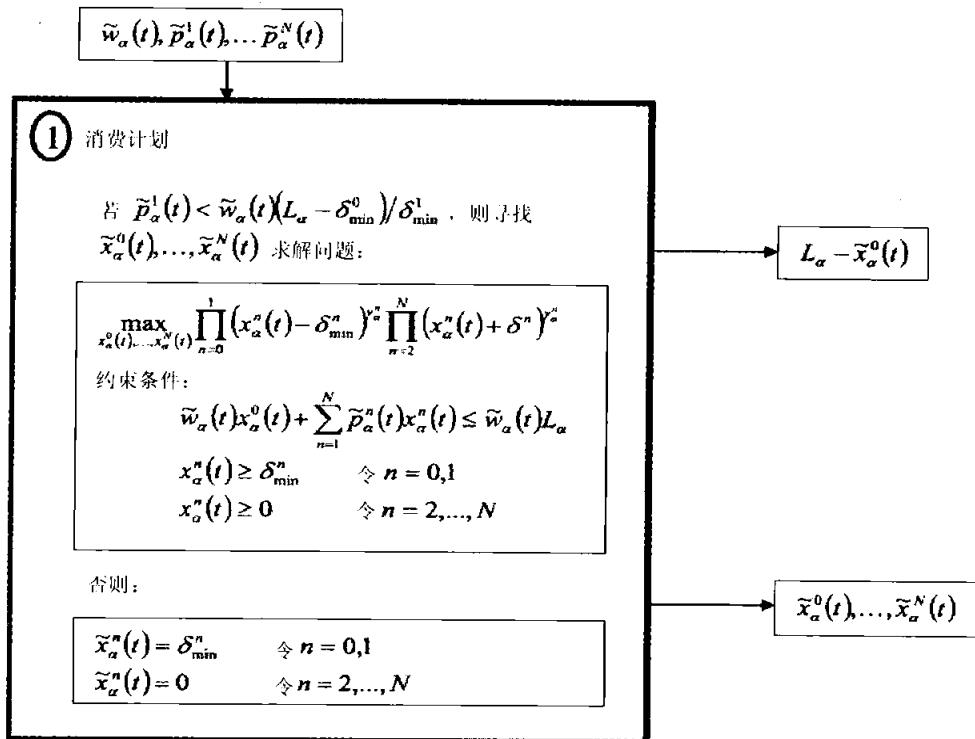
#### A.7. 生产参数

最后, 主体  $\alpha$  对于生产参数的估计会随着所有的  $\alpha$ 、 $n$  和  $t$  的变化而变化:

$$\left. \begin{aligned} \bar{a}_{\alpha}^n(t) &= \omega_{\alpha 0} \bar{a}_{\alpha}^n(t-1) + \omega_{\alpha 1} y_{\alpha}^n(t) / y_{\alpha}^{ln}(t), \quad n_{\alpha}(t-1) = n \\ \bar{a}_{\alpha}^n(t) &= \bar{a}_{\alpha}^n(t-1), \text{ otherwise} \end{aligned} \right\}$$

式中  $\omega_{\alpha 0} + \omega_{\alpha 1} = 1$

## 附录 B



## 参考文献

- Batty, M., 1991. Cities as fractals: simulation growth and form. In: Grilly, A. J., Earnshaw, R. A., Jones, H. (Eds.), *Fractals and Chaos*, 3. Spring Verlag, New York, pp. 43~69.
- Batty, M., Longley, P., 1994. *Fractal Cities*. Academic Press Inc., San Diego.
- Batty, M., Couclelis, H., Eichen, M., 1997. Urban systems as cellular automata. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24. 2, 159~305.
- Benenson, I., 1998. Multi-agent simulations of residential dynamics in the city. *Computers, Environment and Urban Systems* 22. 1, 25~42.
- Benenson, I., Portugali, J., 1997. Agent-based simulations of a city dynamics in a GIS environment. In: Hirtle, S. C., Frank, A. U. (Eds.), *Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS*. Springer, Berlin.
- Benenson, I., Torrens, P. M., 2004. *Geosimulation: Automata-Based Modelling of Urban Phenomena*. John Wiley and Sons, Chichester.
- Clarke, K. C., Gaydos, L., Hoppen, S., 1996. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B, Planning and Design* 24. 2, 247~261.
- Clarke, K. C., Gaydos, L., 1998. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Systems* 12. 7, 699~714.
- Couclelis, H., 1997. From cellular automata to urban models: New principles for model development and implementation. *Environment and Planning B, Planning and Design* 24. 2, 165~174.
- Dean, J. S., Gumerman, G. J., Epstein, J. M., Axtell, R. L., Swedlund, A. C., Parker, M. T., McCarroll, S., 2000. Understanding anasazi culture through agent-based modelling. In: Kohler, T. A., Gumerman, G. J. (Eds.), *Dynamics in Human and Primate Societies: Agent-Based Modelling of Social and Spatial Processes*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Oxford University Press, New York.
- Ellis, F., 1993. *Peasant Economics: Farm Households and Agrarian Development*, second ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- Epstein, J. M., Axtell, R., 1996. *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. The Brookings Institution Press and MIT Press, Washington DC and Cambridge, MA.
- Gilbert, N., Troitzsch, K. G., 1999. *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press, Buckingham.
- Halsey, T. C., 2001. Diffusion-limited aggregation: a model for pattern formation. *Physics Today* 53(11), 36~44.
- Heudin, J.-C., 1999. Virtual worlds. In: Heudin, J.-C. (Ed.), *Virtual Worlds: Synthetic Universes, Digital Life, and Complexity*. Perseus Books, Massachusetts, pp. 1~28.
- Kohler, T. A., Gumerman, G. J. (Eds.), 2000. *Dynamics in human and primate societies*.

- agent-based modelling of social and spatial processes. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Oxford University Press, New York.
- Lake, M. W., 2000. MAGICAL computer simulation of Mesolithic foraging. In: Kohler, T. A., Gumerman, G. J. (Eds.), Dynamics in Human and Primate Societies: Agent-Based Modelling of Social and Spatial Processes. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Oxford University Press, New York.
- Langton, C. G., 1988. Artificial life. In: Langton, C. G. (Ed.), Artificial Life SFI Studies in the Sciences of Complexity. Addison-Wesley, Massachusetts, pp. 1~16.
- Longley, P. A., Batty, M., Shepherd, J., 1991. The size, shape and dimension of urban settlements. *Transactions of the Institute of British Geographers* 16, 75~94.
- O'Sullivan, D., 2001a. Exploring spatial process dynamics using irregular cellular automaton models. *Geographical Analysis* 33, 1, 1~18.
- O'Sullivan, D., 2001b. Graph-cellular automata: a generalised discrete urban and regional model. *Environment and Planning B: Planning and Design* 28, 5, 687~705.
- Parker, D. C., Manson, S. M., Janssen, M. A., Hoffmann, M. J., Deadman, P., 2003. Multi-agent system models for the simulation of land-use and land-cover change: a review. *Annals of the Association of American Geographers* 93(2).
- Ravallion, M., 1987. Markets and Famines. Clarendon Press, Oxford.
- Razin, A., 1995. Population economics. MIT Press, Cambridge, MA.
- Sen, A., 1981. Poverty and Famines: An Essay on Entitlement and Deprivation. Clarendon Press, Oxford.
- Takeyama, M., Couclelis, H., 1997. Map dynamics: Integrating cellular automata and GIS through geo-algebra. *International Journal of Geographical Information Science* 11, 73~91.
- Tesfatsion, L., 2002. Agent-based computational economics: Growing economies from the bottom up. *Artificial Life* 8(1), 55~82.
- Ward, D., Murray, A., Phinn, S., 2003. Integrating cellular automata and spatial optimisation for evaluating rapidly urbanising regions. *Annals of Regional Science* 37, 131~148.
- White, R., Engelen, G., 1997. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24, 2, 235~246.
- White, R., Engelen, G., 2000. High-resolution integrated modeling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems* 24, 383~400.
- White, R., Engelen, G., Uljee, I., 1997. The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land use dynamics. *Environment and Planning B* 24, 323~343.
- Witten, T. A., Sander, L. M., 1981. Diffusion-limited aggregation: a kinetic critical phenomenon. *Physical Review Letters* 47, 1400~1403.
- Witten, T. A., Sander, L. M., 1983. Diffusion-limited aggregation. *Physical Review B* 27, 5686~5697.
- Wooldridge, M., 2002. An Introduction to Multi-Agent Systems. John Wiley and Sons, Chichester.

## 第 17 章

# 模拟非典：基于小世界网络的传染病模型和公共卫生政策评估<sup>①</sup>

2003 年，一场突如其来的非典型性肺炎(SARS)席卷了大半个中国，肆虐全球，不仅对人民群众身体健康和生命安全构成了严重威胁，还给世界经济和社会发展带来了严重冲击。各国专家和教授对非典感染源、药物开发等展开了一系列的研究。台湾长庚大学的黄崇源博士等人从社会科学的角度出发，运用计算实验的方法，以小世界网络模型为背景，利用元胞自动机与日常交互的社会网络的镜像来模拟流行病学的情况。该模型用于模拟新加坡、中国台湾、多伦多 SARS 传播的动态演化过程，并讨论了这些城市每个公共卫生政策的成效。他们认为该模型还能够根据各卫生当局的需要应用于流感、肠病毒、艾滋病以及其他传染性疾病。本章是对小世界网络传播传染病模型应用的详细描述：

## 17.1 引 论

为了预测非典型性肺炎(SARS)的再次爆发(Peiris et al. 2003)，分子生物学家、流行病学家、社会学家、私人实验室和公共卫生机构都花费了非常多的时间和资源去确定病毒结构，开发疫苗和药物，建立更快的检查检测方法和改进已有的公共卫生政策(Anand et al. 2003; Chowell et al. 2003; Donnelly et al.

<sup>①</sup> Originally published in English as: Chung-Yuan Huang, Chuen-Tsai Sun, Ji-Lung Hsieh and Holin Lin (2004) ‘Simulating SARS: Small-World Epidemiological Modeling and Public Health Policy Assessments’, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 7 (4) <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/4/2.html>>. 已取得授权，授权方：JASSS。

2003; Guan et al. 2003; Lipsitch et al. 2003; Marra et al. 2003; Ng et al. 2003; Nishiura et al. 2003; Riley et al. 2003; Rota et al. 2003)。本章重点关注上述的最后一个主题,尤其是各种公共卫生政策的效果。

公共卫生政策最可能方案的确定需要了解 SARS 传播动力学的具体知识,这些知识基于 2002—2003 年非典爆发时收集的有限的数据而建立(Sebastian and Hoffmann 2003; 世界卫生组织[WHO] 2003)。这些信息可以用来建立一个控制未来非典爆发时(WHO 2003)平衡社会成本和资源消耗的 SARS 传播模型(Dye and Gay 2003)。在 2002—2003 年实施的政策包括戴口罩(公众和卫生保健/医院工作者)、洗手、隔离、探病的限制和大范围地为市民测量体温。不幸的是,不恰当的措施和不适宜的时机有时候会产生一些诸如隐瞒病情、对非典病人和卫生保健工作者的社会歧视以及恐慌性购买口罩等副作用。

越来越多的计算模型被应用于寻找与当地人口特征相匹配的公共卫生政策。除了有关疾病传播的信息之外,恰当的非典模拟模型还需要现代社会网络如何运作的精确数据(Dye and Gay 2003),例如,人类的聚集行为、潜在的多重接触和长距离的移动。本章将要描述的模型是元胞自动机(对个体交互的直接模拟)(Boccara et al. 1994)和一个我们已经提出并命名为镜像的概念的结合,它使得模型能够考虑低分离度、长距离的移动和固定场所的日常访问等参数。综合起来,这些因素有助于建立一个具有小世界特性的真实 SARS 模拟平台。我们认为这个模型对其他传染病(如流感、肠病毒和艾滋病)和社会问题(例如信息传播问题)也具有潜在用途。

## 17.2 相关的传染病模型

### 17.2.1 SIR 仓室模型

对于物理学家和流行病学家,研究传染病传播的最普遍的方法是利用微分方程(Kermack and Mckendrick 1927; Edelein-Keshet 1988)或随机过程建立模拟模型。典型的微分方程方法是由 Kermack 和 McKendrick 开发的 SIR 仓室模型(图 17.1)。这类模型有两个优点:第一它能够很容易地用一组数学方程和函数表达;第二它允许对相关参数和变量进行简化。除了模拟传染病传播动力学之外,这些模型还被用作建立为确定疾病传播潜力——即一个应被考虑的基本流行病参数病毒传播数目  $R_0$ ——而计算的临界值的数值分析方法和工具(Anderson and May 1982)。 $R_0$  提供了一幅传染病传播模式和潜在社会问题的画卷,公共卫生机构可据此制定政策并提出传染病的预防策略。

### 17.2.3 小世界社会网络模型

1998年,Watts 和 Strogatz(1998a)借鉴了心理学家 Stanley Milgram(1967)提出的社会个体多重交互中存在小世界现象的思想,建立了一个抽象无序的网络模型。如今这个社会网络的拓扑结构对一个社会问题的发展和结果产生重大影响的观点已经被普遍接受。例如,大众的观点和社会规范是怎样形成的,财富是怎样分配的,新的概念和文化特征是怎样引领时尚潮流的,以及一个传染性疾病的个例是怎样发展成大规模的流行病的(Keeling 1999; Moore and Newman 2000; Newman 2002; Wang and Chen 2003; Watts 1998b)。因此,小世界特性被认为是分析社会和流行病模型的重要参数。

除了聚类、低分离度、多重活动位置以及长距离的移动等人类特征之外,实际的地理位置和距离被认为是影响具有小世界网络特性社会疾病传播的又一个因素。然而,我们发现大多数利用 Watts 和 Strogatz 的小世界社会网络模型所作的传染疾病传播动力学的研究(包括例如 Boccara and Cheong 1992, 1993; Boccara et al. 1993; Boccara et al. 1994; Eguiluz and Klemm 2003; Kleczkowski and Grenfell 1999; Kuperman and Abramson 2001; Miramontes and Luque 2002; Moreno et al. 2002; Newman 2000; Newman et al. 2002; Sirakoulis et al. 2000)仅仅局限在如何考虑社会网络的影响的方面。特别是我们注意到缺少一个真实的小世界网络模型和用于展现大范围传染病的日常接触关系的模拟平台,大部分的研究仍然局限在有特殊传播动力学的个体疾病上(例如艾滋病)。我们的目标是建立一个基于日常接触的小世界网络模型,这样公共卫生机构就能够快速建立一个防止传染性疾病广泛传播的流行病预防策略。

## 17.3 构建的模型

我们所构建的模型包括两个层面。上层是一个多主体的系统,用来模拟现实世界的异质性群体。下层包含了一个二维的元胞自动机(即二维周期性环绕晶格),用来表明现实世界的活动空间。这两个层面之间用镜像的概念相连接,就得到一个用来分析传染性疾病传播动力学和社会问题的小世界网络模型。

### 17.3.1 带镜像的元胞自动机(CAMIM)

镜像是在现代社会人类在一定范围内的相互接触和日常活动基础上抽象出来的概念。它特别指出了个体的社会特征(例如,长距离的移动、每天对固定地

续 表

属性	类型	描述	值域
<i>Count</i>	整数	记录主体的镜像的个数；每个主体至少有 1 个最多 M 个镜像。这些数字服从正态分布。	1~M
<i>MirrorIdentity</i>	集合	包含镜像的数据结构；至少包含一个。	
<i>Age</i>	符号	在构建的模型中，主体根据年龄划分为以下几类：年轻人（1 到 20 岁）、青壮年（21 到 60 岁）、老年（60 岁以上）。当一个模拟系统被初始化后，主体的年龄根据参数 $Rate_{Young}$ 、 $Rate_{Prime}$ 和 $Rate_{Old}$ 被随机分配。	年轻人、青壮年、老年
<i>Super</i>	布尔	代表一个主体是不是一个超级传染者。如果是，把 Super 设置为“真”；否则设置为“假”。当模拟系统被初始化后，参数 $Rate_{Super}$ 决定了哪些主体是超级传染者。	真，假
<i>Immunity_Permanent</i>	布尔	决定一个主体是不是永久免疫。如果是，把 $Immunity_{Permanent}$ 设为“真”；否则设为“假”。当模拟系统被初始化后，参数 $Rate_{PermanentImmunity}$ 被用来决定主体是否永久免疫。	真，假
<i>Day</i>	整数	三个流行病状态持续的天数。如果一个已感染的主体还没有康复， <i>Day</i> 被用来表示感染的天数；对于已经康复的主体， <i>Day</i> 用来表示从完全康复以来的天数。如果一个康复的主体有了临时抗体， <i>Day</i> 被用来表示免疫期。	
<i>Rate_Contact</i>	实数	与其他主体接触的频率。对于所有的主体而言， $Rate_{Contact}$ 服从正态分布。	0~1
<i>WearingMask</i>	布尔	决定哪个主体戴口罩。如果是，把 <i>WearingMask</i> 设为“真”；否则设为“假”。当模拟系统被初始化后，所有主体的 <i>WearingMask</i> 属性预设为“假”。当戴口罩政策颁布后（对大众或医疗工作者），参数 $Rate_{Participation}$ 决定了哪些主体戴口罩。	真，假
<i>MaskType</i>	实数	决定了主体戴口罩的平均预防级别。数字越高（接近于 1），效果越好。	0~1
<i>Quarantined_Day</i>	整数	家庭隔离的天数，范围从 0 到 <i>Policy.Parameter.DayQuarantine</i> 。	

表 17.2 镜像属性

属性	类型	描述	值域
<i>Root</i>	布尔	每个主体都有一个根属性为“真”的镜像；对于所有其他的镜像，根属性为“假”。根镜像被用于模拟专门的活动地点——例如，家庭、医院和宿舍。	真，假
<i>Suspend</i>	布尔	当模拟系统被初始化后，对于所有主体的镜像 <i>Suspend</i> 都为“假”，表明所有的镜像都可以不受限制地随便移动。除了它的根镜像，对于一个处于家庭隔离或康复期的主体来说所有的镜像的 <i>Suspend</i> 被设置为“真”。这表明这个主体不能随便移动，除非家庭隔离或康复期过了。如果主体死了，对于所有的镜像 <i>Suspend</i> 都为“真”（包括根镜像），表明这个主体不再访问其他地点。	真，假

续 表

属性	类型	描述	值域
<i>Location</i>	(整数, 整数)	第一个数代表了 X 坐标第二个数代表了 Y 坐标, 用来确定一个镜像在二维晶格中的位置。每个镜像有唯一的一个坐标位置; 换句话说, 每个坐标位置仅包含一个主体的一个镜像。	
<i>Neighbor</i>	集合	代表一个主体的 8 个镜像的坐标位置。大多数模拟系统中应用的摩尔近邻和冯诺依曼近邻。在摩尔系统中, 每个镜像被定义为有 8 个相邻的主体; 在冯诺依曼系统中有 4 个。我们认为摩尔近邻的定义适合我们的 SARS 模拟实验。	

在我们的模型中, 一个离散的时间步长代表了现实世界中的一天。在每一个离散时间步长里主体的状态和他们的镜像同时改变且每个主体的镜像和它周围的镜像相接触。主体及其镜像和周围的镜像的属性按照上述的相互作用的规则而变化。因此, 元胞自动机和镜像的结合能够显示出多重的社会网络特征: 每天固定的访问地点、长距离的移动、局部的聚集、高的聚类度和低分离度。

表 17.3 模拟系统和流行病感染参数

属性	类型	描述
$Population_{Agent}$	集合	在模拟系统中存储总的主体数量; 最大容量为 P
P	整数	主体总数
M	整数	一个主体镜像数量的上限
H	整数	元胞自动机中二维晶格的高度
W	整数	元胞自动机中二维晶格的宽度
N	整数	元胞自动机中可用的 $H * W$ 晶格的总数
$Day_{incubation}$	整数	潜伏期的平均天数
$Day_{infectious}$	整数	感染期的平均天数
$Day_{recovered}$	整数	康复期的平均天数
$Day_{immune}$	整数	对疾病的暂时免疫; 潜伏期的平均天数
$Rate_{Super}$	实数	总人口中的超级传播者的百分比
$Rate_{Young}$	实数	总人口中的年轻人主体(0~20岁)的百分比
$Rate_{Prime}$	实数	总人口中的青壮年主体(21~60岁)的百分比
$Rate_{Old}$	实数	总人口中的老年人主体(60岁及以上)的百分比
$Rate_{Foreverimmune}$	实数	总人口中永久免疫主体的百分比
$Rate_{Infection}$	实数	平均感染率
$Rate_{Death}$	实数	平均死亡率

表 17.4 公共卫生政策参数

政策	属性	类型	描述	值域
大众戴口罩政策	$Rate_{Participation}$	实数	政策参与率	0~1
	$Rate_{Prevention}$	实数	传染病预防率	0~1
医疗保健者戴口罩政策	$Rate_{Participation}$	实数	政策参与率	0~1
	$Rate_{Prevention}$	实数	传染病预防率	0~1
体温测量	$Rate_{Detection}$	实数	发烧检测成功率	0~1
	$Rate_{Participation}$	实数	措施参与率	0~1
家庭隔离	$Class$	符号	A 类和 B 类检疫	A, B
	$Day_{Quarantined}$	整数	家庭隔离的天数	0~1
	$Rate_{Participation}$	实数	政策参与率	0~1
限制医院探视	$Rate_{Participation}$	实数	政策参与率	0~1
减少公共接触	$Rate_{Participation}$	实数	政策参与率	0~1

表 17.5 模拟中国台湾、新加坡和多伦多的 SARS 传播曲线的输入数据

类别	属性	类型	描述	值域
病例导入	$Time Point$	日期	病例发生的日期	
	$Amount$	整 数	病人的数量	0~999
	$Phase$	符 号	导入时处于潜伏期还是发病期	潜伏期, 感染期
	$Superspread$	布 尔	决定一个病人是否是超级传播者	真, 假
公共卫生政策	$Related Attributes$	见表 17.4		
运行	$Day$	整 数	模拟的天数	0~99

### 17.3.2 模拟传染特征

#### 1. 从接触到感染了症状

通过一个调整过的接触频率( $Agent. Parameter. Rate_{Contact}$ )和一个随机的数字  $c$ , 每个主体的镜像决定是否和它的 8 个相邻镜像单独接触。如果  $c$  比接触频率小, A 主体的镜像就和它相邻的 B 主体的镜像相接触。接触频率  $Agent. Parameter. Rate_{Contact}$  取决于“减少公共接触”的政策或其他参数设置是否被实施。我们把上述这些概念用伪代码表示如下:

```

for each A ∈ PopulationAgent do
    for each I ∈ AgentA. SetMirrorIdentity do
        if (AgentA. MirrorIdentityI. AttributeSuspend = False) then
            for each J ∈ AgentA. MirrorIdentityI. SetNeighbor do
                c←Random(0, 1) // c ∈ [0, 1]
                if(c ≤ Adjust(AgentA. Parameter. RateContact)) then
                    Infect(AgentA. MirrorIdentityI, Agent. MirrorIdentityJ).

```

假设 A 主体有一个镜像和 B 主体的一个镜像相邻, A 主体已经被感染并且具有传染性,B 主体既易受感染也易感染其他主体。当两个主体接触时,感染率 (System. Parameter. Rate<sub>Infection</sub>) 和一个随机数字 n 共同决定了 B 主体是否被 A 主体感染。如果 n 比感染率小,则 B 主体的状态变为 N(潜伏期),时期属性 (Agent. Attribute<sub>Day</sub>) 变为 1(即表示症状尚未显现出来且主体 B 无法传播此疾病)。感染率 System. Parameter. Rate<sub>Infection</sub> 是由诸如免疫率这样的因素所决定的,也就是说 A 是否是超级传播者(CDC 2003b; Sebastian and Hoffmann 2003)取决于他是否处于家庭隔离、医院隔离状态。

```

if(Contact(AgentA. MirrorIdentityI, AgentB. MirrorIdentityJ))then
    if (AgentA. Attributeg = I ∧ AgentB. Attributeg = S)then
        n←Random(0, 1) // n ∈ [0, 1]
        if(n ≤ Adjust(System. Parameter. RateInfection))then
            AgentB. Attributeg←N // N means incubation
            AgentB. Attributeday←1

```

一旦 A 度过潜伏期 System. Parameter. Day<sub>Incubation</sub>, A 主体的传染状态即自动的从 N 变为 I(已感染状态)。

```

if (AgentA. AttributeI = N)then
    if(AgentA. AttributeDay > System. Parameter. DayIncubation)then
        AgentA. AttributeI←I //I means Infections

```

当 A 主体的传染状态是 I 并且它已经度过了传染期 System. Parameter. Day<sub>Infectious</sub>, 调整过的死亡率 (System. Parameter. Rate<sub>Death</sub>) 和一个随机数字 d 共同决定了主体是进入 D(死亡)还是 R(康复)状态。死亡率由年龄因素、主体在潜伏期和感染期是否被置于家庭隔离状态、是否在医院隔离治疗和他在生病期间的公众活动(如果有)等这些因素共同决定。

```

if (AgentA. AttributeI=I)then
    if (AgentA. AttributeDay>System. Parameter. Day(Incubation+Infectious))then
        d←Random(0, 1)//d means death rate

```

```

if( $d \leqslant \text{Adjust}(\text{System. Parameter. Rate}_{\text{Death}})$ ) then
   $\text{Agent}_A. \text{Attribute}_I \leftarrow D // D$  means Died
   $\text{Agent}_A. \text{Attribute}_{\text{Day}} \leftarrow 0$ 
else
   $\text{Agent}_A. \text{Attribute}_I \leftarrow R // R$  means Recovered
   $\text{Agent}_A. \text{Attribute}_{\text{Day}} \leftarrow 1$ 

```

当 A 主体的传染状态是 R 并度过了康复期  $\text{System. Parameter. Day}_{\text{Recovered}}$  时, 它自动地进入了 M(免疫)状态。

```

if ( $\text{Agent}_A. \text{Attribute}_I = R$ ) then
  if ( $\text{Agent}_A. \text{Attribute}_{\text{Day}} > \text{System. Parameter. Day}_{\text{Recovered}}$ ) then
     $\text{Agent}_A. \text{Attribute}_I \leftarrow M // M$  means Immune

```

在 M 状态时, 参数  $\text{Agent. Attribute}_{\text{ForeverImmune}}$  用于决定 A 主体的免疫是永久的还是暂时的, 也就是说, 是完全康复还是会被再次感染取决于  $\text{System. Parameter. Day}_{\text{Immune}}$ 。

```

if ( $\text{Agent}_A. \text{Attribute}_I = M \wedge \text{not } \text{Agent}_A. \text{Attribute}_{\text{ForeverImmune}}$ ) then
  if ( $\text{Agent}_A. \text{Attribute}_{\text{Day}} > \text{System. Parameter. Day}_{\text{Immune}}$ ) then
     $\text{Agent}_A. \text{Attribute}_I \leftarrow S // S$  means Susceptible
     $\text{Agent}_A. \text{Attribute}_{\text{Day}} \leftarrow 0$ 

```

## 2. 家庭和医院

我们构建的模型也可以再现家庭、集体宿舍和医院这些地方。如表 17.2 所示, 所有的镜像都有 2 个特有属性: 根属性和等待属性。对于大部分的主体来说, 一个镜像的根属性被设置为“真”而它的其他镜像的根属性被设置为“假”。相反, 一个主体的所有镜像的等待特征被设置为“假”。为了方便以后的讨论, 我们假定存在一个根镜像(rooted mirror identity), 即根属性总是被设置为“真”的镜像。根镜像用来唯一表示如家庭、宿舍或医院之类的场所。

```

for each  $A \in \text{Population}_{\text{Agent}}$  do
  for each  $I \in \text{Agent}_A. \text{Set}_{\text{MirrorIdentity}}$  do
     $\text{Agent}_A. \text{MirrorIdentity}_I. \text{Attribute}_{\text{Suspend}} \leftarrow \text{False}$ 
     $\text{Agent}_A. \text{MirrorIdentity}_I. \text{Attribute}_{\text{Root}} \leftarrow \text{False}$ 
     $n \leftarrow \text{Random}(1, \text{Count}(\text{Agent}_A. \text{Set}_{\text{MirrorIdentity}}))$ 
     $\text{Agent}_A. \text{MirrorIdentity}. \text{Attribute}_{\text{Root}} \leftarrow \text{True}$ 

```

如果卫生当局强制 A 主体实施家庭隔离, 那么它的所有的镜像的等待属性(工作场所、学校、汽车站等)被设置为“真”, 但是 A 主体根属性的镜像也就是家庭例外。A 的根属性的镜像周围的晶格点代表了家庭成员和同居者的镜像。一

一旦家庭隔离被解除,这些镜像的等待属性(除了根镜像)就会变回“假”,即表示 A 主体已经恢复正常。

```

if (IsQuarantine( $Agent_A$ )) then
     $Agent_A.$  AttributeMobility  $\leftarrow$  Quarantined
    for each I  $\in$   $Agent_A.$  SetMirrorIdentity do
        if ( $Agent_A.$  MirrorIdentityI. AttributeRoot = False) then
             $Agent_A.$  MirrorIdentityI. AttributeSuspend  $\leftarrow$  True
    if (not IsQuarantine( $Agent_A$ )) then
         $Agent_A.$  AttributeMobility  $\leftarrow$  Free
        for each I  $\in$   $Agent_A.$  SetMirrorIdentity do
             $Agent_A.$  MirrorIdentityI. AttributeSuspend  $\leftarrow$  False

