

复杂系统研究方法的讨论

曹 征¹, 张雪平², 曹谢东³, 尹 欣², 王 东⁴

(1. 西南财经大学 统计学院, 四川 成都 610074; 2. 西南石油大学 计算机科学学院, 四川 成都 610500; 3. 西南石油大学 电子信息工程学院, 四川 成都 610500; 4. 中石化西南油气分公司川西采气厂, 四川 德阳 618000)

摘 要:兴起于 20 世纪 80 年代的复杂性科学, 是当代科学发展的前沿之一. 复杂系统是复杂性科学的研究对象, 因此对研究复杂系统的方法进行总结和归纳是充满挑战且极具意义的. 通过讨论, 归纳出了自下而上的“涌现”方法和自上而下的“控制”方法这两条研究路线, 其中包含了隐喻、模型、数值、计算、虚拟和综合集成 6 种具体的研究方法. 并通过一个简单实例来说明它们的应用, 同时指出“涌现”方法更适合人们用来研究更多类型的复杂系统.

关键词:复杂性科学; 复杂系统; 基于 Agent 的建模; Swarm; StaLogo

中图分类号: N94, TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785 (2009) 01-0076-05

A discussion on methodologies for research into complex systems

CAO Zheng¹, ZHANG Xue-ping², CAO Xie-dong³, YIN Xin², WANG Dong⁴

(1. Statistics College, Southwest University of Finance and Economics, Chengdu 610074, China; 2. School of Computer Science, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. School of Electronic Information Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 4. Southwest Oil and Gas field Company of China Petroleum, Chengdu 610000, China)

Abstract: Complexity science arose in the 1980s and continues to be one of the leading edges in the development of modern science. Complex systems are a main subject of research in complexity science; summarizing the techniques of complex system research is very challenging and has great significance. This paper discusses two different techniques to research complex systems, one technique is called “Emergence”, the other one is called “Control”; both are bottom-up methods. These two techniques were then shown to be divisible into six categories. This paper also demonstrated the applications of these techniques and concluded that the “Emergence” technique is generally suitable when studying different types of complex systems.

Keywords: complexity science; complex systems; Agent-based models; Swarm; StaLogo

复杂性科学 (complexity science), 是系统科学发展的新阶段, 也是当代科学发展前沿之一. 尽管它目前仍处于发展形成阶段, 一些科学家早已将它誉为“21 世纪的科学”. 对复杂性科学的研究采用了许多传统科学研究较少采用甚至排斥的方法. 复杂性科学方法论对传统科学方法论既是重大的挑战, 也是重要的补充, 对复杂性科学自身的发展也有着重要的意义^[1].

复杂系统 (complex systems) 是复杂性科学的研究对象. 如同复杂性一样, 无论在定性上还是定量

上, 它们的概念都是难以把握的^[2-3]. 面对这样的复杂系统, 人们是如何进行分析和研究的呢? 通常的做法是从分析复杂系统的特征入手, 以建立某种一般性描述^[4].

分析方法永远都是科学研究中最重要的工具之一. 然而, 这种方法应用于复杂系统的研究却有着严重的缺陷. 因为, 复杂系统并非仅仅是由其组分之和构成, 实际上它还包括了这些组分之间内在的错综复杂的关系. 在分解一个系统时, 分析方法破坏了人们所要寻求理解的内容. 尽管如此, 并不意味着对于复杂性的探索就没有了希望, 依托于计算机建模技术, 可以对复杂系统的行为进行模拟, 而对它们不一定是已经理解的.

收稿日期: 2008-11-07.

通信作者: 曹 征. E-mail: cowyco@sina.com.

1 研究的方法与路线

对于复杂系统的研究存在着两条路线:第 1 条是利用计算机仿真的方法通过模拟复杂系统中个体的行为,让一群这样的个体在计算机所营造的虚拟环境下进行相互作用并演化,从而让整体系统的复杂性行为自下而上的“涌现(emergence)”出来。这就是圣塔菲研究所(Santa Fe Institute, SFI)研究复杂系统的主要方法,常被称为自下而上的“涌现”方法。

当人脑面对复杂系统时,可以通过有限的理性和一些不确定信息做出合理的决策,从而得到满意的结果;因此,研究人脑面对复杂系统是如何解决问题的则成为了第 2 条可走的研究复杂系统的路线,即被称为自上而下的“控制”方法。