```

我们认为模型的另一个优势是它不需要用固定的晶格点区域表示医院。假设处于 I 传染状态的主体 B 自动地进入隔离状态。跟前面的例子相似,除了它的根镜像,B 主体的所有镜像的等待特征转变为“真”。这表示了这样一个情景,B 主体在医院接受隔离治疗,同时主体一切户外的活动都停止了。B 主体的根镜像周围的晶格点代表了医疗人员、护士、卫生保健工作者或者可能是它的家庭成员。如果 B 主体康复了,被感染的镜像的等待属性变为“假”,表示 B 主体可以恢复正常活动。如果主体死了,则 B 主体的所有镜像(包括它的根镜像)的等待属性都永久地变为“假”,表示主体的所有活动永久性停止。

```

if (Isolated( $Agent_A$ )) then
     $Agent_A.$  AttributeMobility  $\leftarrow$   $Agent_A.$  AttributeMobility + Isolated
    for each I  $\in$   $Agent_A.$  SetMirrorIdentity do
        if ( $Agent_A.$  MirrorIdentityI. AttributeRoot = False) then
             $Agent_A.$  MirrorIdentityI. AttributeSuspend  $\leftarrow$  True
    if (not Isolated( $Agent_A$ )  $\wedge$   $Agent_A.$  AttributeI = R) then
         $Agent_A.$  AttributeMobility  $\leftarrow$   $Agent_A.$  AttributeMobility - Isolated
        for each I  $\in$   $Agent_A.$  SetMirrorIdentity do
             $Agent_A.$  MirrorIdentityI. AttributeSuspend  $\leftarrow$  False
    if (not Isolated( $Agent_A$ )  $\wedge$   $Agent_A.$  AttributeI = D) then
         $Agent_A.$  AttributeMobility  $\leftarrow$   $Agent_A.$  AttributeMobility - Isolated
        for each I  $\in$   $Agent_A.$  SetMirrorIdentity do
             $Agent_A.$  MirrorIdentityI. AttributeSuspend  $\leftarrow$  True

```

### 17.3.3 公共卫生政策建模

#### 1. 戴口罩政策——公众 VS. 卫生保健工作者

公众戴口罩政策有两个参数：参与率和预防效度。参与率是指所有人口中实际戴口罩的个体的比例，预防效度是指戴了口罩后可达到的保护程度。两个参数都是可调整的。当这个政策被实施后，模拟系统使用参与率随机地安排一群人戴口罩。如果模拟系统中 A 主体处于 S 状态但戴了口罩，它的传染率就下降为与预防功效参数相等。如果在症状爆发前后模拟主体戴口罩，处于 I 状态的 A 主体感染其他人的机会就会降低。预防效率参数同样也会影响这个潜能。

```

if (On(PolicyWearingMaskGP) ∨ Change(PolicyWearingMaskGP)) then
    if (PolicyWearingMaskGP. Parameter. RateParticipation > 0) then
        for each A ∈ PopulationAgent do
            n ← Random(0, 1) // n ∈ [0, 1]
            if (n ≤ PolicyWearingMaskGP. Parameter. RateParticipation) then
                AgentA. AttributeWearingMask ← True
                AgentA. AttributeMaskType ← PolicyWearingMaskGP. Parameter. RatePrevention
            else
                AgentA. AttributeWearingMask ← False

```

用于表示医院的过程同样也能用于模拟戴口罩政策。这个政策一旦被实施，在医院隔离的主体的根镜像周围的主体戴或不戴口罩取决于参与率参数，预防效度参数也决定了相邻主体的感染可能性是否降低。

```

if (On(PolicyWearingMaskHW) ∨ Change(PolicyWearingMaskHW)) then
    when event(Isolated(AgentA)) do
        for each N ∈ AgentA. MirrorIdentityRoot. SetNeighbor do
            n ← Random(0, 1) // n ∈ [0, 1]
            if (n ≤ PolicyWearingMaskHW. Parameter. RateParticipation) then
                AgentTreatedX1. AttributeWearingMask ← True
                AgentTreatedX1. AttributeMaskType ← PolicyWearingMaskHW. Parameter. RatePrevention
            else
                AgentTreatedX1. AttributeWearingMask ← False

```

#### 2. 体温测量

如果体温测量的政策被实施，每个主体的镜像在与它周围的所有主体接触

之前是否要测量体温由他周围的主体决定。这个决策取决于一个参与率参数和一个随机数字  $n$ 。如果  $n$  比参与率小,就意味着相邻的主体会实施想与他们接触的主体先测量体温的政策。结果取决于发现率参数。换句话说,发现率越高,用的温度计越精确,疾病的传染率就越低。

### 3. 减少公共接触

在 2002 到 2003 年非典流行的末期,有很多报告(例如,Sebastian and Hoffmann 2003; WHO 2003)将减少公共接触描述为控制疾病传播的一项有效手段。此政策在我们的模拟中被实施以后,参与率和一个随机的数字  $n$  决定了两个主体的镜像在物理接触前是否相互作用。 $n$  大于参与率说明了一个主体不与一个特定镜像周围的主体相接触,或没有理由与镜像相互接触。

### 4. A/B 类家庭隔离

根据 A 类家庭隔离政策,如果在政策实施之后主体 C 被确认为患者,则 C 的镜像周围的所有主体是否应该实施家庭隔离取决于参与率参数。像上述的医院隔离例子一样,进入家庭隔离状态的相邻主体的所有镜像都立即停止所有活动直到度过隔离期,而是否度过隔离期取决于一个公共卫生政策参数。这个要求不适用于根镜像,因为回家后仍然允许与其他主体接触。

A B 类家庭隔离政策与 A 类政策很相似,但是它影响的主体数比 A 类政策略大一点。如果 C 主体的一个镜像和 D 主体的一个特定的镜像相邻(例如,主体 C 和主体 D 是一对同居夫妇),这代表分离度为 1;如果 D 主体的一个镜像和 E 主体的一个特定镜像相邻(例如在一个办公室工作的同事),这代表 E 和 C 之间的分离度为 2。因此,当 C 主体被诊断为患者时,D 和 E 都面临着被感染的危险,也就意味着 D 和 E 必须进入家庭隔离状态。

### 5. 控制医院探视

实际上,在非典期间,新加坡和台湾地区的卫生当局在医院探视方面上实施了严格的政策;我们构建的模型中也模拟了“控制医院探视”政策。我们假定 A 主体表现出疾病的症状并且在医院接受隔离治疗。如果 B 主体的根镜像与 A 主体的根镜像相邻,这表明 B 主体可能是医院的一个工作人员、护士、卫生保健工作者或者关系非常密切的亲戚;如果 C 主体的非根镜像和 A 主体的根镜像相邻,则说明 C 主体是一个远房亲戚、朋友、同学或同事。如果这个严厉的探视政策被实施,则 B 主体可以探望 A,但是 C 不可以。

罩需要花费一定成本,但公共接触的限制几乎不需要成本。另外,戴口罩可以从源头上减少疾病传播。

体温测量、限制医院探视和卫生保健者戴口罩的组合政策可以认为是对非典爆发的补救措施。这个政策组合无法阻止处于潜伏期或仅有轻微症状的病人把疾病传播给他身上。这组政策除了大量的漏洞之外,还需要大量的劳动力和物质资源。家庭隔离和减少公共场所的接触同样也需要很高的社会成本,然而如果在早期不采取严厉的隔离措施疾病仍然会传播。在 2002 年到 2003 年非典爆发期间报道了大量家庭内部成员传染的案例,证明这个预防措施组合在控制这类传染时是无效的。

## 17.5 结 论

在这篇论文中,我们提出了一个新型的小世界网络模型,该模型由带镜像的元胞自动机组成,可以通过社会网络的日常接触来模拟流行病的传播。我们建立了镜像这个概念,将长距离的移动和地理位置的迁移整合入模型,这样我们就可以模拟社会网络中的传染病的传播动力学,并且研究各种公共卫生政策和传染病预防政策这些单独的政策或政策组合的有效性。这个模型成功地展现了不同个体在日常接触中的流行病传播行为,并展示了当今高聚集度、低分离度和长距离的移动下的小世界特性。

根据 2002—2003 年新加坡、台北和多伦多非典爆发时收集到的数据所作的模拟结果,我们认为这个模型可以应用于不同的传染性疾病,并可用于精确模拟传染性疾病的发展。模拟结果和真实世界数据的比较显示出我们的模型可用来检测流行病报告系统,并且可以鉴别具体条件下的最优公共卫生政策组合。模拟结果同样显示了模型具有相当强的灵活性,我们相信它可以广泛地应用于那些传染参数既定的多种传染性疾病(例如流行性感冒、肠道病毒以及艾滋病)。

### 附录 17. A

A. 1 这篇附录包括:a)我们模拟实验参数设置的细节;b)模拟实验的输入数据和相关的传染病数据资源;c)我们模拟实验的源程序和执行文件,包括参数设置的详细描述(例如,外部参数和估计的参数)。

#### 参数细节

A. 2 这个部分中,我们完整地解释了如何从其他系统动力学研究者那得到的  $R_0$  推断出我们模型中使用的参数。然后我们使用表格罗列了环境参数和传染病参数的数值。

### 从统计数据中推断得到的参数

- A. 3 在之前使用的模拟传染病区室模型的项目中(Koopman 2004; Lipsitch et al. 2003; Riley et al. 2003),它们将  $R_0$  缩减成简单的相关表达式 17. A. 1(Anderson and May 1982; Becker 1992)。当一个受感染的个体的所有邻居都易受感染,

$$R_0 = \text{contact rate\_transmission probability\_duration of infection}.$$

$$R_0 = c \times \beta \times D \quad (17. A. 1)$$

- A. 4 把镜像和元胞自动机组合在一起后,我们修改初始的表达式 17. A. 1, 得到另外一个表达式 17. A. 2。

$$\begin{aligned} R_0 = & (C_{rate} \times C_{time}) \times (T_{rate} \times T_{period}) \times (\text{Avg. Mirror Identities} \\ & \times \text{Num. of Neighbors}) \end{aligned} \quad (17. A. 2)$$

其中  $C_{rate}$  代表一个个体和他或她相应邻居的接触率,  $C_{time}$  代表个体和他的邻居在一天内接触的次数,  $T_{rate}$  代表受感染个体的平均传播速率,  $T_{period}$  代表受感染个体的平均传播周期,  $\text{Avg. Mirror Identities}$  代表镜像的平均数目,  $\text{Num. of Neighbors}$  代表每个镜像邻居的数目。

- A. 5 因为我们的模拟模型采用了摩尔近邻的第一层,我们的  $C_{rate} = 1/8$  并且  $\text{Num. of Neighbors} = 8$ 。除了从传染病专家那获取了  $R_0$  和传播周期外, 我们还从社会学家那获取了镜像的平均数目和邻居的数目, 接着将  $R_0$  和获得的参数整合到一起以模拟一种传染病及推导传播速率。
- A. 6  $R_0$  是从系统动力学模型中获得的传染病参数。根据 Lipsitch 等人(2003)、Riley 等人(2003)、Sebastian 和 Hoffmann(2003)、世界卫生组织(2003), SARS 的  $R_0$  在 2.6 个人至 3 个人之间变动。基于国家及市级的卫生机构的统计数据, 我们了解到平均传播周期  $T_{period}$  为 4.5 天至 6 天。我们从社会学家那获得了如下的数据:  $\text{Avg. Mirror Identities} = 3$  和  $\text{Num. of Neighbors} = 8$ 。计算这些数值后, 表达式 17. A. 2 可以用来推导  $T_{rate}$ 。我们实验中使用的参数序列如表格 17. A. 1 所示。

表 17. A. 1 实验中使用到的参数

	$R_0$	$C_{rate}$	$C_{time}$	$T_{rate}$	$T_{period}$	$\text{Avg. Mirror Identities}$	$\text{Num. of Neighbors}$
新加坡 台北 多伦多	2.7	1/8	4	0.0455		3	8

续 表

属性	值域	描述
$W$	500	元胞自动机使用的二维晶格的宽度
$Avg. Mirror Identities$	3~4	镜像的平均数目
$Day_{Incubation}$	5	潜伏期的平均天数
$Day_{Infectious}$	25	感染期的平均天数
$Day_{recovered}$	7	康复期的平均天数
$Rate_{Super}$	0.0001	总人口中超级传染者的比例
$Rate_{Young}$	0.3	总人口中的年轻人主体(0~20岁)的百分比
$Rate_{Prime}$	0.5	总人口中的青壮年主体(21~60岁)的百分比
$Rate_{Old}$	0.2	总人口中的老年人主体(60岁及以上)的百分比
$Rate_{Infection}$	0.045	平均感染率
$Rate_{Death}$	0.204	平均死亡率

输入的传染病数据和相关资源

模拟新加坡输入的数据

表 17. A.3 模拟新加坡输入的数据

时间步长	行为人	状态	公共卫生政策	模拟程序上的特别描述
2003/3/1	触发器 1	感染状态		超级传播者
2	触发器 2	感染状态		
11	集合		减少公共接触	疗效=0.9,普及性水平=0.5
15	触发器 1	潜伏状态	卫生保健者戴口罩政策	疗效=0.9,普及性水平=0.9
22	触发器 2	潜伏状态		
23	集合		家庭隔离	10 天,普及性水平=0.9
			控制医院探视	疗效=0.9,普及性水平=0.9
			公众戴口罩政策	疗效=0.9,普及性水平=0.5
25	触发器 2	感染状态		
52	集合		体温测量	疗效=0.9,普及性水平=0.5

A.9 每个政策的有效水平设置为 0.9。当政府卫生机构严格实施一项政策的时候,政策的普及性水平设置为 0.9,当政策的成功依赖于公众的合作而非政府严格的实施时,政策的普及性水平设置为 0.5。

模拟台北输入的数据

我们使用从新加坡实验中的经验来模拟 SARS 在台北的散播情况。我们只

使用引入的病例和台北卫生当局公布的卫生政策。

表 17. A. 4 模拟台北输入的数据

时间步长	行为人	状态	公共卫生政策	模拟程序上的特别描述
2003/3/20	触发器 1	感染状态		
2	触发器 4	潜伏状态		
9	触发器 1	潜伏状态		
11	触发器 2	感染状态		
12	触发器 2	感染状态	家庭隔离	10 天,普及性水平=0.9
14	触发器 1	感染状态		
27	触发器 1	感染状态	卫生保健者戴口罩政策	功效=0.9,普及性水平=0.9
47	集合		控制医院探视	功效=0.9,普及性水平=0.9
53	集合		家庭隔离	14 天,普及性水平=0.9
			公众戴口罩政策	功效=0.9,普及性水平=0.5
74	集合		家庭隔离	10 天,普及性水平=0.9
88	集合		体温测量	功效=0.9,普及性水平=0.5

### 模拟多伦多输入的数据

表 17. A. 5 模拟多伦多输入的数据

时间步长	行为人	状态	公共卫生政策	模拟程序上的特别描述
2003/2/23	触发器 1	感染状态		
6	触发器 1	感染状态		
19	触发器 1	感染状态	卫生保健者戴口罩政策	功效=0.9,普及性水平=0.9
			减少公共接触	功效=0.9,普及性水平=0.5
30	触发器 1	感染状态		
37	集合		控制医院探视	功效=0.9,普及性水平=0.9
			家庭隔离	10 天,普及性水平=0.9
38	触发器 1	感染状态		
68			上面实施的所有卫生政策	
91	集合		卫生保健者的戴口罩政策	功效=0.9,普及性水平=0.9
112	集合		前面实施的所有公共卫生政策	

### 相关的流行病信息链接

#### 新加坡

新加坡政府 SARS 网址：<http://www.sars.gov.sg/index.html>.

新加坡政府卫生部(MOH)SARS 网址：<http://www.moh.gov.sg/corp/sars/index.html>.

#### 台北

[http://www.doh.gov.tw/newverprog/proclaim/sars\\_list.asp](http://www.doh.gov.tw/newverprog/proclaim/sars_list.asp).

<http://www.cdc.gov.tw/sars/>.

<http://sars.health.gov.tw/>.

#### 多伦多

加拿大卫生当局：<http://www.hcsc.gc.ca/english/protection/warnings/sars/index.html>.

加拿大 SARS 在线：

[http://www.mapleleafweb.com/education/spotlight/issue\\_31/timeline.html](http://www.mapleleafweb.com/education/spotlight/issue_31/timeline.html)

或 [http://www.ctv.ca/generic/WebSpecials/sars/timeline/timeline\\_sars.html](http://www.ctv.ca/generic/WebSpecials/sars/timeline/timeline_sars.html).

多伦多公共卫生网：<http://www.toronto.ca/health/sars/index.htm>.

#### WHO(世界卫生组织)

<http://www.who.int/csr/sars/en/>.

#### CDC(疾病控制和预防中心)

CDC SARS 网址：<http://www.cdc.gov/ncidod/sars/>.

CDC 疾病与死亡周报 (MMWR)：<http://www.cdc.gov/mmwr/>.

### 参考文献

- ANDERSON R M and May R M (1982) Directly transmitted infectious diseases: control by vaccination. *Science* 215(4536), pp. 1053~1060.
- BECKER N G (1992) Infectious-Diseases of Humans-Dynamics and Control. *Australian Journal of Public Health*, 16, pp. 208~209.
- KOOPMAN J (2004) Modeling infection transmission. *Annual Review of Public Health* 25, 303~326.
- RILEY S, Fraser C, Donnelly C A, Ghani A C, Abu-Raddad L J, Hedley A J, Leung G M, Ho L M, Lam H, Thach T Q, Chau P, Chan K P, Lo S V, Leung P Y, Tsang T, Ho W, Lee K H, Lau E M, Ferguson N M, and Anderson R M (2003) Transmission Dynamics of the Etiological Agent of SARS in Hong Kong: Impact of Public Health Interventions. *Science*, 300(5627), pp. 1961~1966.

- LIPSITCH M, Cohen T, Cooper B, Robins J M, Ma S, James L, Gopalakrishna G, Chew S K, Tan C C, Samore M H, Fisman D, and Murray M (2003) Transmission Dynamics and Control of Severe Acute Respiratory Syndrome. *Science*, 300(5627), pp. 1966~1970.
- SEBASTIAN B and Hoffmann C (2003) *SARS Reference*. Flying Publisher.
- WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION) (2003) Consensus document on the epidemiology of severe acute respiratory syndrome (SARS), <http://www.who.int/csr/sars/en/WHOconsensus.pdf>.
- AHMED E and Agiza H N (1998) On modeling epidemics. Including latency, incubation and variable susceptibility. *Physica A*, 253, 347~352.
- AHMED E and Elgazzar A S (2001) On some applications of cellular automata. *Physica A*, 296, pp. 529~538.
- ANAND K, Ziebuhr J, Wadhwani P, Mesters J R, and Hilgenfeld R (2003) Coronavirus Main Proteinase (3CLpro) Structure: Basis for Design of Anti-SARS Drugs. *Science*, 300 (5626), pp. 1763~1767.
- ANDERSON R M and May R M (1982) Directly transmitted infectious diseases: control by vaccination. *Science* 215(4536), pp. 1053~1060.
- BENYOUSSEF A, Hafidallah N E, Elkenz A, Ez-Zahraouy H, and Loulidi M (2003) Dynamics of HIV infection on 2D cellular automata. *Physica A*, 322, pp. 506~520.
- BOCCARA N and Cheong K (1992) Automata network SIR models for the spread of infectious disease in populations of moving individuals. *Journal of Physics A*, 25, pp. 2447~2461.
- BOCCARA N and Cheong K (1993) Critical-behavior of a probabilistic-automata network SIS model for the spread of an infectious-disease in a population of moving individuals. *Journal of Physics A*, 26, pp. 3707~3717.
- BOCCARA N, Goles E, Martinez S, and Picco P (1993) Cellular Automata and Cooperative Phenomena. Kluwer Academic Publisher, Boston.
- BOCCARA N, Cheong K, and Oram M (1994) A probabilistic automata network epidemic model with births and deaths exhibiting cyclic behavior. *Journal of Physics A*, 27, pp. 1585~1597.
- CDC (CENTERS FOR DISEASE CONTROL) (2003a) SARS: Frequently asked questions, <http://www.cdc.gov/ncidod/sars/faq.htm>.
- CDC (CENTERS FOR DISEASE CONTROL) (2003b) Update: SARS — Singapore, MMWR, 52(18), pp. 405~411.
- CDC (CENTERS FOR DISEASE CONTROL) (2003c) Cluster of SARS Cases Among Protected Health-Care Workers-Toronto, Canada, MMWR, 52(19), pp. 433~436.
- CDC (CENTERS FOR DISEASE CONTROL) (2003d) SARS — Taiwan, MMWR, 52(20), pp. 461~466.
- CDC (CENTERS FOR DISEASE CONTROL) (2003e) Update: SARS — Toronto, Canada, MMWR, 52(23), pp. 547~550.
- CDC (CENTERS FOR DISEASE CONTROL) (2003f) Update: SARS — Worldwide and U. S., MMWR, 52(28), pp. 664~665.

- CDC (CENTERS FOR DISEASE CONTROL) (2003g) Use of Quarantine to Prevent Transmission of SARS — Taiwan, MMWR, 52(29), pp. 680~683.
- CDC (CENTERS FOR DISEASE CONTROL) (2003h) Revised U. S. Surveillance Case Definition for Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS) and Update on SARS Cases — United States and Worldwide, MMWR, 52(49), pp. 1202~1206.
- CHOWELL G, Fenimore P W, Castillo-Garsow M A, and Castillo-Chavez (2003) SARS outbreaks in Ontario, Hong Kong and Singapore: the role of diagnosis and isolation as a control mechanism. *Journal of Theoretical Biology*, 224(1), pp. 1~8.
- DONNELLY C A, Ghani A C, Leung G M, Hedley A J, Fraser C, and Riley S (2003) Epidemiological determinants of spread of causal agent of severe acute respiratory syndrome in Hong Kong. *Lancet*, 361(9371), pp. 1761~1766.
- DYE C and Gay N (2003) EPIDEMIOLOGY: Modeling the SARS Epidemic. *Science*, 300 (5627), pp. 1884~1885.
- EDELESTEIN-KESHET L (1988) Mathematical Models in Biology. Random House, New York.
- EGUILUZ V M and Klemm K (2002) Epidemic threshold in structured scale-free networks. *Physical Review Letters*, 89(10), 108701.
- ENSERINK M (2003) SARS IN CHINA: The Big Question Now: Will It Be Back? *Science*, 301(5631), p. 299.
- FUENTES M A and Kuperman M N (1999) Cellular automata and epidemiological models with spatial dependence. *Physica A*, 267, pp. 471~486.
- GUAN Y, Zheng B J, He Y Q, Liu X L, Zhuang Z X, Cheung C L, Luo S W, Li P H, Zhang L J, Guan Y J, Butt K M, Wong K L, Chan K W, Lim W, Shortridge K F, Yuen K Y, Peiris J S M and Poon L L M (2003) Isolation and Characterization of Viruses Related to the SARS Coronavirus from Animals in Southern China. *Science*, 302(5643), pp. 276~278.
- KEELING M J (1999) The effects of local spatial structure on epidemiological invasions. *Proceedings of the Royal Society of London*, 266, pp. 859~867.
- KERMACK W O and McKendrick A G (1927) Contributions to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London*, pp. 700~721.
- KLECZKOWSKI A and Grenfell B T (1999) Mean-field-type equations for spread of epidemics: the ‘small world’ model. *Physica A*, 274, pp. 355~360.
- KUPERMAN M and Abramson G (2001) Small World Effect in an Epidemiological Model. *Physical Review Letters*, 86(13), pp. 2909~2912.
- LIPSITCH M, Cohen T, Cooper B, Robins J M, Ma S, James L, Gopalakrishna G, Chew S K, Tan CC, Samore M H, Fisman D, and Murray M (2003) Transmission Dynamics and Control of Severe Acute Respiratory Syndrome. *Science*, 300(5627), pp. 1966~1970.
- MARRA M A, Jones S J M, Astell C R, Holt R A, Brooks-Wilson A, Butterfield Y S N, Khattri J, Asano J K, Barber S A, Chan S Y, Cloutier A, Coughlin S M, Freeman D, Girn N, Griffith O L, Leach S R, Mayo M, McDonald H, Montgomery S B, Pandoh P K, Petrescu A S, Robertson A G, Schein J E, Siddiqui A, Smailus D E, Stott J M, Yang G S,

- Plummer F, Andonov A, Artsob H, Bastien N, Bernard K, Booth T F, Bowness D, Czub M, Drebot M, Fernando L, Flick R, Garbutt M, Gray M, Grolla A, Jones S, Feldmann H, Meyers A, Kabani A, Li Y, Normand S, Stroher U, Tipples G A, Tyler S, Vogrig R, Ward D, Watson B, Brunham R C, Krajden M, Petric M, Skowronski D M, Upton C, and Roper R L (2003) The Genome Sequence of the SARS-Associated Coronavirus. *Science*, 300(5624), pp. 1399~1404.
- MARTINS M L, Ceotto G, Alves S G, Bufon C C B, Silva J M, and Laranjeira F F (2001) A cellularautomata model for citrus variegated chlorosis. *Physica A*, 295, pp. 42~48.
- MILGRAM S (1967) The small world problem. *Psychology Today*, 2, pp. 60~67.
- MIRAMONTES O and Luque B (2002) Dynamical small-world behavior in an epidemical model of mobile individuals. *Physica D*, 168~169, pp. 379~385.
- MOORE C and Newman M E J (2000) Epidemics and percolation in small-world networks. *Physical Review E*, 61(5 Pt B), pp. 5678~5682.
- MORENO Y, Pastor-Satorras R, and Vespignani A (2002) Epidemic outbreaks in complex heterogeneous networks. *European Physical Journal B*, 26(4), pp. 521~529.
- NEWMAN M E J (2000) Models of the Small World: A Review. *Journal of Statistical Physics*, 101, pp. 819~841.
- NEWMAN M E J (2002) Spread of epidemic disease on networks. *Physical Review E*, 66 (1 Pt 2). 016128.
- NEWMAN M E J, Jensen I, and Ziff R M (2002) Percolation and epidemics in a two-dimensional small world. *Physical Review E*, 65 (2 Pt 1), 021904.
- NG T W, Turinici G, and Danchin A (2003) A double epidemic model for the SARS propagation. *BMC Infectious Disease*, 3(19), pp. 1~16.
- NISHIURA H, Patanarapelert K, Sriprom M, Sarakorn W, Sriyab S, and Ming T I (2004) Modelling potential responses to severe acute respiratory syndrome in Japan: the role of initial attack size, precaution, and quarantine. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 58(3), pp. 186~191.
- PEIRIS J S, Lai S T, Poon L L, Guan Y, Yam L Y, Lim W, Nicholls J, Yee W K, Yan W W, Cheung M T, Cheng V C, Chan K H, Tsang D N, Yung R W, Ng T K, Yuen K Y, and SARS Study Group (2003) Coronavirus as a possible cause of severe acute respiratory syndrome. *Lancet*, 361(9366), pp. 1319~1325.
- RILEY S, Fraser C, Donnelly C A, Ghani A C, Abu-Raddad L J, Hedley A J, Leung G M, Ho L M, Lam T H, Thach T Q, Chau P, Chan K P, Lo S V, Leung P Y, Tsang T, Ho W, Lee K H, Lau E M, Ferguson N M, and Anderson R M (2003) Transmission Dynamics of the Etiological Agent of SARS in Hong Kong: Impact of Public Health Interventions. *Science*, 300(5627), pp. 1961~1966.
- ROTA P A, Oberste M S, Monroe S S, Nix W A, Campagnoli R, Icenogle J P, Penaranda S, Bankamp B, Maher K, Cher M H, Tong S, Tamin A, Lowe L, Frace M, Derisi J L, Chen Q, Wang D, Erdman D D, Peter T C T, Burns C, Ksiazek T G, Rollin P E, Sanchez A, Liffick S, Holloway B, Limor J, McCausland K, Olsen-Rasmussen M, Fouchier R, Gunther S, Osterhaus A D M E, Drosten C, Pallansch M A, Anderson L J,

- and Bellini W J (2003) Characterization of a Novel Coronavirus Associated with Severe Acute Respiratory Syndrome. *Science*, 300(5624), pp.1394~1399.
- SEBASTIAN B and Hoffmann C (2003) SARS Reference. Flying Publisher.
- SIRAKOULIS G C H, Karafyllidis I, and Thanailakis A (2000) A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation. *Ecological Model*, 133, pp.209~223.
- WANG X F and Chen G (2003) Complex Networks: Small-World, Scale-Free and beyond. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, First Quarter, pp.6~20.
- WATTS D J and Strogatz S H (1998a) Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, 393(6684), pp.440~442.
- WATTS D J (1998b) Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION) (2003) Consensus document on the epidemiology of severe acute respiratory syndrome (SARS), <http://www.who.int/csr/sars/en/WHOconsensus.pdf>.

## 第 18 章

# 基于 REsCape 的资源、种族和冲突之间的关系研究<sup>①</sup>

资源、种族与冲突之间存在相互关联的关系，三者构成了一个典型的复杂自适应系统。研究内战的学者们已经尝试去评估资源、种族对内战发生的影响，但是由于系统自身的复杂性，传统的研究方法因缺乏处理复杂行为的手段而难以取得有效突破。Ravi Bhavnani, Dan Miodownik 和 Jonas Nart 设计了一个基于主体的建模架构，并命名为 REsCape(R 代表资源, E 代表种族, C 代表冲突)，其目标是将 REsCape 发展为一个任何研究资源、种族和冲突的学者都能够使用和改进的开源工具包。REsCape 可以用来定义不同的关键变量，以便学者研究这些变量的动态变化对冲突演化的影响。本章详细描述了 REsCape 的结构、建模方法，并以两个基线模型的运行为例，说明了在不同的主体策略下，种族、资源对内战发生的影响，以此来解释内战的原因、潜在机制和演变轨迹。

## 18.1 简介

内战爆发受政治、经济和社会等一系列相互联系的因素影响，它可作为复杂自适应系统的一个重要例子。在这个复杂自适应系统中，有许多决策的主体，每一个主体都有各自的特征和行为，主体与所处的物理环境以及其他主体相互作

---

① Originally published in English as: Bhavnani Ravi, Miodownik Dan, Nart, Jonas (2008) ‘REsCape: an Agent-Based Framework for Modeling Resources, Ethnicity, and Conflict’, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 11(27) (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/2/7.html>). 已取得授权，授权方：JASSS。

用,从而使整个系统显示出非线性和路径依赖的动力学特征<sup>①</sup>。

Collier 和 Hoeffler(1998; 2004; 2005)使研究“资源——冲突”的联系变得普及。他们发现,在拥有丰富资源储备的国家,贪婪这一动机对导致叛乱更可能起支配性的作用,而不像早先政治学所强调的那样:叛乱主要是由意识形态或不满导致。Collier 和 Hoeffler 的工作引起了学者们对家庭手工业的正式研究,很多研究用不同的数据重复验证了 Collier 和 Hoeffler 的结论。毫无疑问,这些大量的研究产生了多种结果,这在很大程度上归因于使用了不同的数据,同时由于对冲突的定义、关键解释变量的度量和操作,以及缺失数据的处理程序等不同,从而使结论差异更大<sup>②</sup>。这些结论加强(Buhang and Gates, 2002; Doyle and Sambanis, 2000; Hegre, 2002; Humphreys, 2005)或减弱(Fearon and Laitin, 2003; Elbadawi and Sambanis, 2002)了 Collier 和 Hoeffler 关于“资源——冲突”之间关联关系的观点<sup>③</sup>。

作为本研究项目的一部分,学者们尝试着评估种族因素对内战发生率的影响。这项努力引起了当前学者们在“资源、种族——冲突”理论(和方法)上的争议。一方面,有些学者声称,种族划分——种族分裂、两极分化、种族统治,对推动个体发起或参加叛乱起了重大作用(Cederma and Girardin, 2007; Elbadawi and Sambanis, 2002; Gates, 2002; Hegre and Sambanis, 2006; Lujala et al., 2005; Sambanis, 2001; Wimmer et al., 2007)。相反,另一些学者提出种族因素的重要性最多排在第二,而推动个体叛乱最重要的因素是经济和其他因素(Collier and Hoeffler, 2004; Fearon et al., 2007; Fearon and Laitin, 2003; Montalvo and Reynal-Querol, 2005; Reynal-Querol, 2002; Ross, 2004)。由于行为个体对种族问题持有不同的态度,某些个体成为了政府的支持者或叛乱者,而我们对导致他们这种角色的形成机制仍然不太清楚。

这些多元统计模型的研究,不但受限于对种族问题和自然资源财富的衡量尺度的不同,更受限于研究者对下述潜在诱因机制的分类能力的高低。这些诱

<sup>①</sup> 非常感谢以下人士的建议:Lars Erik Cederman, Chanan Cohen, Nils Petter Gleditsch, Kristian Skrede Gleditsch, Havard Herge, Simon Hug, Eric Little, Ian Lustick, Stathis Kalyvas, Rick Riolo, Nils Weidmann, 以及 Oslo 和平研究所、瑞士联邦科技学会的国际研究中心、密歇根大学的复杂系统研究中心、密歇根州立大学的政治学系和艾塞克斯大学组织的研讨会的参与者们。我们同样也非常感谢三位匿名审稿人的宝贵意见。希伯来大学校内研究基金、以色列国家科学基金会以及密歇根州立大学政治学系对这项研究提供了支持。Michael Bommarito II 开发了模型,为我们提供了额外的研究协助。这篇文章如有错误,那么都是我们自己的过失。

<sup>②</sup> 来自 Ross(2006:265)的引用是有益的:“自然资源财富和内战的研究受测量误差、内生性、缺少强壮性和因果机制的不确定性的牵制。”

<sup>③</sup> 资源——内战关系的冲突性结果的详细讨论,见 Ross (2004)。

因机制包括:(1)大量相关因果要素;(2)主体和关联要素的复杂交互作用;(3)收集主体特征和行为的有用数据的困难;(4)测试变化中的要素效果的“自然实验”有界集<sup>①</sup>。尽管如此,多元统计模型不仅能探究这些影响内战的关键变量的意义,并已确立了一些经验性的规则(Hegre and Sambanis, 2006; Sambanis, 2001)。此外,复杂自适应系统的真正特征——主体的多样性和适应性、非线性机制和反馈环、非随机交互拓扑、非线性和路径依赖的动力学特性——违反了许多支持传统的大N方法的假设。在缺少足够工具来处理复杂行为的条件下,研究者倾向于忽略这些复杂性,限制了社会研究的范围,这是不符合自然规律的(Meyer et al., 2005)。基于主体的建模是解决复杂自适应系统建模难题的有效途径之一(Bankes, 2002; Bonabeau, 2002; Conte et al., 1997)。简而言之,当一个系统是复杂的,我们未经检验的第一直觉经常是不足以认识这个系统的。因为基于主体的模型是计算模型,即它们是规范的、没有歧义的,且可复制和可检验的(Axelrod, 1997; Axelrod and Cohen, 2001),所以可通过它们来研究复杂系统的方方面面,而这些用传统的分析技巧进行研究是很困难的。

这篇文章的目标是描述一个探索性的基于主体的架构及其各个组件,该架构命名为REsCape(R代表资源,E代表种族,C代表冲突),它被用作实验工具,而不是提供精确而详细的预测结果<sup>②</sup>。REsCape允许用户选择不同程度的种族显著性、不同模式的种族分化和统治、资源分布和决定这些要素如何影响内战发生的主体所采用的策略。虽然我们不情愿地偏离了KISS原则(Keep It Simple, Stupid, 懒汉原则),但是我们依然假定解释因素的多样性<sup>③</sup>。同样地,REsCape虽然十分复杂——它抓住了经济关系中的关键因素:比如投资、贬值、征税、提取和收入的产生;它包括了标准冲突胜利函数;它使普及的种族概念化得以运行;它利用普遍采纳的衡量战争爆发和持续的方法——但是它足够透明,用户能够在一组给定的初始条件下,用它来确定关键的诱因。

我们相信REsCape可以作为一个通用的工具来研究上文列出的关键说明变量与内战发生之间的关系,还能通过修改这些变量以符合给定案例的各项细节。在目前进行的研究中,我们利用REsCape研究了当前有关内战的文献中存在的争论,比如种族分化、经济增长与内战之间的联系(Bhavnani and Miodownik, 2008a),以及在冲突风险中少数民族占统治地位所造成的影响(Bhavnani and Miodownik, 2008b)。我们的最终目标是使REsCape成为开源

① 关于似乎合理的资源——内战关系的潜在机制的讨论,见Humphreys (2005)。

② 探索性和巩固性建模的比较,见Bankes (2002)。

③ 基于主体建模的研究策略的讨论,见Lustick 和 Miodownik (forthcoming)。

定的部门和空间支出的决策(4)决定了可得到的总收入(5),由此可以获得农民的支持(6)。在农民支持薄弱的地方,农民可能重新定位或移居(7)到其他由所属族群定居和控制的单元。假定控制是支出和投资、收入生成和大众支持的必要条件,在这个基础上领袖通过收入来控制领土(8),我们也强调在这个架构中领土控制的重要性。所有的控制都是单元特异的,按照分类有经济成分、支出决策、农民支持。冲突(9)也是单元特异的,当两个族群的领袖试图控制同一块领土或单元时产生冲突。详细的机制包括以下内容:(a)掠夺导致经济增长的下降,减少农民的支持,削弱了政权的力量,随着时间的进展,政权更加容易被剥夺;(b)社会福利的支出增加了民众的支持,但是从长远来说在经济上是不可行的;(c)在政权强制力上的支出会改变民众的支持,但对于领土控制是必需的;(d)随着时间的进展,投资在经济中有利于收入流的增加,并且能获得农民强有力的支持。架构中的关键反馈回路包含以下内容:(i)收入变化(相对于名义对手的收入)增加(或减少)了种族显著性;(j)种族显著性影响农民的支持;(k)高水平的农民支持减少了控制的成本,而控制对农民的支持又有非单调性的影响(过度的控制降低了支持,效果就如同薄弱的控制或不可靠的控制);(l)当农民对控制该单元的领袖的支持减弱时,农民可能会实践移民的选择,迁徙到少数民族聚居地,以获得人多势众带来的安全;(m)移民改变了控制,因此影响了支出、投资和对领袖的支持;(n)当不同领袖试图控制同一块领土而产生冲突时,将改变对个体单元的控制,最后甚至可能改变对整个政权(掌权的族群,或 EGIP)的控制。下面我们描述了基本的建模步骤:

- 确定资源基础和经济体系中的资源空间分布
- 确定族群领袖的支出和投资策略
- 通过指定各对抗民族的人口比例确定种族分化的程度
- 通过指定掌权的族群和默认失势的族群来确定种族统治的结构
- 确定种族显著性是固定的还是变化的
  - 在模型运行的每一时间步中:
    - 族群领袖制定部门和空间的支出决策
    - 支出决策产生了领袖和农民的收入
    - 反过来,未来的支出和投资受限于收入
    - 农民通过收入、安全和种族划分的函数确定对领袖的支持程度
    - 如果支持程度很低,农民移居到少数民族聚居地
  - 当不同族群领袖试图控制同样的单元时就会产生冲突:
    - 冲突决定了新的领土控制模式
    - 首都控制者的改变实际上改变了掌权的族群

下面段落中,我们对模型的组件作了更详细的描述,并将额外的细节归入18.4附录。

### 1. 种族:身份、显著性和分化

所有主体都带有一个种族标记来标识自己是族群A还是B的成员,用 $\dot{A}$ 表示掌权族群的领袖,用 $\dot{B}$ 表示失势族群的领袖<sup>①</sup>。我们将所有非领袖的主体称为农民P。种族显著性e表示种族特性对于农民的重要性,所有农民的e值可以是固定的( $e_i^{\dot{A}}, e_i^{\dot{B}} = 1$ ),也可以是变化的( $e_i^{\dot{A}}, e_i^{\dot{B}} \in [0, 1]$ )。在后面的例子中,我们指定种族显著性是一个相对收入的函数:农民的个人平均所得和名义对手收入之间的差距越大,自身种族显著性的特征越明显(在18.4附录中,我们提供了计算这个函数的其他细节)。对两个随机选择的农民属于不同族群的概率,用户可以根据每个族群的相对规模的大小给定权重以指定种族分化的水平,相应的种族统治的权力结构(例如掌握政权的族群)也可以这样确定。

### 2. 经济:收入、支出和支持

模型中的地区由个体单元组成,每个单元可能拥有四个生产部门之一:农业 $ag$ ;手工业提取冲积层钻石 $aa$ ;工业化提取冲积层钻石的 $ai$ ;工业化提取金伯利岩层钻石 $ki$ <sup>②</sup>。在这一部分,我们对模型中的经济进行一般性的描述,特殊细节放在了18.4附录里。首先, $\dot{A}, \dot{B}$ 决定在他们控制的单元中进行多少投资,投资提高了可得到的短期收入,并且全面提高了生产力和中长期运营的收入。每个单元格的生产部门产生的收入分配给控制该单元的 $\dot{A}$ 或 $\dot{B}$ 以及该单元中的农民P,分配方式如下:

$$\begin{aligned}y_x^{(\dot{A}, \dot{B})} &= s_x \cdot y_x \\y_x^P &= (1 - s_x) \cdot y_x\end{aligned}$$

其中 $s_x \in [0, 1]$ 表示划归为控制主体的收入份额。

① 在下文的描述中,我们使用与现存的两个族群相一致的符号,只有示例1例外,它的所有主体属于单一族群,而我们提到不满的成员(联合种族)则作为叛乱者试图推翻政府。

② 资源基础的本质涉及投资和收入,以及领土控制。例如,冲积层钻石被认为是“可掠夺的”,这是因为它们构成高价值的商品,而这种商品具有经济上的低准入门槛——它们由难以征税的手工匠开采,这需要极少的投资,使政府对这些资源难以确立垄断控制。相反,不可掠夺的资源,比如金伯利岩层或深井钻石,具有经济上的高准入门槛——需要大量的资本和技术来开采它们才能盈利,由此形成一个天然门槛,把小规模的手工采矿者排除在外,使政府比较容易地对这些资源确立垄断控制(消除了在阻止盲目采矿者的强制能力上的投资需求)。与开采模式紧密联系的是资源储藏区的位置,我们现在将资源分布区分为“点资源”和“散布资源”。更多关于冲积层和金伯利岩层钻石的资源分布、开采模式以及与内战牵连等内容,见Snyder and Bhavnani(2005)。注意当我们限制我们的初始聚焦点为农业和钻石经济时,REsCape可以通过修改来说明其他资源(比如石油和木材)的收入机会构成。

部门和空间的支出策略决定了  $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$  分配给以下支出方面的收入份额：(1) (维持)强制力，(2) 狂妄(所需要的开支)，(3) 经济投资，(4) 支付给农民的社会福利；同时也决定了地区上的跨单元的收入分配<sup>①</sup>。控制策略决定了  $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$  单元哪个能获得控制权以及在这些单元上强制力的分布，是包含以下因素的函数：(1) 资源基础；(2) 农民人数；(3) 到首都的距离；(4) 受主体控制的其他单元的亲近程度。支出和控制策略联合服从于  $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$  的一组程式化的运行模式：

- 狂妄策略是一个“夺食性的”策略，领袖通过从经济中挪用税收来最大化个人利益，却忽略进一步的投资，放弃无利可图的地区。
- 社会福利策略是一个计划通过高水平的社会支出来增加农民支持“民粹主义”的策略。
- 领土控制策略是一个“武力的”策略，通过在强制力上的支出来增加或维持对领土的控制是极其重要的。
- 德政策略是一个“理想的”策略，领袖用其来平衡经济中的投资与在强制力和社会福利上的支出。

下面，我们为“责任主体”——例如控制特定单元的领袖，定义一个衡量农民支持  $s^P$  的方法（注意农民对领袖的支持不限定在领袖所属族群，而领袖必须对本民族负责）。这个衡量方法的有效范围从 -10 到 +10（-10 表示完全支持领袖  $\dot{B}$ ，+10 表示完全支持领袖  $\dot{A}$ ，0 表示中立），这个衡量方法依赖于以下要素：(i) 当前收入；(ii) 收入随时间的变化；(iii) “责任主体”的强制力；(iv) “责任主体”的种族特征。特定地，我们要区分实际收入  $y^P$  和参考收入  $y_{ref}^P$ ，区分  $y^P$  和过去收入  $y_{past}^P$ 。用  $y_{past}^P$  来衡量过去收入的加权和：

$$y_{past}^P(t+1) = k_{ws} y_{past}^P(t) + (1 - k_{ws}) y^P(t)$$

其中  $k_{ws} \in [0, 1]$  代表记忆的“长度”。由此得出结论： $k_{ws}$  减少时，农民“忘记”过去的速度就增加了。然后我们定义一个函数  $h(c^a)$  来描述农民的支持是如何受控制该单元的领袖的强制力  $c^a$  影响的， $h(c^a)$  的值域开始于 -1（代表没有强制力）；当  $c^a = c_{ideal}$ ，函数值线性上升到 +1；当  $c^a = c_{oppressive}$ ，函数值线性下降到 -1；当  $c^a \geq c_{oppressive}$  的时候，函数值保持为 -1。然后这个函数用参数  $k_{CP}$  来加权表示，最后，农民的支持还受种族显著性的影响，就像这样：当  $e_i > 0$ ，如果农民和领袖属

---

<sup>①</sup> 农民从社会福利得到的收入  $y_{SW}^P$  是单元重要性以及农民支持的实际水平和最高水平之间差别的函数。附录中提供了我们讨论支出策略的附加细节。

于不同的族群，则  $k_e = -1$ ；如果农民和领袖来自相同的族群，则  $k_e = 1$ ；当  $e_i < 0$ ，则  $k_e = 0$ <sup>①</sup>。把各参数插入到 Logistic 方程  $\frac{1}{1 + e^{-x}}$  中：

$$s^P(y^P, c^a, e_i) = \dot{L} \cdot 20 \cdot (\frac{1}{1 + e^{-(\frac{y_{ref}^P y_{ref}^P}{y_{ref}} + \frac{y_{past}^P y_{past}^P}{y_{past}} + k_{CP} h(c^a) + k_e(e_i))}} - 0.5)$$

其中， $\dot{L} = -1$  代表  $\dot{B}$ ， $\dot{L} = +1$  代表  $\dot{A}$ ，其他情况时， $\dot{L} = 0$ 。 $s^p(t)$  的更新规则如下：

$$s^p(t+1) = s^p(t) + \lambda_s(s^p - s^p(t))$$

其中  $\lambda_s$  捕捉了“惯性”，或者说是农民的同情心随经济收成变化的速度。

最后，农民可能会根据下列法则移动或移居到“少数民族聚居地”：

- 对于农民  $i$ ，每  $x_i$  个时间步长：

- 如果  $\dot{A}$  控制这个单元，并且  $s^p < 5$ ，则  $(\frac{n_A \cdot q_c^A}{10})$  的最大值超过半径  $m$ 。
- 如果  $\dot{B}$  控制这个单元，并且  $s^p > -5$ ，则  $(\frac{n_B \cdot q_c^B}{10})$  的最大值超过半径  $m$ 。

也就是说，如果  $s_i^p$  低于 5（-5），农民  $i$  将以最大距离  $m$  移动到另一个单元，这个单元有最大的混合种族居民数  $n_A(n_B)$ ，以及该农民族群的领袖所行使的最高程度的控制  $q_c^A(q_c^B)$ 。假定高水平的农民支持率降低了控制的成本，反之缺少强有力的支持会增加成本，则农民的迁徙对控制来说有暗示作用。

### 3. 冲突：强制力、控制和内战

强制力  $c$  是单元特异和领袖特异的，每个时间步长都要更新，需要通过以下因子来更新：新的投资  $i_c$ ，冲突导致的贬值  $\delta_c$ （反映了设备的正常磨损和损耗）和损失  $l$ ，以及种族化的  $\varphi_{e^p}$  个农民（种族显著性  $e$  为 1 的农民数量）的密度的变化。

$$c(t+1) = c(t) + i_c(t) - \delta_c(t) - l(t) + \varphi_{e^p}(t)$$

控制  $q_c \in [-10, 10]$  是单元内平均农民支持 ( $\bar{s}^P$ )、单元内领袖的强制力 ( $c^A$  和  $c^B$ ) 和单元离首都距离的函数，-10 表示单元完全被  $\dot{B}$  控制，+10 表示单元完全被  $\dot{A}$  控制。

假定对于投资和收益来说控制是必需的，当  $\dot{A}$  和  $\dot{B}$  试图去控制相同的单元时冲突就会产生。特别地，当  $\dot{A}$  和  $\dot{B}$  在一个单元中的强制力都超过了阈值  $\tau_c$  就

<sup>①</sup> 在相关经济福利很高的情况下，我们试图避免否定种族显著性的可能。关于我们计算种族显著性的附加细节见附录。

会产生冲突,伴随而来的是与冲突强度和结果成比例的损失  $l$ ,比如:

$$l^A = \alpha(1-f)c_{sum} \text{ 和 } l^B = \alpha f c_{sum}$$

其中  $f \in [0, 1]$  是冲突的结果变量( $f = 1$  表示  $A$  的完全胜利,而  $f = 0$  表示  $B$  的完全胜利),  $c_{sum} = c^A + c^B$  是卷入斗争的所有强制力之和, $\alpha$  是决定冲突强度的参数(通过缩减损失的比例)。我们使用强制力比率  $\frac{c^A}{c^B}$  的对数  $\log \frac{c^A}{c^B}$  来定义冲突结果变量  $f$ ;围绕冲突的所有单元的控制  $q_{sur} = \frac{1}{|M|} \sum_{i \in M} q_i^i$  ( $M$  表示冲突单元和它的摩尔型邻居(Moore Neighbors),  $q_i^i$  表示单元  $i$  中的控制);采用距离函数  $\frac{2(d_m - d)}{d_{max}}$  并引入随机序列  $X \sim N(0, \sigma^2)$ ,其中  $\sigma^2$  是我们试图引入的随机序列的总量。把各参数插入到 Logistic 方程  $\frac{1}{1 + e^{-x}}$ :

$$f\left(\frac{c^A}{c^B}, q_{max}, X\right) = \frac{1}{1 + e^{-(\log \frac{c^A}{c^B} + \lambda_c + \eta_c \frac{2(d_m - d)}{d_{max}} + X)}}$$

其中  $\lambda_c$  衡量控制在周围单元中的影响,  $\eta_c$  衡量地理因素的影响。有争议单元的控制转移到取得胜利的主体,在冲突广泛蔓延下,可能会导致掌权族群的改变。

## 18.3 示例运行及结果

这部分,我们描述两个示例。第一个示例中,我们证明了在冲积层钻石矿的经济体中政府策略从德政到掠夺的变化效果,其中所有的农民都属于同一个的族群,不满意者会反抗政府。第二个示例中,我们介绍了由人数占优的民族 A 构成的掌权种族,其他条件不变。

### 18.3.1 示例 1

在模型的第一个示例中,政府采取了德政策略(后来转换为掠夺策略),叛乱者采取了德政策略,所有的农民属于相同的族群。示例中的地区特征是:中间部分人口密度高,西北、东北和东南角人口密度中等,其他区域密度低,并且包含一个环绕首都四周的冲积层钻石矿藏。

$\dot{A}$  的策略的改变:从“德政”到“掠夺”(150—200 步)。 $\dot{A}$  的策略的转变迅速引起了农民同情心的变化,在与  $\dot{A}$  不同种族的单元内——那些生产方式还是农业处于主导地位的地方,农民开始支持  $\dot{B}$ 。尽管如此,在富含钻石的中央区域,对  $\dot{A}$  的同情心仍旧很高。此阶段的一个显著特征是最近形成的少数种族定居点趋向于远离多数种族控制的富含资源的区域,以至于比较个人平均所得,少数种族没有产生任何不满,因此他们的同情心在很大程度上是中立的,到目前为止他们既不支持  $\dot{A}$ ,也不支持  $\dot{B}$ 。

冲突的增加(200—540 步)。第 400 步时,在钻石矿藏区“平均范围”(见 18.4 附录的解释)以内的种族定居点开始发生冲突,这些地方与名义对手间的收入差别增加了种族显著性,破坏了支持,导致更多有特权的族群 A 的成员迁移,随后占领族群 B 的成员遗弃的领土。

冲突的减少(540—1720 步)。第 1000 步时,沿着地区的南部边缘形成了一大片少数种族定居点。当这个定居点发展到一定规模,就变成了所有 B 族群成员的家园,将 A 族群成员赶到“平均范围”之外,削弱了  $\dot{A}$  的控制。随着该定居点的同种族性增加,种族对抗和暴力都减少了<sup>①</sup>。

政府控制的再主张(1720—1920 步)。到第 2000 步,种族聚居稳定下来。只有在由少数种族统治的南部定居点形成孤立的一小群多数种族,和在多数种族统治的北部定居点形成孤立的一小群少数种族,才会有动荡发生。随着时间的推移,甚至这些孤立的小群人口也解散了,因为农民移到了安全的人多势众的地方。此外,通过对钻石矿藏区安全的控制, $\dot{A}$  在北方镇压骚乱的能力仍然很强,导致冲突的最终消除以及沿着种族边线的农民接近完全的种族隔离。

这两个示例提供了对 REsCape 架构以及它的主要组件、机制和反馈回路的实践性描述。很明显,我们在这篇文章中有限的分析并不是打算研究关键变量对内战发生的影响,而是作为 REsCape 的入门介绍。

### 18.3.3 结论

REsCape 将关键变量——比如种族、分化、统治、资源类型和主体行为等,合并到一个正式的计算模型,该模型可以用来处理目前学者关注的关于内战问题的争议。这个架构允许用户进行复杂的思考性实验,此类实验的经验数据是

<sup>①</sup> 注意地区北部的在  $\dot{B}$  控制下的小地区是“过去的遗产”,因为这些单元转给  $\dot{B}$  控制,但不久以后就被遗弃。假定它们保持着无人居住的状态,控制权从未移交回政府。

很难收集的。对关键主体的行为感兴趣的用户,可以研究统治者通过税收或掠夺自然资源产生收入的能力是如何影响内战爆发和持续的。对理解叛乱的微观基础感兴趣的用户,可以关注使农民参加叛乱的机会成本减少的条件。对研究种族对于内战发生的影响感兴趣的用户,可以研究不同类型的种族概念化的后果,以及不同模式下的种族统治和分化,或者可以在这个架构当前提供的基本方法之外引入新的衡量种族显著性的方法。对研究自然资源和冲突之间的关系感兴趣的用户,可以检验多种资源制度和资源分布的情况对统治者和叛乱者行为的影响。还有那些对研究地区级别的冲突感兴趣的用户,可以识别构成特定冲突的事件,比如领土的交接、资源储藏区的夺取和首都的夺取。

表 18.1 为 REsCape 关键参数一览,也包括这些参数可能的取值。总结来说,领袖可以采用四种程式化的策略之一;资源基础可以从农业转变为以开采钻石为基础的经济——坚硬的金伯利岩层或手工开采的冲积层钻石;农民是两个种族群体之一的成员,他们的种族显著性可以变化,从种族划分不明显的基础案例,到所有个体的种族划分很明显且总是影响他们行为的大部分的原始概念化,到横跨个体和族群的变化——这种变化源于收入不一致引起的不满,收入不一致是通过从主体自身单元到整个地区的连续范围内计算得出的;最后,用户也可以通过获取种族分化和统治的不同模式来完善模型。

我们仅仅探索了 REsCape 参数空间中的一小部分,任何一篇论文都难以全面研究这个参数空间。我们用一个告诫作结论:REsCape 是一个探索性的工具,而不是一个有意去获取与内战相关联的所有诱因和动力学机制的综合性模型。同样地,这个架构可以向许多方向延伸:用户可以尝试去评价跨国联合对内战发生的影响;利用特定真实案例中的地域轮廓的 GIS(地理信息系统)数据发展模型;分析混合策略的效果,或赋予主体预测未来并通过预测对手的行动来更改他们行为的能力;或者简化该架构使研究人员能专注于感兴趣的特定参数。这个工具包具有重要的意义,因为它允许用户进行复杂的思考性实验,或根据设定好的情节进行反事实的分析。

REsCape 未来的发展可以概括为以下几点:(1)添加 GIS 接口使得能够利用特定国家或地区的(真实地貌);(2)发展额外的资源分布(石油、木材、水)、主体(军队、公司)和策略(领袖预测未来);(3)收集经验数据使该架构适用于挑选出来的现实世界的案例;(4)建设主机,在线发布 REsCape,使它作为开源工具包,供研究内战的学生和学者们使用、修改和加工。在利用 REsCape 做的研究中,我们探索了种族分化、种族显著性和内战之间的联系,使理解两极分化对冲突影响的案例有着更加细微的差别(Bhavnani and Miodownik, 2008a),我们还评价了在多种资源制度和主体策略下少数种族统治对内战发生的影响程度

(Bhavnani and Miodownik, 2008b)。

表 18.1 REsCape 的实验变化范围

参数名称	参数设置			
A 的策略	德政	掠夺	社会福利	领土控制
B 的策略	德政	掠夺*	社会福利*	领土控制*
资源基础	农业	金伯利岩层钻石	冲积层钻石/工业开采	冲积层钻石/手工开采
资源分布	散布	点源		
族群	A	B		
种族显著性	不明显	总是明显	可变的	
种族分化	高	中等	低	
种族统治	多数种族统治	少数种族统治	竞争力量角逐	

注释:REsCape 的当前版本, B 被限制(\*)为只采取德政策略。

## 18.4 附录

A.1 这个附录提供了在第二节概述的选定模型组件的附加细节。

### 1. 种族:身份、显著性和分化

A.2 我们指定种族显著性作为相关收入的函数:农民个人平均所得和名义对手收入的差异越大,种族自身的特征越明显。令  $N$  等于总人口,  $n_A$  表示来自族群 A 的农民所占的比例,  $n_B$  表示族群 B 所占的比例。族群 A 成员

的个人平均所得定义为  $y_{pc}^{A,r} = \frac{\sum y^A}{n_A \cdot N}$ , 其中  $r$  表示个人平均所得的计算

范围,我们提到“平均范围”,可以从 0(只有农民定居的当前单元)到 10(全部地区)变化,允许农民做“局部的”或近范围的计算,或相反基于“全局”信息来计算。根据相似的逻辑,族群 B 的个人平均所得为  $y_{pc}^{B,r} = \frac{\sum y^B}{n_B \cdot N}$ 。当农民的个人平均所得小于名义对手的个人平均所得,种族划分