东西方学者研究方向的主要差别就在于:西方研究者普遍走的是从下而上的路线,即由简单系统、大系统和简单巨系统等研究上升到复杂巨系统的研究;而中国学者则主要走的是自上而下的路线,即首先研究开放的复杂巨系统,找到处理这种复杂巨系统的方法论,然后以此为主干,在各种不同条件下,分支出简单系统、大系统和简单巨系统及其处理方法。

在实践中,从事复杂性科学研究的学者们在传统科学研究方法的基础上,总结出了许多具有开创意义的新方法,大致包含:隐喻、模型、数值、计算、虚拟和系统集成等 6 种具体的研究方法。

1.1 隐喻方法

在传统学科中,隐喻和类比都有着同等重要的作用;但在传统的科学方法论中,往往只论述类比,而忽略掉了隐喻。在对复杂系统的研究中,隐喻的作用和意义则被突显出来。著名的复杂适应系统(complex adaptive systems, CAS)理论以及涌现理论都是美国圣塔菲研究所的霍兰(Holland John)教授使用隐喻方法构建出来的。霍兰教授认为隐喻是创造活动的核心,运用隐喻所产生的结果是创新,它让我们看到了新的联系。

1.2 模型方法

构建模型,是人类在认识世界和改造世界的实践过程中的一大创造,也是科学研究的最常用方法之一。由于它综合了还原与整体两种特性,再结合现代的计算机技术,模型方法在对复杂系统的研究中有着特别重要的作用。复杂性科学研究一般都是在隐喻类比的基础上,建立复杂系统的模型。为了探索复杂性,科学家们从不同的角度、不同的途径建立了大量的复杂系统模型,如:细胞自动机(cellular au-

tomata)、复杂网络(complexity network)、多智能体系统(multi-agent system, MAS)、CAS 的回声模型、涌现理论中的生成模型、自组织临界性(self-organized criticality, SOC)理论的沙堆模型、人工生命研究中的人工生命模型等等。

关于如何对复杂系统建模主要有两类实现方法:基于规则与基于联结的方法。采用第 1 种方法的,主要有人工智能研究人员、遵循乔姆斯基(Chomsky)传统的计算语言学家和认知科学;而处于交叉学科边缘的神经科学家、心理学家等则常使用第 2 种方法。相对而言,基于联结的模型对于复杂系统的理解,要比基于规则的模型更为有效。

1.3 数值方法

数值与科学是密不可分的,在数学中就已存在专门的数学分支:数值分析。在科学研究中,它也可以做为一种方法存在。所谓数值方法就是对系统模型进行计算求解,从而把握系统的组成和运行规律。旧有的观念认为计算并不能发现什么新东西,因而只把数值方法当作一种辅助性的方法。但在对复杂性的研究中,许多新现象和规律都是通过数值计算发现的,从而数值方法得到人们更多的关注。比如,“蝴蝶效应”的发现,就要归功于洛伦兹对数值的兴趣以及成功地应用了数值方法。应用数值方法进行复杂性研究所形成的理论主要有混沌(chaos)理论与分形理论。

1.4 计算方法

复杂性科学中的计算复杂性(computational complexity)和算法复杂性(algorithmic complexity)主要是依赖计算方法来进行研究的。所谓计算方法就是从可计算理论出发,对问题是否可以计算,以及怎样计算进行分析,并对计算的方法进行算法描述,以找到问题的解决方案或途径。如今,复杂性理论的许多分支都跟计算或算法问题有关。像关于遗传算法、适应性学习和复杂适应系统等这些概念的创立,都是运用计算方法的典型案例。另外,对人工生命的研究从一开始就是从计算的角度来思考生命的本质问题。在人工生命看来,生命的本质实际上就是一种算法,这种算法的运行即表现为生命,而其研究的目的就是想通过计算机编程(即寻找计算、算法的方法)来揭示生命的本质。

1.5 虚拟方法

在科学实验中,人们常采用“模拟”的方法来探索研究对象的现象与规律。在计算机出现以后,虚拟实验和虚拟方法就成为了一种新的实验形式和研究方法。这里所说的虚拟方法,也称作计算机模拟或系

统仿真,指的是在计算机上对实际系统(包括设计中的系统)的数学模型进行模拟实验,从而达到研究该系统的目的.对复杂系统的研究如果沿用传统的方法是难以奏效的,很多情况下根本无法对它进行受控实验.而使用虚拟方法可以弥补直接实验或受控实验的不足,使复杂系统的实验检验成为可能.比如,为了检验CAS回声模型的可行性,圣塔菲研究所就开发了一个计算机软件平台——SWARM.同样,在人工生命的研究中,虚拟仿真方法占据着重要的地位,甚至可以说,其研究主要就是应用虚拟仿真的方法.