变得明显。因此对于族群 A 的成员,种族显著性由  $e_i^A = \frac{y_{pc}^B - y_i^A}{y_{pc}^B}$  给出,

根据相同逻辑, B 的种族显著性由  $e_i^B = \frac{y_{pc}^A - y_i^B}{y_{pc}^A}$  给出。

## 2. 经济: 收入, 支出和支持

A. 3 我们分别用每个部门的贬值率  $\delta_{ki}$ ,  $\delta_{ai}$ ,  $\delta_{aa}$  和  $\delta_{ag} <= 1$  来定义投资  $\bar{i}$ :

$$\bar{i}(t+1) = \bar{i}(t) - \delta \bar{i}(t)_i$$

假定时间连续且没有进一步投资, 则每个投资  $i_0$  呈指数式衰减:

$$\bar{i}(t) = i_0 \exp^{-\delta t}$$

注意对工业生产的投资受到上限  $\bar{i}_{\max}$  的限制, 比如  $\bar{i}_{ki, \max} = \mu_{ki, \max} \cdot k$  和  $\bar{i}_{ai, \max} = \mu_{ai, \max} \cdot a$  (其中  $k$  和  $a$  分别表示一个单元内金伯利岩层和冲积层储藏区的大小), 比如最小投资水平  $\bar{i}_{ki, \min} = \mu_{ki, \min} \cdot k$  和  $\bar{i} = \mu_{ai, \min} \cdot a$  是产生收入所必须达到的水平。我们假定开采金伯利岩层钻石的最小和最大投资水平都超过了开采冲积层钻石的投资水平, 也就是  $\mu_{ki, \max} > \mu_{ai, \max}$  和  $\mu_{ki, \min} > \mu_{ai, \min}$ , 我们还假定对工业钻石生产的投资受限于  $\dot{A}$ , 当  $\dot{B}$  接管对单元的控制权时, 能从以前政府的投资中获利。还要注意的是, 对手工开采钻石和农业生产的投资是没有界限的, 不需要产生收入所需的最低投资水平。

A. 4 工业(冲积层或金伯利岩层)生产收入由如下公式给出:

$$y_{ki} = \rho_{ki} \bar{i}_{ki}, \quad y_{ai} = \rho_{ai} \bar{i}_{ai}$$

其中  $\rho$  是定义工业产出的一个常量。手工业冲积层钻石生产产生的收入由如下公式给出:

$$y_{aa} = \rho_{aa} N^P a_{aa}$$

其中  $\rho_{aa}$  是定义手工业冲积层生产产出的一个常量,  $N^P$  表示单元内农民的数量,  $a_{aa} = a - a_{ai}$ , 其中  $a_{ai} = \frac{\bar{i}_{ai}}{\mu_{ai, \max}}$ 。最后, 农业生产收入由如下公式给出:

$$y_{ag} = (1 + \phi(1 - \exp^{-\frac{\bar{i}_{ag}}{\varphi_{ag}}})) \rho_{ag} N_P$$

其中  $\rho_{ag}$  是农民的生产率,  $N^P$  表示单元内农民的数量,  $\varphi$  是由投资产生的生产率的最大增长量,  $\varphi_{ag}$  是将特定收入水平转换为必需投资水平的换算因子。由于工业生产中钻石采矿的流程是高度组织和控制的, 我们假定掌握控制权的领袖是所有工业生产 ( $s_{ki} = 1$ ,  $s_{ai} = 1$ ) 收入的唯一接受者。转向手工业开采和农业, 我们指定  $s_{aa}$  和  $s_{ag}$  随每个部门的投资一起增长, 还假定在没有投资的情况下, 交纳给  $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$  的收入的最小份额由  $s_{aa, \min}$  和

$s_{ag, \min}$  给出, 最大份额由  $s_{aa, \max}$  和  $s_{ag, \max}$  给出:

$$s(i) = s_{\min} + (s_{\max} - s_{\min})(1 - e^{-\frac{i}{k'}})$$

其中  $k'_{aa}$  和  $k'_{ag}$  是根据给定份额决定必需投资水平的换算因子。注意虽然对手工开采部门的投资对总收入没有直接的影响,但是它影响了  $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$  对农民征税的能力。

### 3. 部门支出决策

A.5 支出策略决定了收入分配给以下种类的份额:(1)强制力的扩张(也就是军事支出);(2)个人消费;(3)投资于工业开采资源(金伯利岩层或冲积层)——一种更容易征税的生产模式;(4)投资于手工开采冲积层钻石——较难征税,但对于  $\dot{B}$  是首选;(5)投资于农业开发——相比其他经济部门,农业提供的回报率较低;(6)投资于农民福利金。表 18. A. 1 描述了经过挑选来实施我们策略集的参数值。注意  $\beta_c$  和  $\beta_r$  是由策略定义的,而不是由资源基础定义。至于  $\beta_{ki}$ 、 $\beta_{ai}$ 、 $\beta_{aa}$ 、 $\beta_{ag}$ ,我们注意每个策略都有一个  $\beta_{ag}$  的基值,和一个投资于钻石采矿的基值( $\beta_{ki}$  代表金伯利岩层钻石,  $\beta_{ai}$  代表冲积层钻石)。在纯粹的农业资源基础情形下,有意于钻石采矿的投资转向了农业(在“掠夺(AG)”的那一行,  $\beta_{ag}$  的值为 0.8,或者为分配给农业的 0.5 与分配给钻石采矿的 0.3 之和)。

表 18. A. 1 主体决策

	领土控制	掠夺	金伯利岩层(i)	冲积层(i)	冲积层(a)	农业	福利
策略 A(资源)	$\beta_c$	$\beta_r$	$\beta_{ki}$	$\beta_{aa}$	$\beta_{aa}$	$\beta_{ag}$	$\beta_w$
德政(AG)	0.4	0	0	0	0	0.8	0.2
德政(AL)	0.4	0	0	0.1	0	0.7	0.2
德政(KI)	0.4	0	0.1	0	0	0.7	0.2
掠夺(AG)	0.2	0.5	0	0	0	0.8	0.2
掠夺(AL)	0.2	0.5	0	0.3	0	0.5	0.2
掠夺(KI)	0.2	0.5	0.3	0	0	0.5	0.2
福利(AG)	0.25	0	0	0	0	0.2	0.8
福利(AL)	0.25	0	0	0.2	0	0	0.8
福利(KI)	0.25	0	0.2	0	0	0	0.8
领土(AG)	0.8	0	0	0	0	1	0

续 表

	领土控制	掠夺	金伯利岩层(i)	冲积层(i)	冲积层(a)	农业	福利
领土(AL)	0.8	0	0	0.2	0	0.8	0
领土(KI)	0.8	0	0.2	0	0	0.8	0
策略 B(资源)	$\beta_r$	$\beta_s$	$\beta_{si}$	$\beta_{ai}$	$\beta_{aa}$	$\beta_{ac}$	$\beta_w$
德政(AG, KI)	0.3	0	0	0	0	0.8	0.2
德政(AL)	0.3	0	0	0	0.1	0.7	0.2

注意:这个表总结了每个程式化策略下支出的分配。最左边的一列表示策略名称和(圆括号里的)资源基础。其后两列“领土控制”和“掠夺”表示收入分配给强制力和个人消费或窃取的份额。依照其后五列所指定的权重,任何其余收入都投资于经济部门。

#### 4. 空间支出决策

A. 6 在为不同种类中分配收入之后,领袖根据以下因素在单元格中分配资金:

(1) 对他/她统治下的每个单元格指派投资目标:

- 在金伯利岩层和冲积层工业部门,目标是获得最大的投资。
- 在冲积层手工开采部门,目标与可利用手工采矿的储藏区的大小成比例。
- 在农业部门,目标是与单元内农民的数量成比例的。
- 社会支出目标被定义为维持农民同情心(所要求的)水平(-10 代表  $\dot{B}$ , +10 代表  $\dot{A}$ )。

(2) 根据单元内目标投资水平和现有投资水平的差别比例分配可用资金。

#### 5. 冲突:强制力,控制和内战

A. 7 依据一个(以)单元的多个具体特征(为参数)的函数,控制策略能精确地确定  $\dot{A}$  和  $\dot{B}$  试图控制地区中哪些单元,以及强制力在这些单元中的分布。第一个特征是有关领土内(金伯利岩层或冲积层)钻石的存在——换句话说,(是有关)从开采和税收中获得的期望收入。然后是人口特征:一个单元是否是密集居住,并且由同族构成。控制策略的第三个决定性的特征是到首都的距离,(距离远)给政府的控制施加了困难,容易导致叛乱或敌对。最后, $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$  会考虑一个单元和已经处于他们控制下的单元的接近程度。控制策略给每个单元都指派了一个基于下列要素以及由  $\gamma$  给出的相关权重的优先值  $v$ :

- 单元内金伯利岩层/冲积层钻石的存在( $\gamma_{kim}$ ,  $\gamma_{all}$ )
- 农民人口密度( $\gamma_{NP}$ )
- 农民所属种族( $\gamma_{eP}$ )

- 到首都的距离( $\gamma_{cap, close}$ ,  $\gamma_{cap, far}$ )
- 和 $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$ 控制单元的接近程度( $\gamma_{close}^{\dot{A}}$ ,  $\gamma_{close}^{\dot{B}}$ )
- 单元和相邻单元的平均控制值是支持 $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$ 的( $\gamma_q^{\dot{A}}$ ,  $\gamma_q^{\dot{B}}$ )

A.8 基于这些要素, $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$ 忽略优先值  $v$  低于优先值阈值  $\tau$  的单元,以及所有已经处于他们控制下的单元。特别地, $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$ 选择  $n$  个有最高优先值的单元,然后在这些单元以及邻近单元增大强制力。表 18. A. 2 描述了给每个主体策略的不同要素赋予的权重。要注意的是掠夺和领土控制策略表现为较高的  $\tau$  值,使得在这些情况下选择要控制的单元更为重要。相反的是,德政和福利策略以  $\tau = 0$  为特征,使得实际上每个单元都成为控制和投资的候选目标。在后面两种情况下中,控制策略参数决定哪些单元比其他单元更有价值,因此描绘了与单元内的投资相一致的优先权。和上文描述的投资参数相比,控制策略参数使我们能更精确地指定主体行为。

表 18. A. 2 控制策略参数

策略 A	$\gamma_{N^P}$	$\gamma_{e^P}$	$\gamma_{all}$	$\gamma_{kim}$	$\gamma_{cap, close}$	$\gamma_{cap, far}$	$\gamma_{close}^{\dot{A}}$	$\gamma_{close}^{\dot{B}}$	$\gamma_q^{\dot{A}}$	$\gamma_q^{\dot{B}}$	$\tau$
德政	1	0	1	1	1	1	1	0	-1	1	0
掠夺	2	-1	2	2	1	0	0	-1	0	0	4
福利	1	2	1	1	1	1	0	1	-1	1	0
领土	2	1	2	2	1	0	0	1	0	0	3
策略 B											
德政	1	0	1	1	0	1	-1	1	-1	1	0

A.9 为了确定控制,我们指定一个控制阈值  $\tau_q > 0$ ,如果  $q_c > \tau_q$ ,单元落入 $\dot{A}$ 的控制;如果  $q_c < -\tau_q$ ,则单元落入 $\dot{B}$ 的控制;如果  $-\tau_q < q_c < \tau_q$ ,单元既不被 $\dot{A}$ 也不被 $\dot{B}$ 控制。我们用梳理过的衡量强制力、农民同情心和地理的方法来定义  $q_c$ 。特别地,我们使用强制力的对数比例  $\frac{c^{\dot{A}}}{c^{\dot{B}}}$ ,再加上一项  $v_c N^P$  来修改这个比例(其中  $N^P$  是单元内农民数量,  $v_c$  是一个常数):

$$\log\left(\frac{c^{\dot{A}} + v_c N^P}{c^{\dot{B}} + v_c N^P}\right)$$

结果是转移控制的成本随单元内农民人口的规模增加。下面,我们增加  $s^P$

来说明农民同情心之和对单元内权力平衡的影响,增加  $\eta_c \frac{2(d_m - d)}{d_{\max}}$  来衡量地理的影响(其中  $d$  是单元到首都的距离, $d_m$  是单元到首都和边界中点的距离,  $d_{\max}$  是边界和首都的距离),由此得到:

$$\log(\frac{c^A + v_c N^P}{c^B + v_c N^P}) + \zeta_c \bar{s}^P + \eta_c \frac{2(d_m - d)}{d_{\max}}$$

其中  $\zeta_c$  权衡农民同情心的影响,  $\eta_c$  衡量了地理的影响。Logistic 变换率为(自从我们定义了  $q_c \in [-10, 10]$ ):

$$q_c = 20 \left( \frac{1}{1 + e^{-(\log(\frac{c^A + v_c N^P}{c^B + v_c N^P}) + \zeta_c \bar{s}^P + \eta_c \frac{2(d_m - d)}{d_{\max}})}} - 0.5 \right)$$

注意网格单元内的冲突使任一主体不可能控制这个单元。

## 参考文献

- AXELROD R (1997) "Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences". In Conte, R., Hegselmann, R., and Terna, P. (eds.) *Simulating Social Phenomena (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems)*, Berlin: Springer-Verlag.
- AXELROD R and Cohen, M D (2001) *Harnessing Complexity: Organizational Implications of a Scientific Frontier*, Chicago: The Free Press.
- BANKES S C (2002) "Tools and Techniques for Developing Policies for Complex and Uncertain Systems". Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 99, pp. 7263~7266.
- BHAVNANI R and Miodownik D (2008a) "Ethnic Polarization, Ethnic Salience, and Civil War". In Progress.
- BHAVNANI R and Miodownik D (2008b) "Ethnic Minority Domination and Civil War". In Progress.
- BONABEAU E (2002) "Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems". Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 99, pp. 7280~7287.
- BUHAUG H and Gates S (2002) "The Geography of Civil War". Journal of Peace Research, 39(4), pp. 417~433.
- CEDERMAN L - E and Girardin L (2007) "Beyond Fractionalization: Mapping Ethnicity onto Nationalist Insurgencies". American Political Science Review, 101(1), pp. 173~185.
- COLLIER P and Hoeffer A (1998). "On Economic Causes of Civil War". Oxford Economic Papers, 50(4):563~573.
- COLLIER P and Hoeffer A (2004) "Greed and Grievance in Civil War". Oxford Economic

- Papers, 56(4), pp. 563~595.
- COLLIER P and Hoeffler A (2005) "The Political Economy of Secession". In Hannum H and Babbit E F (eds), *Negotiating Self-Determination*. Lexington Books, Lanham MD.
- CONTE R, Hegselmann R, and Terna P (1997) *Simulating Social Phenomena. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Springer.
- DOYLE M W and Sambanis N (2000) "International Peacebuilding: A Theoretical and Quantitative Analysis". *American Political Science Review*, 94(4), pp. 779~801.
- ELBADAWI I and Sambanis N (2002) "How Much War Will We See? Explaining the Prevalence of Civil War". *Journal of Conflict Resolution*, 46(3), pp. 307~334.
- FEARON J D and Laitin D D (2003) "Ethnicity, Insurgency, and Civil War". *American Political Science Review*, 97(1), pp. 75~90.
- FEARON J D, Kasara K, and Laitin D D (2007) "Ethnic Minority Rule and Civil War Onset". *American Political Science Review*, 101(1), pp. 187~193.
- GATES S (2002) "Recruitment and Allegiance: The Microfoundations of Rebellion". *Journal of Conflict Resolution*, 46, pp. 111~130.
- HEGRE H (2002) "Some Social Requisites of a Democratic Civil Peace: Democracy, Development, and Armed Conflict". Paper presented to the Annual Meeting of the American Political Science Association, Boston, MA, 29 August~1 September.
- HEGRE H and Sambanis N (2006) "Sensitivity Analysis of the Empirical Literature on Civil War Onset". *Journal of Conflict Resolution*, 50, pp. 508~535.
- HUMPHREYS M (2005) "Natural Resources, Conflict, and Conflict Resolution: Uncovering the Mechanisms". *Journal of Conflict Resolution*, 49(4), pp. 508~537.
- LUJALA P, Gleditsch N P, and Gilmore E (2005) "A Diamond Curse?: Civil War and a Lootable Resource". *Journal of Conflict Resolution*, 49(4), pp. 538~562.
- LUSTICK I S, Miodownik D (forthcoming) "Abstractions, Ensembles, and Virtualizations: Simplicity and Complexity in Agent-Based Modeling". *Comparative Politics*.
- MEYER A D, Gaba V, and Colwell K A (2005) "Organizing Far from Equilibrium: Non-Linear Change in Organizational Fields". *Organization Science*, 16(5), pp. 456~473.
- MONTALVO, J G and Reynal-Querol M (2005) "Ethnic Polarization, Potential Conflict, and Civil Wars". *The American Economic Review*, 95(3), pp. 796~816.
- PARUNAK H V D, Savit R, and Riolo R L (1998) "Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and Users' Guide". In *Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, Springer, pp. 10~25.
- REYNAL-QUEROL M (2002) "Ethnicity, Political Systems, and Civil Wars". *Journal of Conflict Resolution*, 46(1), pp. 29~54.
- ROSS M L (2004) "What Do We Know about Natural Resources and Civil War?" *Journal of Peace Research*, 41(3), pp. 337~356.
- ROSS M (2006) "A Closer Look at Oil, Diamonds, and Civil War". *Annual Review of Political Science*, 9, pp. 265~300.
- SAMBANIS N (2001) "Do Ethnic and Nonethnic Civil Wars Have the Same Causes? A Theoretical and Empirical Inquiry (Part 1)". *Journal of Conflict Resolution*, 45(3),

pp. 259~282.

SNYDER R and Bhavnani R (2005) "Blood, Diamonds, and Taxes: Lootable Wealth and Political Order in Sub-Saharan Africa". *Journal of Conflict Resolution*, 49 (4), pp. 563~597.

WIMMER A, Cederman L - E, and Min B (2007) "Ethnic Politics and Violent Conflicts, 1946 ~ 2005: A Configurational Approach". Paper presented at the conference Disaggregating the Study of Civil War and Transnational Violence, University of Essex, 24~25 November 2007.

## 第 19 章

# 始祖效应、漂变和自适应变化对欧洲新石器时代早期种植作物的影响研究<sup>①</sup>

学术界对新石器时代欧洲中心区域农作物多样性显著减少的解释存在两种不同的假说。一种假说认为与欧洲东南部和地中海地区相比,欧洲中部环境因素较为复杂,不同区域有着不同的作物选择策略;另一种假说认为这个变化是中性漂变的结果,与一个原本较小的种群的迅速膨胀有关。为了检验第二个假说,James Conolly、Sue Colledge 和 Stephen Shennan 使用 Netlogo 工具包构建了基于主体建模的计算模型,通过改变原始种群规模、种群增长速度以及传播方式等参数,估算不同条件下种群的物种多样性度,并与考古观察得出的多样性度相比较。模拟结果表明:中性漂变过程算出的多样性结果和实际线纹陶时期(LBK)的有较大差异,观察得出的变化不能仅仅用中性漂变来解释。前线纹陶时期(pre-LBK)到线纹陶时期(LBK)还存在非中性漂变(选择)因素对作物选择产生了影响,造成同质性。此外,作者还论证了物种数量减少的速度超过了漂变过程的预测,重新评估了欧洲新石器时代早期作物的自适应变化。此模型的建模方法以及相关计算实验的结果分析等内容详见下文:

### 19.1 引 言

人类从只会单纯地攫取食物到能够生产食物一直被认为是现代人类前期最

① 本章译自:James Conolly, Sue Colledge, Stephen Shennan. Founder effect, drift, and adaptive change in domestic crop use in early Neolithic Europe. *Journal of Archaeological Science*, 2008 35:2797–2804. 已取得授权,授权方:ELSEVIER。

重要的发展,这个转变也对人类生态学、人口统计学以及人类社会生活的各个领域产生了深远影响。农业首先起源于西南亚,之后不久向东和向西迅速扩散和传播,永久性地改变了欧亚大陆的社会形态和环境地貌。为了更好地理解早期欧洲农业系统的演化以及伴随出现的向其他地区扩散的过程,我们按照时间和空间收集并分析了超过 250 处西南亚和欧洲西北部新石器时代前期及早期遗址的农作物和相关杂草的有关文献数据。这些数据的模式和结构是由欧亚农业起初五千年的人口流动和农作物种植策略演化共同确立和体现的(Colledge et al., 2004, 2005; Croward et al., 2008)。

最近,Croward 等(2008)对西南亚和欧洲新石器时代农业系统进行了遗传分析,测定了原始农作物的遗传因素(与人的作用和文化传播过程无关)。本章的研究强调了新石器时代农作物变异的历史偶然性,即任何一个农业系统的特征在部分程度上都受之前的系统的影响。但需要说明的是,这个研究所用到的数据集是基于欧洲这个大范围的,根据我们的需要将局部并入区域群体中研究,忽略局部的变异性。本章关注的重点是农作物种植的演化及与其相关的早期欧洲南部和中部新石器时代的种群。

本章分析用到的距今 8500—9500 年的遗址中现存/缺失的数据,我们最大限度地减小由于埋藏学偏移、不同采样技术以及交互观测(inter-observation)的测定造成的误差效应(Colledge et al., 2004)。在这需要说明的是,本研究涉及到的大多数遗址中的植物遗存已经碳化(前线纹陶时期(pre-LBK):94% 的遗址;线纹陶时期(LBK):93% 的遗址;后线纹陶时期(post-LBK):88% 的遗址)。在这个时期中,种植作物进入欧洲东南部,欧洲中部建立农业社会(即,包括线纹陶文化(LBK)的起源和发展,见关于欧亚大陆史前农业发展及特点的概述(Colledge and Conolly, 2007))。

人口流动是农业传播的原因的论断在学术界有很大争议,线粒体 DNA 分析已证实人们高估了人口流动对农业在欧洲多数地区传播的影响(Richards et al., 2000; Richards, 2003),而线纹陶文化作为新石器时代的重要组成部分传播到欧洲中部则是一个例外,学界大多认为此传播过程的确包含了人口流动的因素。

本章重点解释下面这个显著现象——线纹陶时期(LBK)的农作物种类数目少于欧洲东南部和亚洲西部更早时候遗址所发现的作物种类数量(Colledge et al., 2005; Kreuz, 1990 and Kreuz, 2007)。我们早期认为这是选择的压力,即自然选择和人工选择共同决定的,同时也提出有可能与中性漂变有关(Colledge et al., 2005)。而通过长时间的观察发现,某些文化特征的发生频率会随时间变化而变化,如陶瓷设计要素、弹点形态(projectile point morphology)甚至小孩

的名字等。为此我们提出了一个有力的原假设——中性漂变(Neiman, 1995; Shennan and Wilkinson, 2001; Hahn and Bentley, 2003)。中性漂变描述了随着时间推移一些偶然事件的共同作用所引起的变化的随机过程。这些偶然事件包括一些被复制和一些不被复制的文化传统以及创新变革等。本章的思路是：如果所观察到的变化属于漂变过程所预测的范围，那么就没有必要再通过改变一个种群自然及文化的适应或选择变量的频率寻找其他解释；然而，如果我们通过统计和建模得出，在前线纹陶时期(pre-LBK)到线纹陶时期(LBK)之间，种植作物的模式超出了仅由漂变所能解释的，我们则需要对线纹陶时期(LBK)种植作物物种多样性减少的解释重新评估，并且重新思考那些可能引起变化的选择压力的来源。

## 19.2 新石器时代早期种植作物的使用

虽然在欧洲西南部新石器时代遗址所找到的种植作物的出现频率与欧洲中部所发现的显著不同，但是范围是一样的。比如，欧洲东南部78%的新石器时代遗址发现了三种原始谷类作物：单粒小麦(*Triticum monococcum*)、二粒小麦(*Triticum dicoccum*)和皮大麦(*Hordeum vulgare*)，但是在欧洲中部仅有23%的遗址出现这三种作物。这个时期还有无脱粒小麦(*Triticum aestivum/durum*)和青稞(*Hordeum vulgare var. nudum*)，欧洲东南部至少一半的遗址存在这两种作物，欧洲中部却仅有25%的遗址有。豆类植物也存在类似情况，欧洲东南部84%的遗址存在过两至五种豆类植物，而只有35%的线纹陶文化遗址有证据表明曾存在过两种以上豆类作物。

表19.1比较了前线纹陶时期(pre-LBK)(即巴尔干地区新石器时代早期)、线纹陶时期(LBK)和后线纹陶时期(post-LBK)(即新石器时代中期)出现过栽培作物的遗址数量(详细数据见Colledge et al., 2004; Colledge et al., 2005; Shennan and Conolly, 2007)。分析中相关的遗址分布见图19.1。

**表 19.1 前线纹陶时期 (pre-LBK) (即巴尔干地区新石器时代早期, 距今 8500—7500 年)、线纹陶时期 (LBK) (距今 7500—7000 年) 和后线纹陶时期 (post-LBK) (新石器时代中期, 距今 7000—6500 年) 出现过栽培作物的遗址数量。**

通用名称	分类	前线纹陶时期	线纹陶时期	后线纹陶时期
燕麦	燕麦属	13	6	3
鹰嘴豆	鹰嘴豆	3	0	0

续 表

通用名称	分 类	前线纹陶时期	线纹陶时期	后线纹陶时期
脱壳大麦	大麦	25	18	6
青稞	裸大麦	10	14	9
草豌豆	山黧豆	8	0	0
扁豆	兵豆	23	20	5
亚麻	糜子	5	24	4
谷	黍	0	10	3
罂粟	罂粟属	0	11	1
豌豆	豌豆属	18	41	6
黑麦	黑麦属	3	6	1
无脱粒小麦	小麦属	16	11	11
二粒小麦	二粒小麦	27	76	21
单粒小麦	硬粒小麦	26	65	23
斯佩尔特小麦	斯卑尔脱小麦	1	5	6
苦野豌豆	苦野豌豆	12	1	0
蚕豆	豆科野豌豆属	0	1	0
均无		32	85	24
多样性度( $t_F$ )		8.86	6.01	6.31

注:前线纹陶时期(pre-LBK)和线纹陶时期(LBK)的差异非常明显( $X^2$ ,  $p < 0.001$ )。五种谷类作物——单粒小麦、二粒小麦、脱壳大麦、青稞和无脱粒小麦间的差别也很明显( $X^2$ ,  $p < 0.01$ )。而线纹陶时期(LBK)和后线纹陶时期(post-LBK)(不包括这两个时期均不存在的两种作物)五种主要作物出现的次数( $X^2$ ,  $p < 0.02$ )差异也很显著( $X^2$ ,  $p = 0.04$ )。 $t_F$ 这个指数用来描述多样性, $t_F$ 的数值越高,表示多样化程度越高。

本章用 Neiman(1995)在公式(7)中定义的统计量  $t_F$  来量化三个不同时期的作物多样性。这是一个用于观测表中一个集合之内的变量(例如:主题风格或者作物品种)的频率的可变性度量标准,并且考虑到集合大小所产生的抽样误差。可以看出,某些作物(特别是脱壳小麦、扁豆和苦野豌豆)种植面积急剧减少,其他农作物(特别是二粒小麦、单粒小麦和豌豆)种植量增加,导致线纹陶时期(LBK)作物种类较少(即同质性增加)。线纹陶时期(LBK)超过 50% 的地区仅种植二粒小麦或者二粒小麦和单粒小麦,大约 60% 的地区只种植豌豆。总之,更大比例的人口食用的作物种类少了。这个情况彻底改变了东南欧地区和西南亚地区之前的农业体系,形成了有利于农业发展的规范。

认为一个处于迅速增长阶段且有优先的垂直传播(即“无偏见的”传播, Richerson and Boyd, 2005:67)以及传统农业革新率低的原始种群,有时会随机迁徙改变传统农业生产的方法。随着时间的推移,可能仅仅由于偶然的因素导致种植的作物类型越来越少,从而降低了作物多样性,而和气候没有任何关系。我们会更详细地考虑这两种假设——选择和漂变——的正确性。

### 19.2.1 原假设: 中性漂变

相比下文的自然选择论者假说,我们假设某种形式的中性漂变导致线纹陶时期(LBK)作物多样性减少(Colledge et al., 2005)。由于文化变异数量的减少和取样效应,小种群往往更容易发生漂变。物种漂变过程也受到单向传递(Richerson and Boyd, 2005:66 – 70)的影响,单向传递进一步减少了种群中各种变异数体,随着时间的推移,取样效应的误差也随之增加,同时也抑制了新物种的产生。更确切地说,漂变和创新导致的结果截然不同,漂变会使变异减少,从而降低多样性,而创新则会增加变异数体。因此,在创新度低并且没有任何自适应压力的种植情况下,物种变异数体减少是自然趋势(Neiman, 1995:14)。

线纹陶时期(LBK)农业体系初步框架刚建成时,文化现象仍较偏向保守,单向传递占主导地位。关于商业中的创新扩散、小农经济以及农民改变种植作物或方法的动机和偏好的研究非常多(Freeman, 1985; Browder, 1994 and Marshall et al., 1997),但大多数对小农经济风险等的研究不是针对线纹陶时期(LBK)的。我们认为,一般来说,生活在殖民地的农民更不愿承担风险,只要生产出的作物满足经济需要即可。总之,如果收获可以预期,并且回报持续良好的话,他们就没有动机也不愿去尝试种植不同的作物,就像一句老话所说的:“没问题就别革新”(Richerson and Boyd, 2005:67)。有个具体的例子,18至19世纪是欧洲农业社会时期,加拿大1820年移民手册提到,加拿大人缺乏施肥的概念,“我们要求加拿大人和我们一样把肥料洒在土地上,但是他们通常回答:‘没这必要,我们父辈从没这么做,为什么我们要这么做?’”(CIHM, 1820, Microfiche no. 61684)。Blanton(2003)也提出,17世纪初,詹姆斯敦人民最初不愿意接受新世界殖民者带来的狩猎鹿和火鸡的方法,改变自己的生活饮食(2003:194),但到那个世纪末他们的饮食已经实现多样化(2003:198)。还有一个例子是 Henrich(2002)提出的:秘鲁的马齐跟加农民几乎不知道其他人的种植方法,相互传递信息的方式也特别少。我们认为,线纹陶文化同样是一个以无偏单向传递为主,有偏水平传递(即人对人或部落对部落传递)为辅的文化体系。线纹陶文化的创新非常低,这点从农作物作用的范围就能看出(不可以忽略,罂粟和小米这种不怎么重要的作物种植率很低)。