1.6 综合集成方法

在复杂系统的研究中,单独使用前面五种方法中的任何一种,都是难于胜任的.所谓综合集成法,从广义上来说,就是把研究复杂性科学的各种方法综合起来,发挥各自的优势,克服弱点而形成某种真正的综合方法;从狭义上来说,指的是由钱学森先生及其讨论班里的中国学者针对开放的复杂巨系统而提出的一种方法论.此套方法考虑的是从整体上研究和解决问题,采用“人—机”结合以人为为主的思维方法和研究方式,对不同层次、不同领域的信息和知识进行综合集成,达到对整体的定量认识.综合集成方法从提出到现在也不过十多年的时间,方法本身及其应用取得了一些进展,但从长远来看,这些仍然只是个开始.

上述6种方法既相互联系又相互区别的,作为形象思维的隐喻是对复杂系统探索的起点和基础.通过隐喻类比,建立起复杂系统的科学模型.在模型的基础上,对复杂系统做数值计算、算法描述,并通过计算机在虚拟现实的世界里进行实验验证.最后把得到的对复杂系统的认识综合集成起来,形成一个比较完整的认识.

2 研究工具

近代科学虽然一直在强调数学工具,然而在复杂系统里面,完全严格的、高深的数学却不一定是必需的.即是对于那些欠缺这方面知识的普通人来说,研究复杂系统的确是一个很好的机会.因为复杂系统理论还仍存在起步阶段,人们还没能找到一种更为严格的数学描述.另外,如果能尽量多地理解已有的关于系统论、混沌学、控制论、人工智能等知识,对于研究复杂系统固然会有帮助.但实际上,这些知识同样并非必需的,因为复杂性科学很多研究方法和基础都来源于对客观世界的直接洞察.

掌握和利用计算机来对复杂系统进行建模的这

一种技术是对研究复杂性科学的研究人员的一个基本要求.他们只有懂一些计算机编程的知识,这样才能更好地理解、应用复杂系统理论.目前,可用于复杂系统建模的工具并不多,主要有Swam和StaLogo.

2.1 Swam简介

Swam^[5-6]是由SFI基于CAS理论开发的多主体(multi-agent)软件工具集.它利用人工智能和计算机科学领域的最新研究成果,采用基于主体(agent)、自下而上(bottom-up)面向对象的仿真建模方法,直接模拟组成系统的微观主体行为,以及主体与主体之间的相互作用,研究宏观系统的整体行为,实现对复杂适应系统的模拟仿真. Swam实际上是一组用Objective-C语言写成的类库.它可以运行在Unix操作系统和Windows平台下.1999年Swam又提供了对Java的支持,从而使Swam可以被更多非计算机专业人士使用.

Swam的建模思想就是让一系列独立的主体通过独立事件进行交互,帮助研究由多个主体组成的复杂适应系统的行为.通过这些类库(包括许多可重用的类)支持模拟实验的分析、显示和控制,即让用户可以使用Swam提供的类库构建模拟系统,使系统中的主体和元素通过离散事件进行交互.由于Swam没有对模型和模型要素之间的交互作任何约束,所以Swam可以模拟任何物理系统、经济系统或社会系统.

2.2 StaLogo简介

StaLogo^[7]是由麻省理工学院(MIT)多媒体实验室开发的一个免费的可编程软件平台,可用于基于主体的建模.它以软件的方式描述了主体以及主体与环境、主体与主体之间的交互过程,从而可以研究由多个主体组成的复杂适应系统的运行机制,如生物免疫系统、交通运输以及市场经济等.

它实际上是一组用Java编写的类库,采用的是面向对象的编程方法,用户可以利用这些可重用的类库来构建模拟复杂系统.与此同时,StaLogo还为用户提供了良好的操作界面,如图表、按钮和窗口等,用户可以通过界面来进行仿真分析、控制和结果的显示.在编程语言上,StaLogo提供的是一种类似于Logo的并行语言,可以通过向仿真主体发命令来生成图片和动画,非常形象直观,容易理解. StaLogo的目的就是通过提供一种简单、直观、构思巧妙的建模仿真工具,从一种新的视角帮助人们分析和理解复杂适应系统.