无偏单向传递导致种植多样性降低的原因有以下几种。(1)创新性思想(如新的农作物或新的种植方法)在人群中传播的可能性减少了;(2)任何错误的模仿(比如使用人们在特定环境下为获取种子或者种植某特定物种的采取方法,会失败)不可能在横向扩散中得到缓解;(3)人口水平的取样效应可能降低多样性(例如:碰巧有一些以三种作物为重点种植的农民在繁殖上更成功),这种效应不太可能通过横向传播纠正。因此,我们认为这种碰巧的混合效应独立于所有已提出的对外部环境的选择或适应,可能会使原先多元化的种植模式,逐渐趋于线纹陶时期(LBK)更均匀地集中种植少数作物的形式。我们通过一个模拟模型对一个取样误差(有创新的漂变)为仅有的操作过程的中性模型建立可能被预期的概率估计来检验我们的原假设。

### 19.2.2 对立假设:选择

农作物发源地的气候和后来传播到的地区的气候有显著差异,这无疑会影响种植策略。农业传播到欧洲,种植作物要适应欧洲温带气候,那里夏季干旱、冬季寒冷,一天中会出现多种季节的气候特征(Harris, 1996:562)。甚至在前线纹陶时期(pre-LBK)和线纹陶时期(LBK),欧洲中部和东南部的温度和降水还有显著差异。如,索非亚7月份白天平均最低温度是13.8℃,平均降雨量为63 mm,而慕尼黑则分别是12.6℃和132 mm。这种气候差异对起源地在亚洲西部的农作物在欧洲的种植影响较大,尤其是鸡豌豆等对温度变化敏感和生长期较长的作物。

此外,一些学者认为,线纹陶时期(LBK)(7500 cal BP 到 7000 cal BP 之间)处在气候相对更加湿冷的时期(也就是 Cerin 时期<sup>①</sup>),这就进一步加大了最初几个世纪欧洲中部和东南部地区农业发展的差异性(见 Kreuz, 2007: 260; Hormes et al., 2001; Magny et al., 2003)。然而,最近区域气候模型(例如, Davis et al., 2003)的研究数据和对花粉、湖平面变化和其他资料的调查(例如, Heiri et al., 2004; Kofler et al., 2005; Magny et al., 2003; Spurk et al., 2002)显示,7500 cal BP 以后中欧平均气温的波动比较小,没有超过1℃(Davis et al., 2003:1710)。即便如此,对四处迁徙的农民来说,生长条件的差异对某些始祖作物的生存能力有不容忽视且必然的影响,这使一些生长的比较好的作物得到了更多的种植。豆类作物中,小扁豆和鹰嘴豆种植期变短,且秋季湿润的话就不能生存(Smartt, 1990)。豌豆则是个例外,不论是温暖还是凉爽的气候它都能适应(Zohary and Hopf, 2000:101),因此很多线纹陶遗址都有豌豆的遗

<sup>①</sup> 译者注:距今6600—7700年。

存。谷类的两个始祖,二粒小麦和单粒小麦在基础生理以及环境忍耐力上和他们的祖细胞很相似(Blumler, 2002:102),能够适应他们进化地——地中海极端的气候特征(Zohary and Hopf, 2000:36,46,67)。农业在欧洲大陆间断性地传播(Biagi et al., 2005 and Guilaine, 2003;又见 Whittle et al., 2002),先前已部分解释为作物需要花一定时间适应新的环境(比如耐冷性、光照周期性和春化作用,Halstead, 1989 and Bogucki, 1996)。然而,大麦和无脱粒小麦(即做面包用的麦子)更适合温带/大陆性气候(Zohary and Hopf, 2000:54 – 55; Bogaard, 2004:148),所以在线纹陶时期(LBK)大麦和无脱粒小麦(尽管欧洲东南部早期新石器时代文化遗址中发现了这些物种的广泛存在)的种植减少让人吃惊。学术界曾经以为无脱粒小麦(以及大麦)的种植比目前遗址发现的种植量更大。

总之,欧洲中部和东南部的气候差异降低了一些作物在线纹陶时期(LBK)种植的可能性,但这些作物在巴尔干新石器时代早期仍有一定的种植比例。我们首先排除几个受自然选择影响较大的作物,如鹰嘴豆,草豌豆,紫云英和扁豆,以及五个珍稀品种,然后量化剩下的作物,并重新计算多样性指数,看看不同阶段作物用途的不同是否能仅仅用物种的减少来解释。如表19.2所示,差异还是存在的——这是一个几乎未经修饰但相当精确的概括,线纹陶时期(LBK)的农民和巴尔干新石器时代的相比,种植了更多的二粒小麦,豌豆和单粒小麦。

表 19.2 欧洲中部出现不易受生产力影响的八个物种的遗址数目和作物多样性

通用名称	分 类	前线纹陶时期	线纹陶时期	后线纹陶时期
燕麦	燕麦属	13	6	3
脱壳大麦	大麦	25	18	6
青稞	裸大麦	10	14	9
豌豆	豌豆	18	41	6
谷	黍	0	10	3
无脱粒小麦	小麦属	16	11	11
二粒小麦	二粒小麦	27	76	21
单粒小麦	硬粒小麦	26	65	23
均无		32	85	24
多样性度( $t_F$ )		5.3	3.0	4.3

### 19.3 线纹陶时期(LBK)作物中性漂变模型

本章使用基于主体建模方法建立模拟模型对原假设进行检验,这样我们就能观察多样性中各种变量随时间变化而随机变化的情况,包括原始种群规模、种群增长速度以及各种形式的传播。选择基于主体建模方法模拟漂变的原因是漂变过程是随机的而非确定的,每种输出会有不同的结果,在运行多次后的组合结果会提供其平均输出和方差的信息。然后分析最终运行出的结果,估算出多样性值,并和考古的观察值相比较。该模型是由 Netlogo 工具包构建的(Wilensky, 1999)。

这个模型的主体是表 19.2 列出的 8 个物种,这 8 个物种受到恶劣环境选择影响的可能性较小。这 8 个物种在原始种群模型里出现的概率用它们在前线纹陶时期(pre-LBK)种植的频率来表示,具体数据可以在考古家整理的考古数据库中查得(Shennan and Conolly, 2007)。频率和他们随时间的改变可用作计算奈曼  $t_F$  多样性指标(见表 19.1)。

漂变过程是由传播过程和时间这两个变量控制的,我们打算通过考古观测得到的数据确定这两个变量的值。时间变量比较容易处理:如,只要让模拟中的时间变换与历年相等即可。如果将线纹陶文化首次在匈牙利 Transdanubia 地区出现的时间看作起始点,将后线纹陶时期(post-LBK)种群如 Stichbandkeramik 出现在中欧地区的时间看作结束点,这样就有了一个从距今 7600 年到距今 7000 年的时间跨度(Dolukhanov et al., 2005; Jacomet, 2007 and Kohler-Schnieder, 2007),这段时间范围正好与表 19.1、表 19.2 中的定义的前线纹陶时期(pre-LBK)、线纹陶时期(LBK)、后线纹陶时期(post-LBK)作物使用的数据相关。因此在模型运作过程中,如果我们将一个模型周期大致等同于一年,那么模型运行 500—600 个周期也就合理解决了运行时间的问题。

传播过程变量则相对难确定些,我们可以分解为两部分:模式和扩散(或减少)的速率。模式用于定义文化知识的传播,模拟过程中考虑两种情况:随机复制和垂直传递。前者并不符合已建立的模型,主要用于提供一个模型环境的测试,后者则被假定为线纹陶时期(LBK)的模型情态,理由在上面几节已经阐述。

首次对人口增长率估计的证实表明,垂直传播的速率与考古记录的联系可能并不紧密,比如,Bocquet-Appel(2002)通过分析墓地出土的骨骼例证,认为新石器时代早期人口年增长率为 1.24%,500 年后略有下降,是 1.16%。这个较高估计的误差范围可能很大,但是 Petrasch (2001)研究得出线纹陶时期(LBK)

每年的增长速率在 0.9% 和 2.7% 之间; Merzbach Valley 也证实线纹陶时期 (LBK) 100 至 150 年的一段时间, 定居点总数增加了 300% (Dobouloz and Ginouvès, 2006)。综合墓地数和定居点数目, 我们作出较为合理的假设: 线纹陶时期 (LBK) 早期人口增长速率较快, 接近或者超过了 1%, 大约每 70 年定居点数会增加一倍。在模型运作中, 我们假定增长率为 1%。为了允许群体的漂变, 移去主体变动也是很必要的(因为仅仅增加从种群中随机变异的新主体并不会改变种群的组成)。因此, 我们假设群落中每个个体的粗出生率  $b$  为 50%——这个值较高, 但对快速增长的种群来说很正常 (Bocquet-Appel and Naji, 2006; Shennan and Edinborough, 2007), 每个个体的粗死亡率为 40%。模型中的参数可因此作如下定义:

- (1) 创建一个有  $n$  个主体组成的原始群落, 每个主体代表一个线纹陶时期 (LBK) 居住点(以下简称主体);
- (2) 用八个二进制数表示各个主体是否拥有表 19.2 中列出的八种作物(即每个作物都可以表示为存在或不存在)。在前线纹陶时期 (pre-LBK) 原始群落的八种作物各自出现的频率可以观察到的次数  $p$  表示(见表 19.2);
- (3) 人口每增长 1% 需要完成以下过程: 一些有粗出生率  $b$  的随机主体繁殖一个与他们同样的个体拷贝, 同时随机选择一些粗死亡率  $d = b - 1\%$  的主体, 并当增长率为 1% 时结束;
- (4) 这个模型有两个互相对立的传播方式: 随机复制和垂直传递。对于前者, 一个主体在每个时代周期中随机选择另一个主体并随机选择八个变种之一复制它当前的状态; 而垂直传递条件下, 每个新主体是其的母体的一个克隆(受传递误差影响, 见下文);
- (5) 每次模拟都需要经历 500 个运行周期来计算与奈曼  $t_F$  作物多样性测量变量的误差范围。

因此有三个参数可以被改变:(1)初始的主体数量;(2)变异体复制的方式;(3)出生率(尽管增长率已确定为 1%)。这个模型研究的重点是物种多样性随时间的变化, 只存在一个输出值  $t_F$ , 并且在每个时间步长都需要计算。我们因此能通过实验计算在不同的初始群落规模与出生和传播机制条件下, 仅群落漂变能否将作物多样性指数从起始状况的 5.3 降低到与考古观测数据  $t_F$  相匹配的值 3.0(表 19.2)。注意到由于没有创新, 当变异的比例固定下来后(所有的主体要么都有某种变异, 要么都没有这种变异)所有的运行最终都会稳定为一个  $t_F$  值。

我们作出如下原假设: 在一个稳定的垂直传播模型中, 相对前线纹陶时期 (pre-LBK), 线纹陶时期 (LBK) 作物多样性降低的原因仅是群落漂变。为了使这个假设不被拒绝, 我们需要证明由于取样误差,  $t_F$  值会在合理的时间内明显

的值为 5% (即, 出现一个新主体时, 八种物种都有  $1/20$  的可能性出现母体并未能传递给子代(如果存在)的情况)。漂变速率不出意料的比仅存在垂直传递的漂变速率提高了不少, 模拟得到的 500 年后的  $t_F$  值为  $4.90 \pm 0.68$ , 和没有计算传递误差率的结果明显不同 ( $K-S$ ,  $D=0.25$ ,  $p<0.005$ )。但是在水平传递条件下, 5% 的传递误差率对整体漂变的影响并不大:  $t_F$  的平均值为  $4.43 \pm 0.84$ , 与没有误差时所看到的相比并没有统计意义上的差异 ( $K-S$ ,  $D=0.13$ ,  $p>0.3$ )。这是因为水平传递本质上是一个随机传递过程, 所引起的进一步的随机误差并不会导致显著不同的模式。

### 19.3.2 总结

第一步表明, 将群落初始主体数设为 20 是比较合理的, 所得出的物种多样性和观测到的线纹陶时期(LBK)物种多样性类似。第二步表现了对不断减少的物种多样性受随机复制的预期影响, 得出  $t_F$  的平均值为 4.3。第三步我们限定复制只通过垂直传递进行。对于在欧洲相对来说可预测的温和地区的迁徙农业, 我们认为其更类似于垂直传递而不是随机复制。在这样的条件下  $t_F$  的平均值为 5.3, 如果考虑传递误差率,  $t_F$  的平均值会减小。但即使传递误差率高达 5%, 观测所得的线纹陶时期(LBK)物种多样性 3.0 仍比任何一个实验的平均结果要低两个标准差以上。假定我们的模型参数大体上类似于发生在线纹陶时期(LBK)的作物选择决策过程, 由此可以推断, 所观察到的从前线纹陶时期(pre-LBK)到线纹陶时期(LBK)物种多样性下降不可能仅是中性漂变的作用。我们因此需要考虑结合自然选择理论来解释这一现象。

## 19.4 讨 论

实验模型的结果显示: 与中性漂变所引起的预期变化相比, 在与线纹陶时期(LBK)相类似的不同条件下的模拟结果有较大的差异, 所以我们谨慎地拒绝了中性模型这个原假设, 并出这样的结论: 观察得出的变化不能仅仅用中性漂变来解释, 前线纹陶时期(pre-LBK)到线纹陶时期(LBK)一定有非中性漂变(选择)因素对作物选择产生了作用, 造成了我们从数据集中所观察到的同质性的影响。

一些学者已经指出了欧洲东南部和中部早期新石器时代遗址上作物之间的差异。Kreuz (2005)等人在比较德国和奥地利 33 个线纹陶时期(LBK)的遗址和保加利亚的 6 个新石器时期早期的遗址之后, 认为代表性的作物和种子的种类及范围都有不同。他们总结认为, 新石器时代作物在保加利亚的种植面更广,

且这些遗址的杂草植物区系表明了不同的作物有不同的播种时间(如在线纹陶时期(LBK)遗址的冬天与春天)和不同的收获技术(如在线纹陶时期(LBK)遗址的穗的采摘与用镰刀收割)。Kreuz 等人认为线纹陶时期(LBK)只有五种物种种植(如二粒小麦,单粒小麦,豌豆,小扁豆和亚麻,Kreuz et al., 2005:243),然而如表 19.1 所示,作物的类型并不仅局限于这几种。我们已经证明除上述作物外,线纹陶时期(LBK)遗址上还存在过其他作物(尽管出现的频率要小得多),但是物种多样性仍有下降。

我们认为线纹陶时期(LBK)物种多样性的降低是受到下面几个自适应过程影响:(1)欧洲东南部和中部气候的差异使得一些豆类作物生存能力的降低;(2)前线纹陶时期(pre-LBK)地中海和巴尔干南部作物多样化自适应压力的消除(见下文);(3)对于小麦颖的文化偏好有可能是因为这些无脱粒小麦在储存和运输方面的优势。比如,这些作物穗上的硬壳能保护作物不受害虫侵袭(特别是鸟类),同样也能防止细菌和昆虫的袭击(Nesbitt and Samuel, 1996; Hillman, 1981 and Hillman, 1984)。另外,有证据显示,7500 cal BP 到 7000 cal BP 的盛冰期也巩固了新石器时代小麦颖的在欧洲的地位。

不同的选择压力,包括人为的或自然的,似乎是使二粒小麦和单粒小麦成为主要农作物的原因,并且导致线纹陶时期(LBK)的物种的同质性。出现在欧洲新石器时代早期的线纹陶文化,作为一个新发展的文化综合体,迅速传播到还没有形成农业的其他地区。然而随着时间的推移,新石器时代中期和后期在物质文化和生活水平方面的多样性都有所提高。比如,Lüning(1998)指出陶瓷的风格开始是一致的,而后来分化不断增加。农业多样化同样在提高,新石器时代后期的居住点作物种植范围更广,包括无脱粒小麦和大麦(Bogaard, 2004:151)。包括水平传播重要性的增加以及更大的种群规模等在内的多种因素可能亦会影响到文化多样性的增加,但是这些问题仍需要通过进一步的实验来全面探讨。

## 参考文献

- Berger, 2007 J. D. Berger, Ecogeographic and evolutionary approaches to improving adaptation of autumn-sown chickpea (*Cicer arietinum* L.) to terminal drought: the search for reproductive chilling tolerance, *Field Crop Research* 2007(2007).
- Biagi et al., 2005 P. Biagi, S. Shennan and M. Spataro, Rapid rivers and slow seas? New data for the radiocarbon chronology of the Balkan peninsula. In: L. Nikolova, J. Fritz and J. Higgins, Editors, *Prehistoric Archaeology and Theoretical Anthropology and Education*, volume 6 ~ 7 of *Reports of Prehistoric Research Projects*, International Institute of Anthropology and Prehistory Foundation, Salt Lake City (2005), pp. 43~51.

- Blanton, 2003 D. Blanton, The weather is fine, wish you were here, because I'm the last one alive: "learning" the environment in the English New World. In: M. Rockman and J. Steele, Editors, *Colonization of Unfamiliar Landscapes: The Archaeology of Adaptation*, Routledge, London (2003), pp. 190~200.
- Blumler, 2002 M. A. Blumler, Changing paradigms, wild cereal ecology, and agricultural origins. In: R. T. J. Cappers and S. Bottema, Editors, *The Dawn of Farming in the Near East, Ex oriente*, Berlin (2002), pp. 95~111.
- Browder, 1994 J. Browder, Surviving in Rondonia: the dynamics of colonist farming strategies in Brazil's northwest frontier, *Studies in Comparative International Development* 29/3(1994), pp. 45~69.
- Bocquet-Appel, 2002 J. P. Bocquet-Appel, The palaeoanthropological traces of a Neolithic demographic transition, *Current Anthropology* 43(2002), pp. 638~650.
- Bocquet-Appel and Naji, 2006 J.-P. Bocquet-Appel and S. Naji, Testing the hypothesis of a worldwide demographic transition, *Current Anthropology* 47/2 (2006), pp. 341~365.
- Bogaard, 2004 A. Bogaard, *Neolithic Farming in Central Europe: An Archaeobotanical Study of Crop Husbandry Practices*, Routledge, London (2004).
- Bogucki, 1996 P. Bogucki, The spread of early farming in Europe, *American Scientist* 84 (1996), pp. 242~253.
- Canadian Institute for Historical Microreproductions, 1820 CIHM (Canadian Institute for Historical Microreproductions), Microfiche Series no. 61684, *The Emigrant's Guide to the British Settlements in Upper Canada and the United States of America*, London (1820).
- Colledge and Conolly, 2007 In: S. Colledge and J. Conolly, Editors, *The Origins and Spread of Domestic Plants in Southwest Asia and Europe*, Left Coast Press, California (2007).
- Colledge et al., 2004 S. Colledge, J. Conolly and S. Shennan, Archaeobotanical evidence for the spread of farming in the eastern Mediterranean, *Current Anthropology* 45(2004), pp. S35~S58.
- Colledge et al., 2005 S. Colledge, J. Conolly and S. Shennan, The evolution of Neolithic agriculture: from SW Asian origins to NW European limits, *European Journal of Archaeology* 8(2)(2005), pp. 137~156.
- Coward et al., 2008 F. Coward, S. Shennan, M. Collard, S. Colledge and J. Conolly, The spread of Neolithic plant economies from the Near East to northwest Europe: a phylogenetic analysis, *Journal of Archaeological Science* 35(2008), pp. 42~56.
- Davis et al., 2003 B. A. S. Davis, S. Brewer, A. C. Stevenson and J. Guiot, The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data, *Quaternary Science Review* 22(2003), pp. 1701~1716.
- Dobouloz and Ginouvès, 2006 Dobouloz, J., Ginouvès, R., 2006. Impacts of the Neolithic demographic transition on Linear Pottery Culture settlement. The Neolithic Demographic Transition and its Consequences. December 8th to December 10th, Harvard Center for the Environment. Privately circulated.
- Dolukhanov et al., 2005 P. Dolukhanov, A. Shukurov, D. Gronenborn, D. Sokoloff, V. Timofeev and G. Zaitseva, The chronology of Neolithic dispersal in Central and Eastern

- Europe, *Journal of Archaeological Science* 32(2005), pp. 1441~1458.
- Freeman, 1985 D. Freeman, The importance of being first: pre-emption by early adopters of farming innovations in Kenya, *Annals of the Association of American Geographers* 75/1(1985), pp. 17~28.
- Guilaine, 2003 J. Guilaine, *De la Vague à la Tombe, la Conquête Néolithique de la Méditerranée*, Seuil, Paris (2003).
- Hahn and Bentley, 2003 M. W. Hahn and R. A. Bentley, Drift as a mechanism for cultural change: an example from baby names, *Proceedings of the Royal Society of London B* (2003).
- Halstead, 1989 P. Halstead, Like rising damp? An ecological approach to the spread of farming in south east and central Europe. In: A. Milles, D. Williams and N. Gardner, Editors, *The Beginnings of Agriculture, Symposia of the Association for Environmental Archaeology No. 8, BAR International Series 496, British Archaeological Reports*, Oxford (1989), pp. 23~53.
- Halstead, 1990 P. Halstead, Waste not, want not: traditional responses to crop failure in Greece, *Rural History* 1(1990), pp. 147~164.
- Halstead, 2004 P. Halstead, Farming and feasting in the Neolithic of Greece: the ecological context of fighting with food, *Documenta Praehistorica* 31(2004), pp. 151~161.
- Harris, 1996 D. R. Harris, The origins and spread of agriculture and pastoralism in Eurasia: an overview. In: D. R. Harris, Editor, *The Origins and Spread of Agriculture and Pastoralism in Eurasia*, UCL Press, London (1996).
- Heiri et al., 2004 O. Heiri, W. Tinner and A. F. Lotter, Evidence for cooler European summers during periods of changing meltwater flux to the North Atlantic, *PNAS* 101(43) (2004), pp. 15285~15288.
- Henrich, 2002 J. Henrich, Decision-making, cultural transmission and adaptation in economic anthropology. In: J. Ensminger, Editor, *Theory in Economic Anthropology*, AltaMira Press (2002), pp. 251~295.
- Hillman, 1981 G. C. Hillman, Reconstructing crop husbandry practices from charred remains of crops. In: R. J. Mercer, Editor, *Farming Practice in British Prehistory*, Edinburgh University Press, Edinburgh (1981), pp. 123~162.
- Hillman, 1984 G. C. Hillman, Interpretation of archaeological plant remains: the application of ethnographic models from Turkey. In: W. van Zeist and W. A. Casparie, Editors, *Plants and Ancient Man, Studies in Palaeoethnobotany*. Proceedings of the Sixth Symposium of the International Work Group for Palaeoethnobotany, Groningen, 30 May~3 June 1983, A.A. Balkema, Rotterdam (1984), pp. 1~42.
- Hormes et al., 2001 A. Hormes, B. Müller and C. Schlechter, The Alps with little ice: evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps, *The Holocene* 11(3)(2001), pp. 255~265.
- Jacomet, 2007 S. Jacomet, Neolithic plant economies in the northern Alpine Foreland. In: S. Colledge and J. Conolly, Editors, *The Origins and Spread of Domestic Plants in Southwest Asia and Europe*, Left Coast Press, California (2007).

- Kofler et al., 2005 W. Kofler, V. Krapf, W. Oberhuber and S. Bortenschlager, Vegetation responses to the 8200 cal. BP cold event and to long-term climatic changes in the Eastern Alps: possible influence of solar activity and North Atlantic freshwater pulses, *The Holocene* 15(6)(2005), pp. 779~788.
- Kohler-Schnieder, 2007 M. Kohler-Schnieder, Early agriculture and subsistence in Austria: a review of Neolithic plant records. In: S. Colledge and J. Conolly, Editors, *The Origins and Spread of Domestic Plants in Southwest Asia and Europe*, UCL Institute of Archaeology and Left Coast Press, California (2007), pp. 209~220.
- Kreuz, 1990 A. Kreuz, Die ersten Bauern Mitteleuropas: Eine archobotanische Untersuchung zu Umwelt und Landwirtschaft der ältesten Bandkeramik, *Analecta Praehistorica Leidensia* 23, Leiden University Press, Leiden (1990).
- Kreuz, 2007 A. Kreuz, Archaeobotanical perspectives on the beginning of agriculture north of the Alps. In: S. Colledge and J. Conolly, Editors, *The Origins and Spread of Domestic Plants in Southwest Asia and Europe*, UCL Institute of Archaeology and Left Coast Press, California (2007), pp. 259~294.
- Kreuz et al., 2005 A. Kreuz, E. Marinova, E. Schfer and J. Wiethold, A comparison of early Neolithic crop and weed assemblages from the Linearbandkeramik and the Bulgarian Neolithic cultures: differences and similarities, *Vegetation History and Archaeobotany* 14 (2005), pp. 237~258.
- Lüning, 1998 J. Lüning, Frühe Bauern in Mitteleuropa im 6. und 5. Jahrtausend v. Chr. *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz* 35(1)(1998), pp. 27~93.
- Magny et al., 2003 M. Magny, C. Bégeot, J. Guiot, A. Marguet and Y. Billaud, Reconstruction and palaeoclimatic interpretation of mid-Holocene vegetation and lake-level changes at Saint-Jorioz, Lake Annecy, French Pre-Alps, *The Holocene* 13 (2) (2003), pp. 265~275.
- Marshall et al., 1997 G. Marshall, R. Jones and L. Wall, Tactical opportunities, risk attitude and choice of farming strategy: an application of the distribution method, *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 41(4)(1997), pp. 499~519.
- Neiman, 1995 F. Neiman, Stylistic variation in evolutionary perspective: inferences from decorative diversity and interassemblage distance in Illinois Woodland ceramic assemblages, *American Antiquity* 60(1)(1995), pp. 7~36.
- Nesbitt and Samuel, 1996 M. Nesbitt and D. Samuel, From staple crop to extinction? The archaeology and history of the hulled wheats. In: S. Padulosi, K. Hammer and J. Heller, Editors, *Hulled Wheats. Promoting the Conservation and Use of Underutilized and Neglected Crops*, IPGRI, Rome (1996), pp. 41~100.
- Petrasch, 2001 J. Petrasch, Seid fruchtbar und mehret euch und fullet die Erde und machet sie euch untertan: Überlegungen zur demographischen Situation der bandkeramischen Landnahme, *Archäologisches Korrespondenzblatt* 31(2001), pp. 13~26.
- Richards, 2003 M. Richards, The Neolithic invasion of Europe, *Annual Review of Anthropology* 32(2003), pp. 135~162.
- Richards et al., 2000 M. Richards et al., Tracing European founder lineages in the Near

- Eastern mtDNA pool, American Journal of Human Genetics 67(2000), pp. 1251~1276.
- Richerson and Boyd, 2005 P. Richerson and R. Boyd, *Not By Genes Alone: How Culture Transformed Human Evolution*, University of Chicago Press, Chicago (2005).
- Shennan and Conolly, 2007 S. Shennan and J. Conolly, The Origin and Spread of Neolithic Plant Economies in the Near East and Europe, [http://ads.ahds.ac.uk/catalogue/resources.html?neoplants\\_ahrb\\_2005](http://ads.ahds.ac.uk/catalogue/resources.html?neoplants_ahrb_2005)(2007).
- Shennan and Edinborough, 2007 S. Shennan and K. Edinborough, Prehistoric population history: from the Late Glacial to the Late Neolithic in Central and Northern Europe, *Journal of Archaeological Science* 34(2007), pp. 1339~1345.
- Shennan and Wilkinson, 2001 S. Shennan and J. R. Wilkinson, Ceramic style change and neutral evolution: a case study from Neolithic Europe, *American Antiquity* 66(4)(2001), pp. 577~593.
- Smartt, 1990 J. Smartt, *Grain Legumes: Evolution and Genetic Resources*, Cambridge University Press, Cambridge (1990).
- Spurk et al., 2002 M. Spurk, H. Leuschner, M. Baillie, K. R. Briffa and M. Friedrich, Depositional frequency of German subfossil oaks: climatically and non-climatically induced fluctuations in the Holocene, *The Holocene* 12(6)(2002), pp. 707~715.
- Whittle et al., 2002 A. Whittle, L. Bartosiewicz, D. Borić, P. Pettitt and M. Richards, In the beginning: new radiocarbon dates for the early Neolithic in northern Serbia and south-east Hungary, *Antaeus* 25(2002), pp. 63~117.
- Wilensky, 1999 U. Wilensky, NetLogo, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL (1999) <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- Zohary, 1996 D. Zohary, The mode of domestication of the founder crops of Southwest Asian agriculture. In: D. R. Harris, Editor, *The Origins and Spread of Agriculture and Pastoralism in Eurasia*, UCL Press, London (1996), pp. 142~158.
- Zohary and Hopf, 2000 D. Zohary and M. Hopf, *Domestication of Plants in the Old World: The Origin and Spread of Cultivated Plants in West Asia, Europe and the Nile Valley* (third ed.), Oxford University Press, Oxford (2000).

## 第20章

# 文化变异及其内部行为表征的影响研究 ——分布式语言的适应性主体建模<sup>①</sup>

语言并不是孤立和专用的符号处理系统,而是一个驳杂的器物集(a heterogeneous set of artifacts),隐含在文化和认知的活动中。因此,人们非常关注人和器物如何动态地影响认知和语言学。很多学者对此进行了研究,其中有学者提出了“基础的自适应主体”(grounded adaptive agent)的计算框架以研究交流和语言的涌现。这个建模框架为实现对认知主体种群的模拟提供了理论框架,其中认知主体能通过和社会及自然环境相互影响发展自身的语言能力(内部符号和外部符号定义)。该模型提供了一个关于语言的综合视角,在这个视角下,认知主体的语言能力严格地依赖其社交、运动、神经系统和认知能力。这个模型是由英国 Plymouth 大学的学者 Cangelosi 提出的,这个研究中提出的建模方法和具身认知论密切相关,该具身认知论研究的是有机体感知系统和运动系统的语言基础。对于语言演化的建模方法和计算实验的结果分析等详见下文:

### 20.1 问题的描述

语言被看作是一个典型的内部处理系统,它是专门用来将语义表达转化成一系列的文字及将这些文字组合成语句。语言研究者认为语言的社会职能是通信系统,然而他们的研究主要集中在假设的内部专业处理机制之上。这是一种

① 本章译自:Angelo Cangelosi. Adaptive agent modeling of distributed language: investigations on the effects of cultural variation and internal action representations. *Language Sciences*. 2007, 29: 633 - 649. 已取得授权,授权方:ELSEVIER。

主流的观点,更重要的,这是语言分析的规范方法。因此,生成语言学认为语言是一种孤立、自主的能力(Chomsky, 1975; Fodor, 1975; Burgess and Lund, 1997)。

最近 Cowley(2005)提出了另一种研究语言的方法,认为语言不是孤立专用的符号处理系统,而更像是一个隐含在文化和认知活动中的驳杂的器物集。虽然不排除重要的内部处理能力,但认为语言是分布式的。因此,人和器物如何影响认知和语言学的动力学机制也受到关注。

本文提出一种计算建模方法,通过结合语言的内部和外部作用来研究信号传递和语言演化。这是一个基础的自适应性主体建模的框架(Cangelosi, 2004, 2005),为实现对认知主体种群的模拟提供了理论框架,这些认知主体通过和社会及自然环境的相互影响来发展语言能力。这些模型提供了一个关于语言的综合视角,认知主体的语言能力严格地依赖其社交、运动、神经和认知能力。所有这些因素都促进了交流和语言的出现和巩固。这种建模方法和心理学上的近似理论密切相关,即语言能力的基础是有机体的感知和运动系统,包括语言处理的知觉符号系统理论(Barsalou, 1999)和基础行为理论(Glenberg and Kaschak, 2002)。

语言研究中的内部因素和外部因素的整合,揭示了语言同时基于主体本身的认知表征(内部符号定义,internal symbol grounding)和促使语言能力发展的社会及自然环境(外部符号定义,external symbol grounding)。接下来我们将详细讨论研究这两种符号定义的问题以及研究这种问题的现有方法。

### 20.1.1 内部符号定义

设计计算认知模型(computational cognitive model)的基本问题之一就是“符号定义问题”(symbol grounding problem)(Harnad, 1990; Cangelosi, 2005)。这个问题陈述了心理学上关于认知和语言的近似模型必须基于一个符号集(例如文字),其本质上是以主体对世界的认知表征为基础。例如,一个可以和人类(或其他主体)交流的关于植物和动物分类的认知模型或主体模型,必须能自主地区别植物/动物的单词和植物/动物类别的内在表征联系。这些表征可以通过实体间的相互作用获得,例如,学习那些可以从外部环境中“选择出”的类别。因此,内部符号定义的机制是基于如下所示的实体和表征链:

外部实体 $\Leftrightarrow$ 内部表征 $\Leftrightarrow$ 符号

这些双向的链接允许外部实体影响内部表征和符号,同时符号也影响我们描绘外部世界的方式(Roy, 2005)。

Harnad认为那些间接定义的内部表征在本质上是分类的。比如说,“狗”这

个类别中的不同成员共享一个共同内部表征,这个内部表征确实是关联到单词“狗”之上的。这些表征的一个重要特征就是类别感知(Harnad, 1987)。这是指一个扭曲内部类别表征感知的相似度空间的过程。当扭曲现象发生时,将转换类别的感知(图像的)表征,以确保类别内部的差异减少(类别内部的压缩)。不同类别成员图像表征之间的差异被放大,以使它们可以显示更多的不同点(类别间差异的扩大)。这种类别感知的现象在自然认知系统中是普遍存在的,研究证明,在动物(Zentall et al., 1986)和人类(Goldstone, 1994)身上都发生过。

有一些关于类别感知如何引导语言定义的模型研究。对很多人来说,混合符号连通论(symbolic-connectionist)的模型是解决符号定义问题的理想方法(Harnad, 1993; Sun, 2002)。这是因为一个连通的(神经网络)部件能够定义基础符号,成为感知的和类别的表征。输入单元接收物体的图像表征,通过使用隐含节点,把它们转化为扭曲的类别感知表征。一个符号模块,比如基于规则的系统,可以用类别感知来执行符号处理和高水平的感知任务(Miikkulainen, 1994)。和调用基于连通结构的混合系统不同,Cangelosi(2005; Cangelosi et al., 2000)聚焦于神经网络的研究上,它可以(1)在类别学习的时候获取类别感知的表征;(2)用这些来定义离散符号的意义;(3)还可以执行符号处理任务。最后,Vogt(2002)提出采用具身主体模型和认知机器人技术来解决符号定义问题(Vogt, 2002)。这些方法允许在感觉运动表征中定义语言。有一些机器人技术与连通网络混合使用,还有其他的一些机器人技术使用了不同的控制体系结构,这样的机器人/主体方法不仅可以处理内部语言定义问题,还可以解决社会学习和交互作用过程中外部语言的定义问题,如下文所描述。

## 20.1.2 外部符号定义

外部符号定义问题涉及语言和交流的社会文化基础(Cangelosi, 2006)。这就需要一个关于交流的更宽泛的解释,包括器物和文化符号,这和语言的分布式观点是一致的。在外部符号定义问题中最严重的问题是社会干预在获得共享的符号中的作用,这些共享的符号也能用于文化和交流的目的。

采用具身主体和机器人方法定义语言是解决外部符号定义问题的理想途径(Steels, 1999, 2002; Cangelosi, 2001)。这类模型聚焦于认知主体的团体或人群,这些人群通过直接的协商形成一个共享的交流符号集。由此发展起来的语言导致了人群的思考,因为语言影响了一组社会的主体。主体必须执行合作的任务,这些通常都是基于听众和说话者之间的“语言游戏”(Steels, 1999)。说话者从共同关注的主题中选择一个交流主题,通过说话交流该主题的内部表征,听众对话语的理解导致文字开始融入自身的词汇当中。语言游戏的成功或失败都

会导致主体词汇的更新,如果有必要,还会创造新的文字。有一些机器人模型还引入人类话题,它们进行谈判并致力于获取共享词汇(Steels and Kaplan, 1999; Hsiao et al., 2003)。

机器人方法给出的外部符号定义趋向于关注定义社会和文化的动力学。简言之,有把此看作是内部符号定义扩展到社会团体的趋势。同样地,也有人关注在交流中所使用的文字是如何导致共享词汇的出现的。分布式的观点要求扩充“符号”指令表,使它包括其他代码和文化活动。尽管有很多模型聚焦于器物的出现(Ugolini and Parisi, 1999),却很少有人关注如何使他们在交流中的角色更加明确。

## 20.2 分布式语言的基础的自适应主体模型

基础的自适应主体模型提供了一套关于语言的综合视角,在该视角下,主体的语言能力基于他们自身(内部的)认知能力和(外部的)社会和文化机制。有一些方法采用模拟机器人与(模拟的)自然的实体之间进行交互,还有另外一些采用多主体模拟。基础的自适应主体模型中的方法和这些建模方法是一致的。在机器人模型中,通讯由连结机器人的自然身体、它们的认知系统以及自然和社会环境的动力学特征产生。例如,有一些研究者关注于如何使机械手臂应用于基础的感觉运动处理(Marocco et al., 2003; Cangelosi and Riga, 2006),有一些研究者运用多主体模型模拟觅食的主体学习交流关于食物的问题(Cangelosi, 2001; Cangelosi and Harnad, 2000),还有一些研究者用主体来执行对象操作任务(Cangelosi and Parisi, 2004; Hazlehurst and Hutchins, 1998)。这些多主体模拟比较详细地模拟了主体及其环境,并能充分地促进对涌现意义(emergent meanings)的解释。

机器人模型和模拟模型都集中在简单通讯系统的涌现以及从类似动物的通讯向组合式语言的演变。本文将回顾多主体系统定义语言的模型。在 20.2.1 节,我们将分析其中的一个模型,展示一个基础的自适应主体的种群如何演化出一种共享的复合式语言。词汇将演化机制(如 Baldwin 效应)和文化的作用(如父子间语言学习和文化变异速率)结合在一起。在 20.2.2 节,我们将在原始句法语言的涌现模型中,描述词汇的内部结构分析和潜在的感觉运动表征,由于篇幅有限,我们只简单地描述模型和结果。第一个模拟模型的全部详细资料参见 Munroe and Cangelosi (2003);第二个参见 Cangelosi and Parisi(2004)。

讨论这些“语言”演化的计算模型有一个重要假设,就是术语“语言”在某种

意义上是指共享的符号(信号)系统。例如,在模拟“动词”和“名词”的感官运动基础时,模型提出观察者所谓的“动词”不是和词汇关联的抽象实体,而是一个有助于行为的信号,因为这涉及了如何与主体的历史记录相结合。对于一个采用动词(或识别动词)的主体,“动词”完整地表达了他做的事和感知的事物。

## 20.2.1 共享的复合式语言的演化涌现

这个模型考虑一个自治主体种群生活在一个简单的社会中,需要通过觅食来维持生存和繁殖,这些主体还被赋予发出声音(信号)、倾听和模仿其他主体发声方法的能力(本能)。这个模拟模型可以帮助我们回答以下几个问题:哪种发信号的方式会进化?主体是否会在使用共同的符号集(习俗)时达成一致?进化的信号系统有哪些属性(例如,就组合结构和语言类别而言)?系统发育机制和个体发育学习如何通过相互作用支持共享信号系统的演化?

## 20.2.2 模型和模拟设置

模型以一个蘑菇世界作隐喻,在这个世界中简单的主体在寻找食物过程中觅食和通讯(Cangelosi and Harnad, 2000)。主体通过蘑菇的视觉特征来识别食物,从而获取食物。在这个模型环境中有三种可食用的蘑菇和三种毒菌,所有的蘑菇都可以被获取和食用,所有的毒菌是不能食用的。每种可食用蘑菇的子类型蘑菇只有通过适当的处理(如清洗/切割/压碎等)才可以食用。主体的适应度是通过它在生命结束时“一生”所获取的能量总数来衡量的,这些主体每食用1单位食物就增加1单位能量,每食用1单位毒菌就损失1单位能量。

主体的行为受一个前向神经网络(多层次的感知器)控制,这个神经网络包含三个输入节点集:(1)3个节点编码食物的位置;(2)18个节点编码食物的感知属性;(3)8个语言输入节点。隐含层有5个节点。输出层包括两个节点组:(1)3个节点编码表示主体的行为(2个用来表示在环境中移动,1个用来决定清洗/切割/压碎动作);(2)8个节点编码表示语言输出。语言输出节点有两个“胜者为王”的聚类,一个聚类有2个节点,而另一个有6个。在每个聚类中,活性最高的节点设为1,其他设为0。每个聚类单位都编码表示“单词”的活性,因此,在每个时间步都会产生两个“单词”。

在模拟的第一阶段,根据主体采集蘑菇的能力演化产生有80个主体的种群,演化过程采用的是遗传算法(Holland, 1975)。其中,神经网络的权重在基因型中编码实现。每一代都选择适应度最高的20个主体,它们各繁殖产生4个后代,每个主体的基因型都会遭受随机的突变。演化的第一阶段进化持续300代,在接下来的100代中(第二阶段)主体开始通讯,继承它们父代的语言。它们

菇的信号的频数分布。在 2 节点聚类中, 主体用两个节点来分别表示有毒的和可食用的蘑菇, 这些可以被认为是原始语言的动词, 表示避免/获取动作。在 6 节点聚类中, 4 个节点用来命名三种可食用的蘑菇, 一个节点用来命名毒菌, 因而这些信号就是原始语言的名词。本文所用的“动词”和“名词”在这里不能直译为人类语言中的动词和名词, 更确切地是属于带有谓词语言结构的复合式语言。

表 20.1 个体种群使用通讯信号演化出共享的复合式语言的频数分布

	6 个结点的聚类						2 个结点的聚类	
	A	B	C	D	E	F	X	Y
可食蘑菇 1						20		20
可食蘑菇 2	17		1		2			20
可食蘑菇 3				20				20
有毒蘑菇 1			16			4	20	
有毒蘑菇 2			20				20	
有毒蘑菇 3			20				20	

注: 在每个类别中最多有 20 个选择(选择这个特定的词的父代的数量)。灰色节点(shaded cells)区别每种蘑菇或聚类的最高频数的信号。

#### 20.2.4 文化变异和语言的 Baldwinian 演化

用遗传算法模拟生物学的进化和反向学习算法模拟文化变迁和语言演化使得研究系统发育和个体发育机制在语言演化过程中的交互作用成为可能。有一些语言演化理论都明确地提到这样一个现象, 比如关于语言习得机制的 Baldwinian 演化假设(Pinker and Bloom, 1990; Briscoe, 2000)。Baldwin 效应(Baldwin, 1896; Turney et al., 1996)的存在是基于这样一个事实:一个物种的每个成员在个体发育过程中学会某种特性和行为, 这种特性或行为在进化时成为了物种基因结构的一部分。换句话说, 遗传同化保证了最初需要学习的东西最后都成为天生的。Baldwin 效应在语言习得机制中的应用假定了第一批使用语言的祖先所获得的语言学上的知识逐渐被吸收到我们的基因型中。这个可以解释人类的子孙在处理语言知识方面的天赋才能, 就像语言先天论者(Chomsky, 1975)所认为的那样。

在语言文化变异中, 我们假设演化和学习之间的交互作用导致了这种以文字(词汇)和/或语法形式的转变。当前的模型可以模拟文化变异和 Baldwinian 演化如何影响复合式语言的涌现。这个模型中的语言受到文化变异的影响, 并在世代之间不断改变和演化。文化变异和语言变形发生在老一代和新一代语言

产生,因为第 400 代的初始学习误差和第 301 代是一样的。尽管如此,学习曲线显示在最初的 5 期内,语言误差快速降低。对陡峭的学习曲线背后机制的详细分析(Munroe and Cangelosi, 2003)展示了这个模拟中不同类型的 Baldwin 效应。

### 20.2.5 共享的复合式语言的感觉运动基础

以上关于共享的信号演化的模拟实验,展示了演化过程如何结合符号定义的内外两方面来进行基于形式的分类(短语结构)或例如像说话时听觉和运动模式这样的分类。同样的建模方法可以应用在语言的其他方面,如语言和行为的交互作用(Pecher and Zwaan, 2005)。如果模拟的主体有行为模块而不仅集中在感觉上,情况会是怎样? 行为知识如何与语言类型相互影响?

### 20.2.6 模型和模拟设置

模拟继续采用觅食建模方案,这个方案在上述模拟和其他语言演化模拟中均被采用(Cangelosi, 2001)。然而,在此情况下,觅食行为被一个对象操作任务取代,机械手的使用允许模型有更丰富的基于不同物体的动作指令表。觅食行为的执行使用两种动作(推/拉)和两种物体(垂直的和水平的障碍物),模型可以按比例提高动作和物体的数量。当前的任务使得我们能基于名词(如物体的名称),动词或动作的名称的原始句法范畴来研究复合式词汇的演化。我们提供主体一个  $2 \times 2$  矩阵式词典(推、拉和物体 A、物体 B),作为初始语言上的输入,并且正如 Baldwinian 演化研究所示,并不会导致涌现。

自适应主体模型采用物体操作方案,该方案中单个主体的 2 节手臂有两个自由度(如图 20.3)。主体有能感知环境的视网膜,环境中的两个物体之一(物体 A=垂直的障碍物,物体 B=水平的障碍物),物体总是呈现在一定范围内的不同位置上。能被感知到的环境是一个 25 像素的网格( $5 \times 5$  正方形格子),最初定位在物体上的手臂,可以向肩膀方向移动物体(拉),也可以推开物体。除了视网膜输入,主体还可以获得本体关于手臂位置和用动词和名词表示的指令的感受信息。

在有机体的一生中,主体可能接到各种各样的任务。第一个任务叫做“无语言”,由纯粹的感知/类别决策组成。在此情况下,主体处理从视网膜获得的信息,帮助决定如何处理已识别的物体。默认如果没有语言上的指令,则推物体 A,拉物体 B。还有 10 个包含语言指令的任务,其中 5 个将视网膜的和语言上的信息作为输入,剩下的 5 个任务只提供语言指令并将视网膜单元数量设为 0。当本体感受输入存在于所有的 11 个任务中时,这五种语言指令见表 20.2。

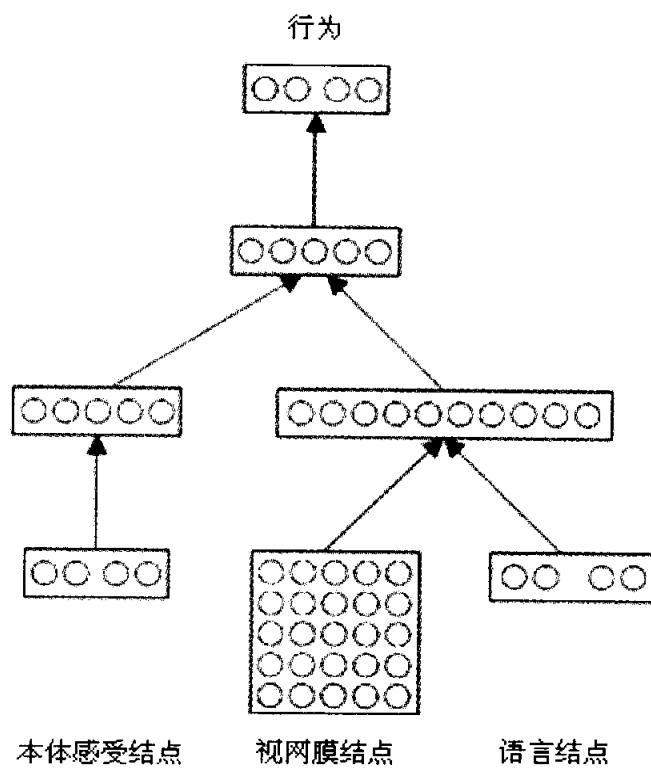


图 20.4 神经网络控制器

注:第一隐含层执行感官处理(分别处理运动和视觉及语言输入),而第二隐含层具有整合感觉运动的作用。

### 20.2.7 名词和动词演化的结果

包含 80 个主体的种群模拟了感觉运动和语言行为的演化。在模拟的第一阶段(1000 代),主体只发展了感觉运动能力,从而能识别物体和作用于物体。这使得我们能在引入语言之前先演化产生一个种群的主体,这些主体能对物体做出适当的反应。在接下来的 1000 代演化过程中,主体领会感觉运动行为和语言能力并对指令作出反应,并服从有选择性选择和演化。

遗传算法和主体的神经控制器共同影响主体基因型的进化。在模拟的开始阶段,随机初始化生成 80 个基因型,其连接权重在  $\pm 1$  的范围内。每个都包含 405 个权重,用实数来编码。在感觉运动演化的第一阶段,在无语言的情况下,一个世代包含 18 个子任务(2 个物体  $\times$  9 个位置)。每个子任务都需要持续 20 个输入/输出周期,将物体从它的初始位置移动到目标位置。在剩下的 1000 代演化过程中,每个主体执行 198 个子任务。其中包括 18 个无语言情况下的子任务和 180 个( $18 \times 10$ )有语言情况下的子任务。每个单独的主体以随机的顺序执行任务。我们用一个适应度计算公式来评估主体的适应性水平,并计算在各种情况下每个个体成功完成的子任务的数量。当物体被拉到距离主体肩部 5 个点

了当动词和名词相结合时,通过增强类别感知来影响典型的动词(比较第二隐含层中灰色和黑色列的相似高度)。事实情况是,在第一隐含层动词和名词的扭曲作用的程度是近似相等的,表示在这一阶段处理这两类词是没有差别的。在同一隐含层节点中,只有动词/名词的情形和同时有动词及名词的情形之间有显著的差别,这也显示了动词在这一处理阶段没有起到它们的特有作用。总的来说,实验数据证实了动词可以单独地增强扭曲作用的假设,其中隐含节点在集成引起主体运动响应的运动和感觉信息上起到了直接的作用。

这些结果和采用人工脑成像方法(synthetic brain imaging methodology)的主体内部表征的其他研究相一致(Cangelosi and Parisi, 2004; Cangelosi, 2004)。本文的分析证明了当主体处理动词时,网络中感觉运动节点的集成区域更加活跃;相反,当处理名词时感官节点更加活跃。

## 20.3 结论与分析

本章针对语言学习提出了一种基于自适应主体建模的计算方法,这种方法主要关注语言获取和演化过程中内外部因素的整合。两个核心的假设是语言直接基于主体本身的认知表征(内部符号定义)和促使语言能力发展的社会及自然环境(外部符号定义)。

在语法涌现的模型(第2节)中,我们论证了社会和文化因素在共享词汇演化过程中的重要性。虽然环境中的自然实体提供了一个相对稳定的实体集,并且能够在这个基础之上建立词汇,然后社会因素,尤其是语言学习中的文化变异使得主体能构造不同的语言表征。这在语言学习的早期阶段,也就是当主体生来就有不同的语言能力时,尤为重要。文化变异被引入后,主体被暴露在这个环境中,并具有了快速获得特定词汇的诱因。相反,如果没有引入文化变异,主体生来就会具有他们父代使用的词汇知识。

在模型中假设了一个“双重数字性(double digitality)”,因为从一开始,主体就可以识别截然不同的信号和种类。在研究复合式词汇的过程中(也就是处理具有不同功能的信号),主体使用机械手来推、拉垂直的障碍物,这表示语言的和自然的基础信息之间存在相互作用。分类的方法说明(a)信号影响处理,即集成实时行为和认知动力学;(b)然而,非算子只能影响感觉处理水平的因素,动词能加强感觉运动整合功能,因此人们之间的差异可能有一个功能基础;(c)类别依赖于处理的阶段或时间域。

在行为处理任务的动词和名词演化模型中,关键在于感觉运动的语言定义

和神经系统的表征。类别感知分析显示了行为的名称(动词)能单独地增强扭曲作用,其中隐含节点在通过集成运动和感觉信息来准备运动反应的过程中起到了直接的作用。

通过本文模拟研究提出的关于语言的观点,是分布式语言系统强烈依赖具体化的因素、内部表征属性和社会因素的结合。具体化的因素就是指自然的和感性的属性,包括自然中的实体和主体自身提供的感觉运动媒介。主体的感知系统和运动执行器影响外部对象的交互类型和需要描述的词汇类型。例如,在表 20.1 所示的词汇中,主体不会为三种毒菌构造不同的词汇项,因为它们的感觉运动装置认为三种毒菌是一样的(应该以相同的方式避免所有的毒蘑菇)。内部表征因子的作用在于内部属性和神经系统的表征,这些表征与生物本身具体的约束非常匹配。基于负责处理神经基础的功能角色不同,动词和名词具有不同的表征(感觉处理和感觉运动整合)。最后,社会因素,如文化变异,也会影响主体在不同的演化和发展阶段所拥有的语言类型。

本文提出的自适应主体建模方法对于分布式语言结构的进一步研究来说具有很大的潜力。例如,进一步的研究可以着眼于器物在语言获得和演化中的作用。在与器物演化相关的自适应主体模型中(Ugolini and Parisi, 1999),主体能通过改进外部环境和增加复制的机会来创造器物。器物可以在文化意义上被传承,因为每代主体都会复制上一代的器物。假如器物的复制可以选择,而且每一代都加入新的变种,器物就会进化。这个模型可以和研究语言涌现的觅食模型结合,研究器物如何促进语言的演化。同样也可以拓展到文字的演化。

本文提出的建模方法对语言的分布式观点有很大的启示,关于这个问题的其他研究也论述过。首先,这和 Love, Carr 和 Kravchenko 抨击的语言不是感觉的编码的观点是一致的。话语是自然的结果,是基于交互作用的历史记录,而不是依赖于抽象的语言节点的指示。在上述的模拟中,语言类别借鉴种群中主体在社会和自然环境中交互作用的历史。对自然社会符号定义的研究提出,说话的行为与 Menary 的“认知集成”的动作相关。正如本文的多个参与者认为的,与环境的联系是语言的基础。在外部或社会领域中,主体获得价值(Hodges)或发展稳定的信号(Ross),依靠交互作用扭曲相似度空间,给出不同的内在表征。模拟还符合 Linell 的观点,对话式信号(如使用语言上的器物)构成一阶语言,它是通过持续的社会实践和现成的对话式大脑的表征来维持的。这与内外部符号定义的观点相一致,根据此观点,语言是由内部和外部共同定义的。最后,模型符合 Kravchenko(本文)的观点,复杂行为的关键在于主体的自组织行为,同时也依赖于主体对相互独立的特征和习俗的使用。

## 参考文献

- Andrews, J., Livingston, K., Harnad, S., 1998. Categorical perception effects induced by category learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 24,732~753.
- Baldwin, J. M., 1896. A new factor in evolution. *The American Naturalist* 30,441~451.
- Barsalou, L., 1999. Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences* 22,577~609.
- Briscoe, E. J., 2000. Grammatical acquisition: Inductive bias and coevolution of language and the language acquisition device. *Language* 76,245~296.
- Burgess, C., Lund, K., 1997. Modeling parsing constraints with high-dimensional context space. *Language and Cognitive Processes* 12,177~210.
- Cangelosi, A., 2001. Evolution of communication and language using signals, symbols and words. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 5(2),93~101.
- Cangelosi, A., 2004. The sensorimotor bases of linguistic structure: experiments with grounded adaptive agents. In: Schaal, S., Ijspeert, A.J., Billard, A., Vijayakumar, S., Hallam, J., Meyer, J.-A. (Eds.). *Proceedings of the Eighth International Conference on the Simulation of Adaptive Behaviour: From Animals to Animals*, vol. 8. MIT Press, Cambridge MA, pp.487~496.
- Cangelosi, A., 2005. Grounding symbols in perceptual and sensorimotor categories: connectionist and embodied approaches. In: Cohen, H., Lefebvre, C. (Eds.), *Handbook of Categorization in Cognitive Science*. Elsevier, Oxford.
- Cangelosi, A., 2006. The grounding and sharing of symbols. *Pragmatics and Cognition* 14 (2),275~285.
- Cangelosi, A., Greco, A., Harnad, S., 2000. From robotic toil to symbolic theft: grounding transfer from entrylevel to higher-level categories. *Connection Science* 12(2), 143~162.
- Cangelosi, A., Harnad, S., 2000. The adaptive advantage of symbolic theft over sensorimotor toil: grounding language in perceptual categories. *Evolution of Communication* 4(1),117~142.
- Cangelosi, A., Parisi, D., 2001. How nouns and verbs differentially affect the behavior of artificial organisms. In: Moore, J. D., Stenning, K. (Eds.), *Proceedings of the 23rd Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Lawrence Erlbaum, London, pp.170~175.
- Cangelosi, A., Parisi, D., 2004. The processing of verbs and nouns in neural networks: insights from synthetic brain imaging. *Brain and Language* 89(2),401~408.
- Cangelosi, A., Riga, T., 2006. An embodied model for sensorimotor grounding and grounding transfer: experiments with epigenetic robots. *Cognitive Science* 30 (4), 673~689.
- Chomsky, N., 1975. *Reflections on Language*. Pantheon Press, New York.
- Cowley, S. J., 2005. A distributed view of language origins. In: *Proceedings of Second International Symposium on the Emergence and Evolution of Linguistic Communication*

- (EELC'05). AISB Press, London.
- Glenberg, A., Kaschak, M., 2002. Grounding language in action. *Psychonomic Bulletin and Review* 9(3), 558~565.
- Goldstone, R., 1994. Influences of categorization of perceptual discrimination. *Journal of Experimental Psychology: General* 123, 178~200.
- Harnad, S., 1990. The symbol grounding problem. *Physica D* 42, 335~346.
- Harnad, S. (Ed.), 1987. *Categorical Perception: The Groundwork of Cognition*. Cambridge University Press, New York.
- Harnad, S., 1993. Grounding symbols in the analog world with neural nets. *Think* 2(1), 12~78.
- Hsiao, K., Mavridis, N., and Roy, D., 2003. Coupling perception and simulation: steps towards conversational robotics. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, 2003.
- Hazlehurst, B., Hutchins, E., 1998. The emergence of propositions from the co-ordination of talk and action in a shared world. *Language and Cognitive Processes* 13, 373~424.
- Holland, J. H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial System*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- Fodor, J. A., 1975. *The Language of Thought*. Harvard University Press, Cambridge MA.
- Marocco, D., Cangelosi, A., Nolfi, S., 2003. The emergence of communication in evolutionary robots. *Philosophical Transactions of the Royal Society London A* 361, 2397~2421.
- Miikkulainen, R., 1994. Integrated connectionist models: building Ai systems on subsymbolic foundations. In: Honavar, V., Uhr, L. (Eds.), *Symbol Processors and Connectionist Network Models in Artificial Intelligence and Cognitive Modelling: Steps Toward Principled Integration*. Academic Press, pp. 483~508.
- Munroe, S., Cangelosi, A., 2003. Learning and the evolution of language: the role of cultural variation and learning cost in the Baldwin Effect. *Artificial Life* 8, 311~339.
- Pecher, D., Zwaan, R. A. (Eds.), 2005. *Grounding Cognition: The Role of Perception and Action in Memory, Language, and Thinking*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Pinker, S., Bloom, P., 1990. Natural language and natural selection. *Behavioral and Brain Science* 13, 707~784.
- Roy, D., 2005. Semiotic schemas: a framework for grounding language in action and perception. *Artificial Intelligence* 167, 170~205.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G., Williams, R., 1986. Learning internal representations through error propagation. In: Rumelhart, D. E., McClelland, J. L., The PDP Research Group (Eds.). *Parallel Distributed Processing: Experiments in the Microstructure of Cognition*, vol. 1. MIT Press, Cambridge MA. 648, 633~649.
- Steels, L., Kaplan, F., 1999. Collective learning and semiotic dynamics. In: Floreano, D., Nicoud, J., Mondada, F. (Eds.), *Proceedings of ECAL99 European Conference on Artificial Life*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 679~688.

- Steels, L., 2002. Grounding symbols through evolutionary language games. In: Cangelosi, A., Parisi, D. (Eds.), *Simulating the Evolution of Language*. Springer-Verlag, London.
- Steels, L., 1999. In: *The Talking Heads Experiment*, vol. 1. Words and Meanings, Antwerpen.
- Sun, R., 2002. Connectionist implementationalism and hybrid systems. *Encyclopedia of Cognitive Science*. Nature Publishing Group, MacMillan.
- Tijsseling, A., Harnad, S., 1997. Warping similarity space in category learning by backprop nets. In: Ramscar, M., Cambouropoulos, E., Pain, H. (Eds.), *Proceedings of SimCat 1997: Interdisciplinary Workshop on Similarity and Categorization*. Edinburgh University, pp. 263~269.
- Turney, P., Whitley, D., Anderson, R. W., 1996. Evolution, learning, and instinct: 100 years of the Baldwin effect. *Evolutionary Computation*, 4(3) pages (Special issue on the Baldwin effect).
- Ugolini, M., Parisi, D., 1999. Simulating the evolution of artifacts. In: Floreano, D., Nicoud, J. D., Mondada, F. (Eds.), *Advances in Artificial Life. ECAL99*. Springer, New York.
- Vogt, P., 2002. The physical symbol grounding problem. *Cognitive Systems Research* 3(3), 429~457.
- Zentall, T. R., Jackson-Smith, P., Jagielo, J. A., Nallan, G. B., 1986. Categorical shape and color coding by pigeons. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes* 12(2), 153~159.

## 第21章

# 改变人群环保态度的策略研究 ——基于主体的环保运动模拟设计<sup>①</sup>

德国研究者 Martens 和瑞士研究者 Mosler 在 2008 年合作发表了一篇研究人群对待环保的态度的论文。在这篇文章中,他们使用了基于主体的计算机建模来创建人工社会,人工社会中的个体是根据 Petty 和 Cacioppo 的精细加工可能性模型(Petty and Cacioppo, 1986)中的规则设计的。系统地改变人工社会中的环保运动策略和社会特征,可以让人们了解和测试这些策略和特征对人们保护环境的态度的影响。结果显示,对绿色人群(有环保意识的人群)进行多次强有力地论证分析最有效,而对非绿色人群使用少量的边缘提醒则具有最显著的效果。总的来说,深入的信息审查能增强论证的效果,但是只在说服绿色人群时特别有效。而使人与人直接交流的环境保护运动比只使用大众媒体的运动更有优势,因为通过人与人直接交流的环境保护运动能根据信息接收者的特征做出调整从而达到最佳效果。下面为这篇论文的详细内容。

## 21.1 介绍

联合国环境组织(UNEP, 2000)创刊的全球环境展望(GEO)中说到,现代工业经济造成了全球范围内的环境破坏,包括大范围的污染和生态系统的破坏。除了采取政治和经济措施外,GEO 的报告还提议将环境因素整合到主流方法中

① 本章译自: Hans-Joachim Moslera, Thomas Martens. Designing environmental campaigns by using agent-based simulations; Strategies for changing environmental attitudes. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88: 805 - 816. 已取得授权, 授权方: ELSEVIER.

去,并增加公众在环境保护行动中的参与性。因此相关的研究工作应该通过优化这些环保运动,为解决这些全球性课题出一份力。

每一种运动的最终目标都在于劝导个人改变他的行为。因此需要一种类似Evans和Kelley(2004)以及Ligenberg(2004)所采用的主体方法来理解这些运动的机制(Berry et al., 1994; Boyce and Geller, 2000)。优化环保运动非常困难——每场运动都必须根据当地特点专门定制,而且几乎不可能从某个具体的例子中得到普适的优化步骤。因此我们必须找到一种方法,它可以在相同的条件下比较具有不同系统性能的运动的效果,然后进行测试从而确定在各种条件下哪种运动效果最佳。计算机模拟提供了一种这样的实现方法。每次实验的初始条件完全相同,通过在计算机上模拟实施不同的策略,得到不同的结果。环保运动应当在社会层面上取得显著的效果,但是社会中的个人成员最终必然受到影响。基于主体的模拟中,个体社会成员被模拟成单独的个体(模拟人),因此基于主体的模拟能够提供一种较恰当的方法来理解运动效果并将效果联系到微观层面机制。

微观个体单位,或者称为主体,是根据心理特征设置的,这些心理特征使个体具有自主性,并具有行动和反应的能力(Gilbert and Troitzsch, 1999; Schmid, 2001)。这个方法能特别有效地模拟人与人之间的交流过程,因为主体可以相互地影响对方,这种相互影响是决定运动效果的关键因素(Mosler and Brucks, 2001)。在构建这样一种基于主体的模拟过程中,我们必须定义这样两个模型:一个模型可以根据个体对待环保的行为反映它内部心理的变化过程,另一个模型可以表示一个社会系统内部的运动效果。然后这些模型就可以被转化成计算机代码运行。模型中的心理学部分将运用精细加工可能性模型阐述(Petty and Cacioppo, 1986),而运动效果将运用创新扩散理论描述(Rogers, 1995)。精细加工可能性模型是基于假设而形成的,它描述了态度变化的两种过程。因为它是一个清晰具体的理论模型,所以之前就已用于模拟(Mosler et al., 2001)。

关于精细加工可能性模型的实证研究证据较为充分(Petty and Cacioppo, 1986; Petty and Wegener, 1999),并且它们已被用于验证模拟的有效性(Mosler et al., 2001)。简单地说,精细加工可能性模型认为人们信息处理的深入程度不同,处理信息的“深度”是动机和能力的函数。和个人有极大关联的信息增加了信息处理的动机。当深入完整的信息处理发生后,劝导性交流的效果主要取决于提出的论证的质量。相反,在浅层的信息处理情况下,像地位,可信度,以及交流者的魅力等边缘暗示则更为重要。而持有极端态度和价值观的个人倾向于用一种带有偏见的方式处理信息;当一个人自己的立场和劝导者宣扬的态度相差甚远,则会发生“反弹”(boomerange)效应,也就是说人们将朝向与

劝导性论点相反的方向改变自己的态度。如果劝导者宣扬的立场和信息接收者自己的想法非常接近,后者的态度则会趋近于劝导者所宣扬的态度。

有些证据证明精细加工可能性模型的因素对运动效果非常重要。Verplanken(1991)发现,关于大规模使用煤矿来发电的风险的论证能够更有效地改变那些具有深层的信息审查特性的人们的态度,并形成了一种更持续和更强有力的态度——意图的一致性。诸如能源相关信息的信息可信度(Dennis et al., 1990)或者是由总统关于解决能源的呼吁和提倡(Luyben, 1980, 1982)则证明了显著边缘暗示的有效性。

Rogers(1995)建立了创新扩散理论,它为我们理解社会系统中环保运动效果提供了一个观点。他将扩散描述为“一种过程,在这个过程中创新在某段时间通过某种渠道在一个社会系统的成员中交流”(Rogers, 1995, p. 5)。对于环保运动,这些创新可以定义为环保知识、环保态度和环保行为,它们被当作变化过程中的对象。交流在创新——决策过程中至关重要,该过程以知识阶段、劝导阶段、决策阶段、实施阶段和确认阶段为特征(Rogers, 1995, Chapter 5)。在劝导过程中的交流可以完全由精细加工可能性模型解释,因为精细加工可能性模型描述了关于创新的态度在特定条件下的变化机制。大众媒体和人与人之间的交流是最重要的交流渠道。而且,Rogers(1995, p. 195)认为人与人之间的交流渠道在劝导阶段尤为重要,特别是主体与他们的“客户导向”(Rogers, 1995, p. 339)。

一个社会系统可以以它的网络结构为特征。扩散过程中一个重要的因素就是网络密集度,它是指个体之间联系的次数(Rogers, 1995, Chapter 8)。

在这篇文章中,我们将研究劝导类型,交流渠道类型和网络密集度之间的关系。

Rogers 的理论和环保运动之间的相关性已经由不同的研究所论证。Weening 和 Midden(1991)和 Weening 等(1990)考察了少量和大量社会联系的不同效果。Weening 等(1990)调查了 8 家邻居间信息项目的效果,总结出交流纽带的数量对成功宣布运动非常重要。Weening 和 Midden(1991)对 2 家网络联结的数量不同的邻居实施了相同的劝导。总之,他们发现信息扩散过程和社会中交流联结总数有关,但是最终的决定与有力的联结数量有关。

一些研究考察了大众媒体运动和人与人之间交流的效果。Staats 等(1996)评估了以电视、报纸和宣传板为基础的大众媒体运动,发现它很难改变人们的认知和行为。Syme 等(1987)评估了旨在提升石油保护的电视运动的效果,发现并没有形成稳定的态度和行为的改变。Winett 等(1985)用特地制作的电视节目证明了他们的行为模型的有效性。作为人与人交流的例子,接受指示去劝导邻里居民回收垃圾的街区领导比非人际的信息有效得多(Burn, 1991; Hopper

and Nielsen, 1991)。Chu 和 Chiu(2003)发现人际网络对家庭垃圾回收的影响比大众媒体要大得多。

我们方法的核心思想是准确地融合精细加工可能性模型理论和创新扩散理论，并使用基于主体的模拟用以分析相关的过程。精细加工可能性模型理论是作为在个人层面上对内部改变过程进行模拟的理论基础得到使用的。扩散过程的三个特征，即创新(改变(iii))、社会系统(改变(iv))和交流渠道(改变(v))，这三个特征用于系统性地改变社会特征。时间，作为扩散过程的另一个特征，是模拟的内在属性，由运行时间表示。个人层面的过程和社会特征都被加入到基于主体的模拟模型中，用以分析扩散的过程。当前研究关注于由环保运动引发的个人态度的改变过程。

我们将分析在一个拥有 10000 个模拟个体的社会中人们对环境保护的态度变化，这个模型有 5 个系统控制变量：(i) 劝导的方法，即论证或边缘暗示；(ii) 改变可感知的信息相关度之后的信息处理深度；(iii) 此社会人群的平均态度，支持环保的(绿色)或反对环保的(非绿色)；(iv) 此人群中的社会接触程度；(v) 交流的渠道，是大众媒体或是人与人直接的交流。然后我们可以通过设置不同的条件，对相关模型追踪一段时间进行比较。

## 21.2 方 法

模拟过程用以下三个部分描述：人口的结构、主体模型和模拟实验的执行。这里的研究使用的模拟类型是基于主体的模拟方法（比如 Gilbert and Troitzsch, 1999）。为了区分真实的个体和模拟的个体，我们称后者为“主体”。但是这篇文章中也会用术语“个体”来代表模拟的个体，以避免和一些环保运动类型中用到的“变化主体”相混淆。

### 1. 人口的构造

10000 个主体使用相同的功能模型模拟，但是它们的初始值不同。所以可以通过它们的值，它们的个人责任感，它们对环保的了解和尊重以及劝服别人的能力来区分这些个体。但是，个体都根据精细加工可能性模型中相同的规则运行。依照正态分布给所有个体变量赋予不同的值，从而形成人群，其中正态分布的人群平均值和标准方差是固定的。因此属性的差异性在人群中得到了精确的定义。

所有的主体和不同数量的其他主体相联结，形成人群的社会网络。在模拟的一开始会产生一些随机分布的主体——每个主体会影响其他主体，同时也受其他主体影响。

主体受到一个交流源的影响。这个交流源以态度、论证质量、边缘提醒为特征。

箱子3：阐述可能性取决于阐述动机，阐述能力和交流源中的边缘提醒。阐述可能性的初始值等于阐述动机和阐述能力的乘积。阐述可能性会进一步受交流源中边缘提醒的影响。一个极正面的边缘提醒对阐述可能性有增强的效果，而极负面的边缘提醒则降低阐述可能性。此影响在阐述可能性取适中值的时候取得最大值，在阐述可能性取更大或是更小值的时候会不断减小。

$$\begin{aligned} \text{阐述可能性} = & (\text{阐述动机} \times \text{阐述能力})^{1/2} + [(\text{边缘提醒} - 5)/2] \\ & \times [1 - |(\text{阐述动机} \times \text{阐述能力})^{1/2} - 5|/5] \end{aligned}$$

箱子1：阐述动机由个人相关性决定。个人相关性增加时，主体处理信息的动机随之增加：

$$\text{阐述动机} = \text{个人相关性}$$

箱子2：阐述能力（关于态度一致性）由知识和干扰决定。“知识”，即一个人客观知识的水平，是提升阐述能力的变量。干扰则以更大的程度降低知识提升能力的效果。在这里的模拟中，我们忽略干扰的变化；干扰的值设为常量1：

$$\text{阐述能力} = \text{知识} * \{1 - (\text{干扰}/10)\}$$

箱子4：偏见处理由主体的态度和价值取向而触发：

$$\text{偏见状态} = (\text{态度} + \text{价值取向})/2$$

箱子5：中心要素由客观处理和偏见处理组成。强有力的论证使态度向我们希望的方向改变，而没有说服力的论证产生相反的效果。在偏见处理中，偏见元素覆盖了客观的处理。当主体的偏见立场和由交流源所宣扬的态度都是赞成或都是不赞成时，中心要素根据偏见元素而增长，而且和交流源的论证质量一致。当个体和交流源的立场相反，则偏见元素会使中间元素的值减少。如果主体的态度比较适中，那么偏见的力量最小，但是它从中点开始无论向上还是向下都不断地增长。因此，偏见立场越极端，交流源对个体立场的反对论证就越有力，并以此达到一致的信息：

$$\begin{aligned} \text{中间元素} = & [(源的论证质量} - 5)/2, 5] + \{[(5 - \text{源的论证质量})/5 \pm 2] \\ & \times (|\text{偏差位置} - 5|/5)2\} \\ \rightarrow (\pm 2): & \text{如果偏见位置} \geq 5 \text{ 且源的态度} \geq 5 \rightarrow (+2) \\ & \text{如果偏见位置} \leq 5 \text{ 且源的态度} \leq 5 \rightarrow (-2) \\ & \text{如果偏见位置} > 5 \text{ 且源的态度} < 5 \rightarrow (-2) \end{aligned}$$

如果偏见位置<5 且源的态度>5→(-2)

箱子 6: 如果交流源的边缘提醒是正面性的, 那边缘处理的结果会使主体的态度朝交流源的态度改变。如果交流源的边缘提醒是负面性的, 浅层的处理结果会使个体态度偏离交流源的态度。若交流源的边缘提醒为正面性的, 那么边缘元素取得一个正值, 而负面性的边缘提醒导致边缘元素取负值。

$$\text{边缘元素} = \text{边缘提醒} / 1.65$$

箱子 7: 处理密度(阐述可能性)决定了是中心处理还是边缘处理改变了个体的态度。如果处理密度很高, 那么中心处理最有效, 而如果处理密度很低, 那么边缘处理占主导地位。一个主体受劝导后的态度来自于先前态度和劝导造成的态度改变的总和(态度<sub>t-1</sub>; t-1=劝导之前)。对态度变化而言, 先要计算个体态度和交流源的态度差。态度差表示了态度改变的范围和方向。态度最终的变化是由融合了中间和边缘要素计算得来:

$$\begin{aligned} \text{态度} &= \text{态度}_{t-1} + [(\text{源的态度} - \text{态度}_{t-1})/3] \times [(\text{阐述可能性}/10) \times \text{中间元素}] \\ &\quad + [(1 - \text{阐述可能性}/10) \times \text{边缘元素}] \end{aligned}$$

箱子 8: 主体的论证质量随着处理交流源的论证而改变。这个方块引入了交流的接收者通过处理交流源的论证导致自己论证质量的变化。中心部分和边缘部分根据阐述可能性比例被加入到先前的论证质量中去。只有当交流源的论证质量高于个体的论证质量时, 中心部分才会增加个体的论证质量。通过边缘部分, 个体的论证质量不仅能加强, 而且——当交流源的论证质量很低的时候——个体的论证质量甚至会降低:

$$\begin{aligned} \text{论证质量} &= \text{论证质量}_{t-1} + [(\text{阐述可能性}/10) \times \text{中间部分}] \\ &\quad + [(1 - \text{阐述可能性}/10) \times \text{边缘部分}] \end{aligned}$$

$$\text{中间部分} = (\text{源的论证质量} - \text{论证质量}_{t-1})/10$$

$$\text{如果源的论证质量} - \text{论证质量}_{t-1} < 0$$

$$\text{那么源的论证质量} - \text{论证质量}_{t-1} = 0$$

$$\text{边缘部分} = (\text{源的论证质量} - \text{论证质量}_{t-1})/10.$$

箱子 9: 主体的论证计划会加入到关于态度一致性的知识库中。模型假设在论证质量和个体的知识之间存在关联。这个假设代表了精细加工可能性模型的延伸内容, 即之前的知识是作为一种本能的认知性论证来反对劝导性信息的, 这是基于 Petty 和 Cacioppo(1986, pp. 166~169)的陈述得来的。这意味着个体根据自己拥有的知识建立自己的论点, 这使我们得到这样的结论: 个体的论证是整合在它的知识体系中的(在 Petty et al., 1994, 得到了类似的发现)。

$$\text{知识} = \text{知识}_{t-1} + (\text{论证质量} - \text{知识}_{t-1})$$

所有模拟主体都毫无例外地根据精细加工可能性模型中的规则处理交流源的信息。但是因为主体拥有不同的初始值,所以它们对相同的影响反应不同。其他处理机制(Mosler, 2000)不包含在主体模型中。

### 3. 模拟实验

所有变量从0取到100。对于和环保取向相关的变量,100代表对环保最友好,0代表对环保最不友好,50代表对环保“不关心”。

### 4. 交流源特征的变化

交流源要么是高质量的论证,要么是低质量的论证,要么是非常正面的边缘提醒,要么是负面的边缘提醒。相应的信息根据主体的变量值进行处理。

### 5. 处理密度(阐述可能性)的变化

在某一种条件下,环保问题跟人群的认知相关性增强,比如,在发生油轮或反应堆事故后。在这种情况下,处理密度会因此增加一定的数量(+30)。

### 6. 人群平均态度的变化

我们会生成绿色和非绿色人群。绿色人群以平均态度值70开始模拟实验,非绿色人群以平均态度值30开始模拟实验,双方的标准差都为20。

### 7. 人群社会接触的变化

我们进行了网络结构的敏感性分析,以1—10次作接触为少量接触情况,10—30次接触为大量接触情况。接触数量不同会产生不同的效果。在这篇论文中,我们采用一组5个主体作为少量接触的情况。一个主体受其他5个个体的影响,同时影响这5个个体。在相反的大量接触的情况下,20个个体互相联结。

### 8. 交流渠道的变化

大众媒体的效果将和人与人直接交流的效果相比较。各种各样的大众媒体运动影响整个人群或至少人群中的绝大多数。使人与人交流的运动运用“变化个体”运作(Rogers, 1995)。这些变化个体嵌入到他们的社会网络中,影响他们接触的人,根据接收者的态度等级、处理密度或者对边缘提醒或是强有力论证的偏见水平做出反应。对于存在这些“变化个体”的实验,我们构造了持有中等水平态度的人群( $M=50$ ,  $SD=40$ )。为了精确地比较变化个体和大众媒体,两种形式的运动都设定为影响70%的人口。

为了保证不同的模拟实验具有可比性,所有模拟实验遵循确定的规则。每个主体都会被指定不同的变量值和接触的人。人群尽管不同质,但其社会网络已经被准确地定义好了。其中不包括任何随机的变量。因此相同的初始条件会产生完全一样的结果。这意味着模拟结果不受随机作用的影响,也不需要作任

何的统计分析。这个确定的方法的优点是不同模拟实验的所有不同点可以被随意地解释。结果的差别必然是操作(实验变化)造成的,而不受任何噪音的影响。从无数可能的模拟集中,我们选择两组模拟实验。在第一组实验中,我们会操纵平均态度、社会接触、论证的类型和处理人口密度。在第二组实验中,我们会测试变化个体的总体效应,并会比较变化个体运动和大众媒体运动。

## 21.3 实验结果

下面的图表示了人口对环保问题的平均态度。上升的曲线代表平均态度变得越来越支持环保,横坐标代表不同的模拟步长,每个步长都有完整的计算周期。在每个步长里,所有的个体影响他们接触的人,同时被他们相接触的人影响。步骤的不断延伸代表时间的流逝。为了避免有人批评说可能的结果已经由程序计算提前确定,所有的实验会包含三个层面,即基准线、实施(运动)和撤出,实验还包括一个控制人群,它们不受运动实施的影响。所有模拟人群在实验一开始的时候都是一样的。运动从第 6 步开始实施,第 10 步结束。所有从第 11 步到第 15 步的,和基准线不同的延续效果是由于运动的长期效应导致的。

我们进行了敏感性分析,该分析通过系统地改变人口参数的初始值,包括态度、相关性、接触的次数和运动的属性(如力度和边缘提醒)来实施。模型没有显示行为会突然改变,实验结果只是逐渐的改变。最显著的结果表现在下列图表中。

### 1. 不同的大众媒体运动影响绿色人群

首先给出的是不同类型运动对绿色人群(支持环保)的作用(见图 14.2 和图 14.3)。尽管少量接触和大量接触情况下的基准线特征不同,但两者在 1—3 个运行周期中都达到了基准线 60 的水平。这个效应可以由两种人口的分布特征解释。单独个人的态度无法超过 100。因此在这样的人群中,接近于 0 的反对环境保护的态度无法由极端的保护环境的值抵消。对于模拟中一开始人群平均态度是反对环保的情况,我们发现了基于相同机制的相反效应。这个效应在大量接触的情况下出现的快得多;在一个运行周期中相互的作用立即导致平均态度接近于 60。(见图 14.2)

最有效的运动策略是在高相关性的条件下使用强有力的论证(见图 14.2 和图 14.3)。它导致态度在少量接触的情况下达到最高水平(77.1),比在大量接触情况下达到最高水平(72.5)要高。

这些结论让我们对不同系统特征的相互作用和复杂动态变化有了初步的了解。社会的态度水平、社会接触的数量和运动的类型以特定的方式相互作用。模拟结果必须认真地解释并用实证研究证明,但是它可以作为详细的假设条件。

此模拟扩展了已存在的实证和理论基础。论证有效性、边缘提醒、交流网络的密度和盛行的社会情况以一种特定的方式相互作用。个人层面和社会水平的信息处理导致了这些相互作用——因此增加了模型说明中没有的新层面。作为基于主体的模拟实验得到的结果,这些相互作用并没有用实证研究证实,但是它们帮助我们进一步了解精确定义的假设。

## 2. 向实践的转化

为了把计算机模拟的结果应用到实际运动中,我们认真地收集了一些相关信息(Mosler, 2000)。首先,目标人群的特征应该是可获取的。它包括对运动目的的平均态度,社会中的社会关系,人群和运动内容的相关性以及偏见的程度。这些数据可以由实证社会研究的通常方法得到或者可以从已存在的数据库中获取。至少我们可以从社会特征中得到一些暗示。比如,卫星城镇居民间的相互接触少于农村地区已建立的城镇的居民。这种已经形成的研究(Palmer, 1981)是设计运动的出发点(Mosler, 2000),之后也需要用它来评价效果机制(Rossi and Freeman, 1993)。下一步必须在模拟结果的基础上确定交流的定义。我们必须选择细化的策略(Slater and Flora, 1991),而且必须对特定的对象定制有效的运动信息,特别要考虑精细加工可能性模型中详细说明的边缘提醒和论证的作用(Petty and Cacioppo, 1986)。并且我们应提前仔细地测试这两种信息特征。强论证的机制在精细加工可能性模型框架中没有清楚的定义(Eagly and Chaiken, 1993)。因此应该输入更多的理论以确定论证的力度(Martens and Rost, 1998; Renner and Schwarzer, 2003)。

我们必须从众多的因素中选择合适的因素作为边缘提醒(Petty and Cacioppo, 1986)。并且我们必须提前测试边缘提醒的有效性,一般可以通过提问这样的问题,比如“我们选的交流者是否是目标人群心目中的‘专家’”。

正如以上的设置,我们假设变化个体可以根据接收者的特征灵活地反应。这个过程和考虑个人特征的定制运动(卫生心理领域,见 De Vries and Brug, 1999)很相像。因此,灵活运动的变化个体有潜力去丰富定制的环保运动(Daamen et al., 2001)。当然,进行额外的运动有效性评价时,必须扣除为训练和教导变化个体付出的代价。

## 3. 进一步的研究

首先,我们应该在模拟中加入附有良好的定义概率函数的随机生成器,这样态度改变的过程会更实际。现实显然不是确定的,个人的行为也有一定的变化。

在多次模拟运行的基础上,我们必须做一个统计分析以得到不同假设的效果的证明。

我们所介绍的模型已经可以作为模拟环保运动的核心模型,但是它应该进一步发展来反映理论的进步。环保态度的一维概念应该扩展至包括不同的方面(Thompson and Barton, 1994; Wiseman and Bogner, 2003)。我们应该对态度和行为的差别进行更精确的建模。作为在这个努力方向上的第一步,我们对计划行为理论(Ajzen and Madden, 1986)(态度,主观标准,感知的行为控制)的所有因素进行建模(Mosler, 2000)。由 Rogers(1995)提出的社会学习理论现存模拟模型(Bandura, 1986)可能与精细加工可能性模型相关联(Mosler, 2000)。另外需要建模和关联到已有的精细加工可能性模型框架中的理论有社会影响理论(Latane, 1981),(模型见 Latane 和 Morio, 2000)或是少数较之于多数定理(Turner, 1991)(模型见 Mosler 和 Brucks 2001)。

我们还应该整合特定的交流渠道,比如社会活动的“门对门促进者”,它们去拜访家庭以此促进共同的行动,还有“门卫”,只有它们可以和特定的人群或组织接触并鼓励它们的成员加入行动。

我们还应考虑社会网络更复杂的形式,比如不同水平人群下,和社会进行互动接触的子人群(Granovetter, 1973)。

我们需要改进的地方还有很多,但是很明显我们可以借助基于主体的模拟实现所有元素的系统性改变。我们还有很多工作要做,但是这项研究工作应该扩展运动策略合理的理论和实证基础。

## 21.5 结 论

在认识到不同运动策略之前,基于主体的模拟是一个探索其有效性的很具价值的工具。人群参数既可以从专业知识中粗略地得到,也可以从代表调查中详尽地获得。模拟结果可以当成假设条件。这些信息处理的预测只能由长时间收集的时间序列数据证明。这种方法代表了一种社会监控,人们被重复地询问以求探测长时间内心理因素的变化。当然,我们需要考虑基于主体的模拟带来的优势是否能超过集中校对的代价。在为运动策略定制可靠的模拟工具之前需要做很多的测试。但是,自然和技术科学都已提供了使用基于主体的模拟的正面的例子(Matthies et al., 2001)。在现实的社会系统中测试不同的运动非常昂贵,耗费时间,并存在潜在的危险。而且,在现实世界中实施所有可能的运动变化是不可能的。在不久的将来,实证测试和模拟将有希望互相促进,形成有关

运动策略的理论、模型和实施的持续进步。

## 参考文献

- Ajzen, I., Madden, T. J., 1986. Prediction of goal-directed behavior: attitudes, intentions, and perceived behavioral control. *Journal of Experimental Social Psychology* 22, 453~474.
- Bandura, A., 1986. *Social Foundations of Thought and Action: A Social Cognitive Theory*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NY.
- Berry, T. D., Gilmore, M. R., Geller, E. S., 1994. An individual-subject approach to the study of community-based interventions. *Environment and Behavior* 26, 451~476.
- Boyce, T. E., Geller, E. S., 2000. A community-wide intervention to improve pedestrian safety: guidelines for institutionalizing large-scale behavior change. *Environment and Behavior* 32, 502~520.
- Burn, S. M., 1991. Social psychology and the stimulation of recycling behaviors: the block leader approach. *Journal of Applied Social Psychology* 21, 611~629.
- Chu, P.-Y., Chiü, J.-F., 2003. Factors influencing household waste recycling behavior: test of an integrated model. *Journal of Applied Social Psychology* 33, 604~626.
- Daamen, D. D. L., Staats, H., Wilke, H. A. M., Engelen, M., 2001. Improving environmental behavior in companies. The effectiveness of tailored versus non tailored interventions. *Environment and Behavior* 33, 229~248.
- De Vries, H., Brug, J., 1999. Computer-tailored interventions motivating people to adopt health promoting behaviours: introduction to a new approach. *Patient Education and Counseling* 36, 99~105.
- Dennis, M. L., Soderstrom, E. J., Koncinski, W. S., Cavanaugh, B., 1990. Effective dissemination of energy-related information: applying social psychology and evaluation research. *American Psychologist* 45, 1109~1117.
- Eagly, A. H., Chaiken, S., 1993. *The Psychology of Attitudes*. Harcourt Brace Jovanovich College Publishers, Orlando, FL.
- Evans, T. P., Kelley, H., 2004. Multi-scale analysis of a household level agent-based model of land cover change. *Journal of Environmental Management* 72, 57~72.
- Gilbert, N., Troitzsch, K. G., 1999. *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press, Buckingham.
- Granovetter, M., 1973. The strength of weak ties. *American Journal of Sociology* 83, 1420~1443.
- Hopper, J. R., Nielsen, J. M., 1991. Recycling as altruistic behavior: normative and behavioral strategies to expand participation in a community recycling program. *Environment and Behavior* 23, 195~220.
- Latane', B., 1981. The psychology of social impact. *American Psychologist* 86, 343~356.
- Latane', B., Morio, H., 2000. Maintaining diversity: simulating the role of nonlinearity and discreteness in dynamic social impact. In: Suleiman, R., Troitzsch, K. G., Gilbert,

- N. (Eds.), Tools and Techniques for Social Science Simulation. Physica-Verlag, Heidelberg, pp. 196~217.
- Ligtenberg, A., Wachowicz, M., Bregt, A. K., Beulens, A., Kettenis, D. L., 2004. A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning. *Journal of Environmental Management* 72, 43~55.
- Luyben, P. D., 1980. Effects of informational prompts on energy conservation in college classrooms. *Journal of Applied Behavior Analysis* 13, 611~617.
- Luyben, P. D., 1982. Prompting thermostat setting behavior: public response to a presidential appeal for conservation. *Environment and Behavior* 14, 113~128.
- Matthies, M., Malchow, H., Kriz, J. (Eds.), 2001. Integrative Systems Approaches to Natural and Social Dynamics. Springer, Berlin.
- Martens, T., Rost, J., 1998. Der Zusammenhang von wahrgenommener Bedrohung durch Umweltgefahren und der Ausbildung von Handlungsintentionen (The relationship between the perceived threat of environmental problems and the formation of action intention). *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie* 45, 345~364.
- Mosler, H.-J., 2000. Computersimulation sozialpsychologischer Theorien Studien zur Veraenderung von Umwelteinstellung und Umweltverhalten (Computer Simulation of Social-psychological Theories. Studies on the Change of Environmental Attitudes and Ecological Behavior). Beltz, PVU, Weinheim.
- Mosler, H.-J., Brucks, W., 2001. The simulation of social influence among agents using social psychological theories. In: Saam, N. J., Schmidt, B. (Eds.), Cooperative Agents. Applications in the Social Sciences. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 125~147.
- Mosler, H.-J., Schwarz, K., Ammann, F., Gutscher, H., 2001. Computer simulation as a method of further developing a theory: simulating the elaboration likelihood model. *Personality and Social Psychology Review* 5, 201~215.
- Palmer, E., 1981. Shaping persuasive messages with formative research. In: Rice, R., Paisley, W. (Eds.), Public Communication Campaigns. Sage, Beverly Hills, CA.
- Petty, R. E., Cacioppo, J. T., 1986. The elaboration likelihood model of persuasion. In: Berkowitz, L. (Ed.), Advances in Experimental Social Psychology. Academic Press, New York, NY, pp. 123~205.
- Petty, R. E., Wegener, D. T., 1999. The elaboration likelihood model: current status and controversies. In: Chaiken, S., Trope, Y. (Eds.), Dual-process Theories in Social Psychology. The Guilford Press, New York, NY.
- Petty, R. E., Priester, J. R., Wegener, D. T., 1994. Cognitive processes in attitude change. In: Wyer,
- R. S. J., Srull, T. K. (Eds.), Handbook of Social Cognition. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, pp. 69~142.
- Renner, B., Schwarzer, R., 2003. Social-cognitive factors in health behavior change. In: Suls, J., Wallston, K. A. (Eds.), Social Psychological Foundation of Health and Illness. Blackwell, Oxford, pp. 169~196.

- Rogers, 1995. Diffusion of Innovations, fourth ed. The Free Press, New York, NY.
- Rossi, P. H., Freeman, H. E., 1993. Evaluation: A Systematic Approach, fifth ed. Sage, Beverly Hills, CA.
- Schmid, B., 2001. What are agents and what are they for? In: Saam, N. J., Schmidt, B. (Eds.), Cooperative Agents. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 5~20.
- Slater, M. D., Flora, J. A., 1991. Health lifestyles: audience segmentation analysis for public health interventions. *Health Education Quarterly* 18, 221~233.
- Staats, H. J., Wit, A. P., Midden, C. Y. H., 1996. Communicating the greenhouse effect to the public: evaluation of a mass media campaign from a social dilemma perspective. *Journal of Environmental Management* 45, 189~203.
- Syme, G. J., Seligman, C., Kantola, S. J., MacPherson, D. K., 1987. Evaluating a television campaign to promote petrol conservation. *Environment and Behavior* 19, 444~461.
- Thompson, S. C. G., Barton, M. A., 1994. Ecocentric and anthropocentric attitudes toward the environment. *Journal of Environmental Psychology* 14, 149~157.
- Turner, J. C., 1991. Turn Social influence. Open University Press, Bristol.
- UNEP. 2000. Global Environmental Outlook. Retrieved 27.12.2005, from <http://www.unep.org/geo2000/S>.
- Verplanken, B., 1991. Persuasive communication of risk information: a test of cue versus message processing effects in a field experiment. *Personality and Social Psychology Bulletin* 17, 188~193.
- Weenig, M. W., Midden, C. J., 1991. Communication network influences on information diffusion and persuasion. *Journal of Personality and Social Psychology* 61, 734~742.
- Weenig, M. W., Schmidt, T., Midden, C. J., 1990. Social dimensions of neighborhoods and the effectiveness of information programs. *Environment and Behavior* 22, 27~54.
- Winett, R. A., Leckliter, I. N., Chinn, D. E., Stahl, B., Love, S. Q., 1985. Effects of television modeling on residential energy conservation. *Journal of Applied Behavior Analysis* 18, 33~44.
- Wiseman, M., Bogner, F. X., 2003. A higher-order model of ecological values and its relationship to personality. *Personality and Individual Differences* 34, 783~794.

## 结束语

# 社会科学研究方法论体系探索

当前,国内外社会科学研究领域的发展趋势,和近年来一些有影响和创新意义的社会科学研究成果都表明,计算实验方法作为社会科学研究的新的方法论,在揭示社会经济系统的复杂性、系统演化趋势,以及系统微观与宏观层次之间相互关系等方面具有重要的作用。基于计算实验方法的应用案例不仅数量越来越多、质量越来越高,而且涉及的领域也越来越广。特别是,越来越多的社会科学专家、学者对计算实验方法的作用和意义有了了解,并运用这一方法开展相关领域的研究工作。另一方面,如第1章所述社会系统反映出来的复杂性,又如此的广泛和深刻,从而使任何一种单一的研究方法都不能完全驾驭其复杂性。也就是说,不可能仅仅依靠一种研究方法就能够深刻、全面认识和分析复杂的社会系统,而需要依据复杂系统科学的理论,运用多种方法论的综合集成,构造更完整、更深刻的社会科学研究方法体系。

回顾社会科学研究方法发展的历程并依据复杂系统科学的基本思维,我们提出如下的关于社会科学研究方法体系:定性定量、科学实验、虚实结合、综合集成。这一体系既是对已有社会科学研究方法优势的凝练,又吸纳了新方法的长处,进一步弥补了单一方法的不足,增强了体系释放出来的综合能力。在一定意义上,也可以认为上述十六字方针为现代社会研究的关键技术。

本节将对此作简要说明。

### 1. 定性定量相结合

如上所述,社会科学研究,既需要思辨的定性研究又需要精密的定量研究。这里的定性,主要指研究者在已有的科学理论、经验和知识的基础上,综合专家知识、智慧与判断力,对拟研究问题的概念、性质、内涵、因果关联及变化趋势做出概念上的判断和界定。这里的定量,主要是指在定性研究的基础上,运用严谨的逻辑推理和数学模型,对社会科学问题进行精密求解与论证。定性与定量方法是社会科学研究的基本方法,在社会科学研究的实际中,既需要定性方法确定

性质、方向、趋势，又需要定量方法进行缜密分析，确定精细的关联与比例，两者有机结合、相互补充。所以，现在的问题已不是需要不需要定性或定量方法，而是如何做好社会科学研究中定性方法与定量方法的结合。可以认为，这是社会科学研究方法体系中的关键技术之一。

首先，对于社会科学研究，定性是定量的基础与前提。经验表明，社会科学研究中一类结构化程度较低的问题，难以建立模型和分析其精密的定量关系。这时，先要由研究者发挥其经验、知识的优势，对问题进行界定、表述，降低其非结构性并向结构性转化，并确定其性质和解决思路，进而才能用恰当的定量方法对问题进行分析和求解。

另一方面，在社会科学研究中，定量分析为定性研究的完善与深化提供了支撑。事实上，对于一类相对简单和机理明晰的问题，定性方法即能够获得对问题明确的界定和认识。但是，对于另一类相对复杂的问题，囿于研究者认识上的局限与信息的不完全，需要有一个逐步深入的认识与分析过程。特别是因为定性研究较多反映了研究者个人的主观性，因而也易出现因个人偏好引起的偏差，这些都需要运用定量方法对定性结论做出修正和完善。

一般地，社会科学研究中的定性定量方法相结合，是通过定性为主，定量为主再到从定性到定量这三个阶段来实现。每个阶段的具体任务以及各个阶段之间的衔接如下图所示。

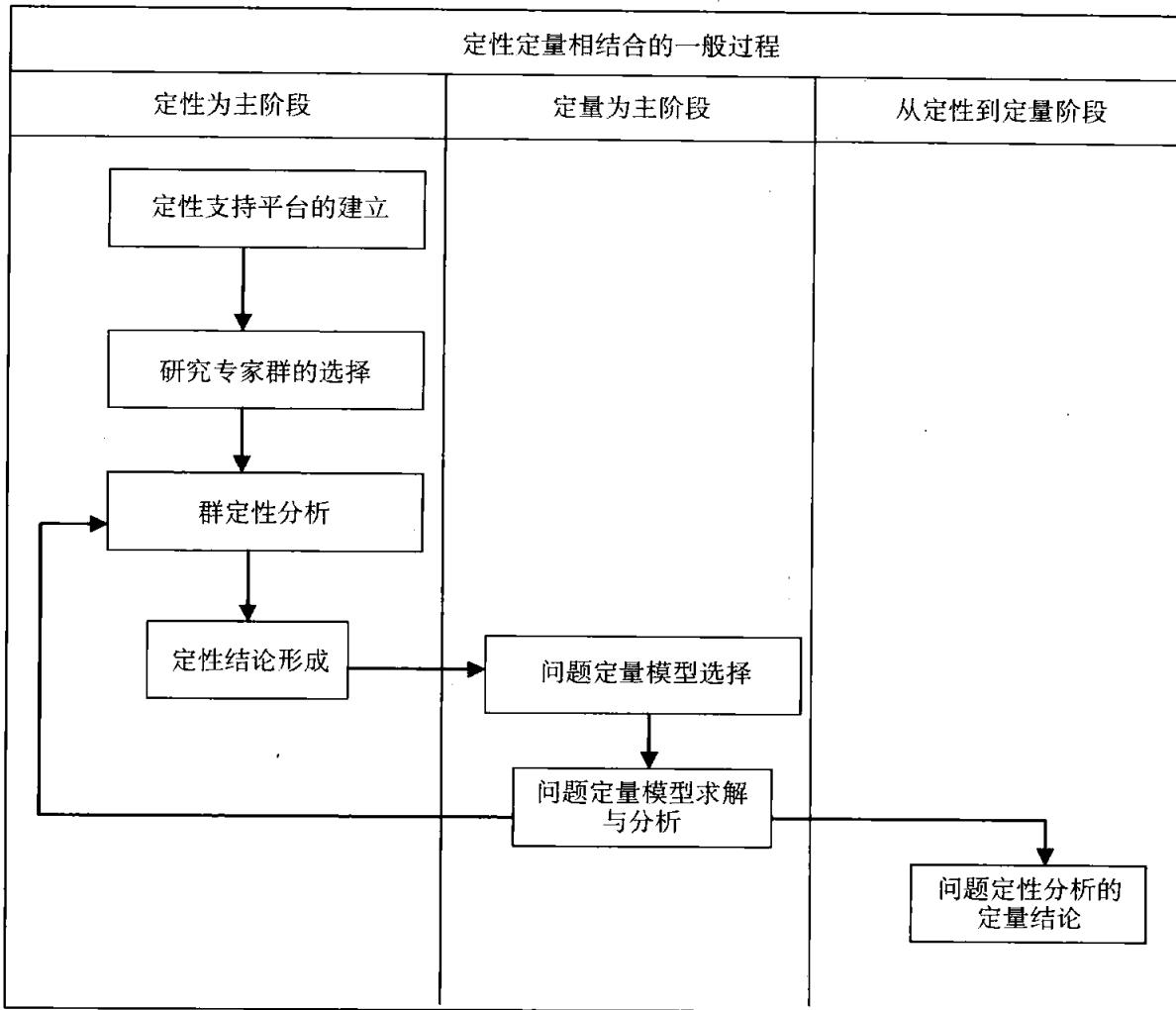
### (1) 定性为主阶段

定性支持平台的建立主要是指构建一个包括专家库、信息库、经验库、知识库、模型库、方法库的定性分析支持系统。其中，信息、知识、经验库在定性分析中发挥其资源集成的优势，为定性分析专家提供智力支持与资源保障，而模型库与方法库等与定量分析相关，在定量分析时发挥重要作用。

针对复杂社会科学问题，定性分析有时必须由多个专家，即由专家群体完成，这就是群定性分析。群定性分析开始时，专家根据自己的经验与专业知识各抒己见，展开发散性思考和互动，在一定范围内，得到对问题在一定程度上的一致认同(同步)，这就是所谓的同步定性阶段。

### (2) 定量为主阶段

根据同步定性阶段对问题的分析与假设，对问题或分解成的子问题进行数学建模、数据分析等定量分析。由于复杂问题被分解后，其侧重点不同，问题的性质不同，模型以及求解方法也各不相同，这时不仅需要针对问题选择适当的模型进行严谨的逻辑推理与定量验证，还需要根据整个复杂问题的需要，对分析结论进行改进与优化。这一阶段的核心，是对各子问题充分运用定量方法，对上一阶段的定性分析结论提出精细的论证。在一些情况下，还会根据定量分析结果



对前一阶段的定性结论提出修正。

### (3) 从定性到定量的阶段

第三阶段是对最终分析结论的逼近与收敛。复杂社会科学问题的研究过程既需要分解,也需要综合,分解基于第一阶段的同步定性认识,综合基于第二阶段的定量化分析与验证,最终形成新的总体共识。这取决于对问题的总体把握,以及第一阶段定性为主研究与第二阶段定量为主研究的综合,最终得到有精细定量信息支撑的、新的深刻的定性结论。

综上所述,从提出经验性假设和判断的定性分析,到定性定量相结合得到定量描述,再到获得从定性到定量的科学结论,实现了从经验性的定性认识上升到基于定量的定性认识的复杂社会科学问题的研究过程。

## 2. 科学实验

科学实验是指在社会科学研究中,根据需要而运用包括传统实验方法、计算实验方法等的科学实验方法。其中,传统实验方法可以为社会科学研究者提供尽可能贴近现实的、多状态的理论与实践交互作用的环境,并通过观察、分析实

验参与者的行为和人机交互结果,提供研究社会科学问题的新的工具支持。

进一步地,考虑到社会系统是一类复杂巨系统,社会科学研究要考虑到:

- (1) 系统由大量的不同质的自主主体组成;
- (2) 社会中自主主体、团队(组织)和社会构成了社会系统的层次性结构;
- (3) 社会系统层次间存在整体性行为、现象和特征的“涌现”;
- (4) 社会系统在动态变化中出现演化。

而以上这些考虑,很难用单纯的定性方法、定量方法或传统的实验方法来分析。比较而言,社会科学计算实验能较好地从社会系统微观行为和宏观现象的统一来研究问题,它着重在社会科学基本原理、基本规律上研究和分析社会科学问题,并以此来模拟社会系统主体之间、层次之间的相互作用,整体涌现及演化过程。特别是社会科学计算实验方法通过计算机化的“时间隧道”将社会系统的演化过程以新的方式重新进行展示。由于社会系统的演化过程中的任一时点,向后都有确定的路径,但向前却不能确定。社会的今天包含着过去,但今天未必包含在过去之中,明天也不完全包含在今天之中。所以,展示社会系统演化,必然受“环境依赖”、“路径依赖”及“自组织”机制的支配,因而社会科学计算实验结果是社会演化的“一种可能”,而不是“唯一可能”。各种可能的集合既告诉我们演化路径特征与趋势的“大多数”,也告诉我们奇异演化路径可能的“极少数”,这使我们除了能够验证相关的社会科学理论之外,还可以为我们提供新的理论元素和营养,启迪我们理论创新的视角,丰富社会科学新的理论宝库。

显然,这些功能是一般传统社会实验方法不具备的。由此可见,包括传统实验、计算实验在内的科学实验是社会研究方法体系中的重要组成部分。当然,由于在实验设计、规则假定及系统和主体建模中,需要运用大量的关于研究问题的定性分析和定量分析的结论,这恰恰体现了这一方法体系中的定性定量与科学实验之间是紧密结合与相辅相成的。

### 3. 虚实结合

这里,所谓“实”,是指实际的社会系统,实在的社会科学问题。显然,社会中人是“真实”的、组织是“实体”、问题是“实情”、状态是“实况”、现象是“实景”、观测到的是“实据”。社会科学研究就是要通过各种手段与方法,准确认识如此众多的“实践”,“实事求是”地分析问题,得到有“实质”性的研究结论,提出有“实效”的对策意见并加以“实施”。为此,我们应该尽量地运用各种手段和工具,由表及里、由此及彼,凸显其内核,最终认识社会系统问题的本质。

这其中,定性定量、科学实验都是人们为了实现这一目标而采用的方法和手段。虽然它们在方法论上有很大的区别,但有一点是共同的,即它们都是实际社会系统的抽象。例如,定性研究方法中概念模型所作的假设,往往是实际社会现

象的简化,社会主体心理、行为的“多样性”可能被“单一化”了、不同主体之间的“异质性”可能被“同质化”了。因为只有这样,才能运用思辨的定性研究模式,对具体的社会实践进行概念化的描述,并由此抽象出普遍的规律。

而定量方法,因数学建模、数学可解性的需要,必然要求在分析过程中采用简化和抽象的手段,这就造成数学化的社会系统与原型社会系统之间的脱节,加之人的心理、行为等均难以直接量化,因此,只能说定量模型是社会系统丰富“躯体”白描性的“构架”反映。

至于传统的科学实验,由于它受到实验条件、成本及道德、伦理、法律等方面的限制,所以它在表达人类文化基因层次上的记忆、学习、适应、遗传、突变,以及揭示系统层次之间机理等方面只能做到有限作为和有限深度,与现实中复杂的社会实践相比,它们只能是简约和粗糙的。

由此可见,社会科学研究中的定性分析、定量分析以及科学实验方法都是社会系统真实性的简化与抽象,故与实际的“真”相比,它们都是实际的“虚”,我们只能通过“虚化”的社会系统来认识、分析“实际的”社会系统。

既如此,系统“虚化”是必要的,又不可避免地是不足的。对此,我们除了综合运用定性、定量及科学实验等多方法来提高系统“虚化”质量,更重要的是要通过所谓的“虚实结合”来促进“虚”系统与“实”系统的一致。

什么叫“虚实结合”呢?一方面,尽可能通过对现实系统各种实际情况和问题的研究,深刻揭示其关键组成要素、主要结构、重要运行机理等,以这些具有本质性的系统特征与关联关系建立概念模型、数学模型、实验模型和计算机模型。另一方面,在“虚化”系统形成后,还要将其种种表现,如输入/输出关系、系统行为和品质表征等与现实系统进行比对,通过两者之间的一致性、稳定性、敏感性等来修正和完善系统“虚化”工作。特别是实际社会系统中许多难以量化和难以编码化的信息,如心理、偏好及知识、智慧等,更要通过人机结合、以人为主等广义建模技术,将它们“嵌入”到虚化系统中集成为广义模型,以提高“虚”系统的“实在性”和“逼真性”。

显然,这一结合既充分发挥了社会系统概念模型、数学模型、实验模型及计算机模型的作用,同时也充分重视真实社会系统对这些模型的补充和完善。

#### 4. 综合集成

在第二章中我们较详细地介绍了分析复杂系统的方法论——综合集成的基本内容,它也是研究社会科学方法体系的重要组成部分,下面是对这一观点的几点理解。

第一,现代社会科学问题一般具有跨学科、跨领域、多层次的特点,涉及到经济、社会、技术、管理及人文各个领域。即使在一个领域内也不能指望只以一种

理念、从一个角度、用一种方法、使用一种工具、依靠一部分人就能解决全部问题。这就需要我们在研究复杂社会科学问题时,把自然科学、社会科学与人文科学相结合,专家经验与科学理论相结合,定性方法和定量方法相结合,使这种结合相互渗透,整合为一体。如对所研究问题的经验性假设,通常就不是某一领域、某一学科的专家所能提出的,而需要多个不同领域、不同学科、不同专长的专家构成专家体系,依靠群体经验、知识、智慧的集成,实现多经验、多知识、多智慧的涌现,以期更加全面、科学地认识复杂社会科学问题,这就是定性的综合集成。

同样对于以精密论证为特点的定量过程,也需要在多方法、多模型集成的基础上,确定对复杂社会问题的整体求解路径。我们说通过对复杂问题的界定与分解,可将其划分为多个子问题,不同的子问题的求解需要运用不同的定量方法,而复杂问题整体解决方案并不是各个子问题模型的简单叠加,而需要根据总体目标与原则,对其进行多模型的集成与优化,这需要首先对定量进行综合集成。定性综合集成与定量综合集成在工具与方法上主要是运用信息化、网络化手段实现专业、知识、智慧、经验的集成。例如通过建立经验库、专家库、研讨厅、总体设计部等方式实现定性技术的综合集成;通过建立模型库(概念模型、结构模型、数学模型)、数据库、方法库、规则库等方式实现定量的综合集成。同时建立知识库、信息库为核心的研究分析支持平台,作为定性与定量综合集成过程的知识储备与智力支持。由此,我们说,复杂社会问题的研究不仅需要运用定性与定量相结合的方法,更需要运用从定性到定量的综合集成方法。

第二,从综合集成的核心思想出发,可以认为,社会科学研究方法体系中的“综合集成”本质上是多种方法论的“综合”和“集成”。这些方法论如:

- 定性、定量方法的结合;
- 经验、知识与智慧的融合;
- 数据、信息与知识的聚集;
- 人、机结合,以人为本;
- 总体—局部—总体的思考;
- 宏观—微观—宏观的思维;
- 结构化与非结构化模型综合;
- 同步—异步—同步;
- 同构—异构—同构;
- 分析—实践—综合—再分析……;
- 静态—动态—静态……;
- .....

第三,社会科学研究方法中的人机结合、以人为主的综合集成。处理复杂社

会问题需要处理大量的数据、信息与资料。在这方面,计算机拥有不少信息处理、加工方面的优势,如信息处理的速度、信息存储的量、逻辑思维、定量处理方面等等都有超越人的地方,但是,分析社会问题还需要形象思维,需要定性和宏观地处理信息,更加重要的是,还需要把逻辑思维和形象思维相融合,产生创造性思维。显然,对于这一目标,单纯地依靠人或单纯地依靠计算机都有其局限性和不足,如果把计算机技术与人有机地结合起来,形成新的互补优势,必然具有更强的分析问题的能力。考虑到当前计算机实际能力的局限性,我们还不能指望计算机在形象思维特别是创造性思维方面对处理复杂社会问题有本质性的帮助,所以,人机结合过程中,在许多重要的、关键的地方还得主要依靠人的知识和智慧帮助,即还得“以人为主”。

第四,综合集成在某种意义上可以看成是一种生成系统的原则和原理,也可以理解为生成系统的过程,还可以认为是产生了一个系统的结果。既然社会系统是复杂系统,而综合集成是分析复杂系统的方法论,因此,综合集成必然产生一个与复杂社会系统相匹配的复杂系统,并以此来认识、分析复杂社会系统。因此在“综合集成”意义上将最终产生一个用于认识、分析、协调和具体管理复杂社会系统的复杂系统:

- 对复杂社会系统的认识系统(主要表现于对社会系统分析);
- 对复杂社会系统的协调系统(主要表现于对社会系统整体性的管理体系);
- 对复杂社会系统的操作系统(主要表现于具体管理实施)。

第五,综合集成在社会科学研究实践中表现为一个动态过程,这一过程充满了对一个复杂社会系统的逐步认识,对一个复杂系统(综合过程本身形成的系统)的设计、协调和组织,因此,它必然是一个实践—认识—再实践—再认识——的螺旋式逼近过程。在这一过程中,研究主体逐步减少了对社会系统认识的模糊性与不确定性,增强了关于认知、分析社会系统的知识、智慧和驾驭能力。因此,可以认为,综合集成的过程,就是通过用一个比较无序、比较非结构、比较模糊、比较优化但不断改进、不断完善 的系统序列,实现对一个复杂社会系统的认识、组织与管理。

随着社会科学实际问题复杂性的不断提高,人们关于社会科学研究方法体系也在不断完善,此可谓“魔高一尺,道高一丈”。特别是关于社会的整体性认识不断被人们所接受,不同领域的学科交叉越来越广泛并越来越显示其强大威力。所以,在系统科学、计算机技术等共同推动下,在社会科学研究中具有重要意义的计算实验方法应运而生。它不仅为我们提供了研究复杂社会系统自组织、动态演化及宏观与微观层次之间相互作用等问题的新的工具和手段,而且还和传

统的社会科学研究方法,即定性定量、传统社会实验等方法,在综合集成思想指导下形成现代社会研究方法体系:定性定量、科学实验、虚实结合、综合集成。这一体系不仅不否定对于社会科学研究有重要贡献的各种传统方法,而且在深入发掘它们各自作用的基础上,将它们相互整合、互补优势,形成更为强大的关于社会科学问题的认识、分析与驾驭能力。这既是计算实验自身意义的体现,更是在综合集成思想下涌现出来的整体价值。

## 后记

本书是《社会科学计算实验方法系列》丛书的第一本,是在南京大学工程管理学院研究团队近十年来探索与研究的基础上整理、总结而成的。另外两本不久也将出版。

在研究团队十年来的探索过程中,我们得到了许多领导和专家的关心和支持,例如:南京大学计算化学领域的专家,给我们讲述计算化学的基本思想,虽然化学与社会科学差之甚远,但以计算机为工具,构建相应的实际系统,并以此来研究问题的思想基本是一致的,我们从化学家那儿学到了不少东西,虽说“隔行如隔山”,但更有“隔行有通径”!

南京大学对社会科学学术创新一直非常支持,在了解了计算实验方法对社会科学方法论创新的重要意义后,学校给予了多方面的支持。除了下拨“985”专项研究经费外,还专门成立了“南京大学社会科学计算实验中心”,落实了数百平方米的实验用房与中心建设经费。

最近,教育部社会科学司领导等三次莅临南大社会科学计算实验中心指导工作,对社会科学研究新方法的探索给予了充分的肯定,并表示要大力推广社会科学新的研究方法的普及与运用。

王众托院士是我国著名的、德高望重的学术前辈,高屋建瓴,早在 20 世纪 90 年代,王先生就明确指出了计算试验方法对于科学研究的重要意义与前景,王先生对我们的研究工作一直非常关注,给予鼓励和热情指导,此书出版之际,王先生在百忙之中还为本书作序,给予我们很大的支持。在此,我们向王先生表示深深的感谢。

国家自然科学基金委员会管理学部历来都很支持管理科学方法论的创新研究。2007 年,我们申请了“供应链管理:协调、优化及计算实现”重点基金项目,其中,把计算实验方法列为重要的研究方法,并提出了“定性定量、计算实验、虚实结合、综合集成”的技术路线,得到学部与评审专家的充分肯定,故申请当年便得到批准,极大地推动了我们关于计算实验方法的研究。所以,本书之出版,是

自然科学基金重点项目“供应链管理：协调、优化及计算实现”(70731002)的重要研究成果之一，我们对管理学部表示深深的谢意。

本书为“社会科学计算实验方法系列”丛书之一，此后将有“社会科学计算实验基本教程”(之二)与“社会科学计算实验案例分析”(之三)相继出版，整个系列丛书设有著审组，著审组由盛昭瀚、李心丹负责，成员有张军、陈国华、杜建国、刘慧敏、李静、徐峰、蒋诚智等。

参加本书研究与写作的人员还有陈国华、刘慧敏、侯云章、高俊、徐峰、李静、蒋诚智、陈若航、李真、田真真、朱亮亮、丁璐斌、黄健、刘海飞、孟庆峰、金帅、张海斌、刘小峰、沙砾、张晓颖、顾正云、王宇超、施晨曦、龚剑雄、张晓春、韩玲、丰柯、王卉佳、陈睿、刘也琪等。他们都为本书做出了重要贡献，其中特别是徐峰博士，他为本书之材料整理、翻译和统稿，倾注了大量的心血。

上海三联书店是国内外享有盛誉的出版社，它以严谨的学术、规范的出版、高雅的格调、清新的风格著称于世，为学人敬仰。本书在上海三联书店出版，该社领导与责任编辑冯征先生极为重视和认真，充分体现了三联书店支持学术、传播文化之精神，绝无丝毫出版“商”之气。在此，我们也对他们表示深深的谢意。

计算实验方法涉及多领域、多学科，又是一门新兴技术，尚属探索初期，我们研究的时间不长、学术积淀不多、水平不高，故本书中不足和错误实属难免，尚祈专家与读者不吝赐教。

历时十载，本书终于出版，我们将更加努力地把该系列后续两本书的相关出版工作做好，争取以高质量的成果奉献给我国管理学科研究与社会科学事业的发展。

此为记。

盛昭瀚

2009年2月22日