对比这两个建模工具,StaLogo最大特点是简

单、便捷,更易于掌握和使用。Swam 本身的开发语言是 Objective-C,即使是计算机专业的人员,也需要花大量的时间来熟悉这种语言并书写仿真代码。虽然 Swam 现在已经支持 Java 编程,但在技术上依然不够成熟,而且 Swam 的仿真代码在跨平台移植时比较困难。StaLogo 最新版本的核心是用 Java 编写的,可以不加修改地运行在任何平台上。它拥有良好的用户界面,用户可以非常容易地写出系统的仿真程序,从而分析和验证复杂系统的运行机制,加深对复杂系统的理解。

尽管各有优劣,但这两个工具在对经济系统、社会系统和生态系统等复杂系统的研究中都得到广泛的应用^[8-11]。

3 复杂系统理论的应用举例

复杂系统理论的应用领域是极其广泛的^[12]。下面用经济系统举例简单说明前面所提及的两条路线的差异。

我们知道,经济系统是一个复杂系统,每一个人就构成了系统的元素,他们根据自己的决策规则选择合适的时机进行买卖经济活动。按照“涌现”的方法来研究这样的系统,就是要在计算机上实现一个模拟的交易市场,并且创造若干相互买卖的虚拟“人”,每个“人”都用计算机编好的规则进行买卖的决策。虽然现实中的人用到的决策规则远远比计算机模型中的“人”的模型复杂的多,但是这样的近似还是有意义的。因为当若干这样的个体组合在一起构成系统的时候,宏观经济系统的一些现象就会自下而上地“涌现”出来,而这些涌现出来的现象在很多方面是客观反映真实经济系统的。

按照“控制”的观点,可以通过找到几个宏观经济系统的指标量,比如 GDP、价格指数、失业率等等,然后根据这些经济指标累计学习系统运作的规律,通过一段时间内系统的运作,不难积累一些经验,这些经验就可以构成描述经济系统运作的规则。然后,就可以按照找寻出来的经济系统的规则对经济系统进行控制,例如通过政府的政策来改变经济系统中每个个体的决策环境和制度环境来改变个体的行为规则,从而改变整个宏观经济系统的运行状况。在这里需要指出的是,宏观经济规律的把握并不破坏复杂系统中局部信息的性质,因为对于经济系统的规律把握是在高于经济系统个体层次的基础上进行的。可以认为政府具有这种高层次的性质,也就是说它不是严格意义上的经济系统中的主体。

从上面可以看到 2 种方法都可以有效地对复杂

系统进行把握,然而使用的方法是完全不一样的。目前,大部分复杂性科学研究复杂系统的时候都用的是“涌现”的方法,而对于“控制”的方法实际上在人工智能学科诞生的时候就已经开始使用了,例如专家系统的实践、各种逻辑系统的仿真等都是使用这种方法完成的,而在复杂系统的研究中则比较少提及。

4 结束语

复杂性科学要发展到近现代还原论科学那样的成熟程度仍需要经历很长的历程。因此,想要全面地归纳总结出其方法和方法论,在目前还是十分困难的。通过讨论,归纳出了自下而上的“涌现”方法和自上而下的“控制”方法这两条对复杂系统的研究路线,其中包含了 6 种具体的研究方法。限于个人学识,这里所做的也仅仅是一些初步的探讨。尽管对复杂性以及复杂系统的定义还不严格,研究方法也不够系统和全面,但这些都不得阻碍人们对它进行研究,在实际研究与应用过程中人们已取得很多富有意义的成果。

参考文献:

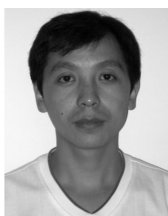
- [1] 黄欣荣. 复杂性科学的方法论研究 [M]. 重庆:重庆大学出版社, 2006
- [2] 吴志伟, 袁德成. 关于复杂系统研究的发展情况 [J]. 控制工程, 2005, 12 (增刊 1): 10-13.
WU Zhiwei, YUAN Decheng. Study of the development in complex systems [J]. Control Engineering of China, 2005, 12 (S1): 10-13
- [3] 闫八一, 王 龙, 革明鸣. 近二十年复杂系统研究回顾 [J]. 系统科学学报, 2007, 15 (3): 83-87.
YAN Bayi, WANG Long, GE Mingning. The review of study on complexity 20 years [J]. Chinese Journal of Systems Science, 2007, 15 (3): 83-87.
- [4] 保罗·西得亚斯. 复杂性与后现代主义——理解复杂系统 [M]. 曾国屏, 译. 上海: 上海世纪出版集团, 2006
- [5] 丁 浩, 杨小平. SWARM——一个支持人工生命建模的面向对象模拟平台 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14 (5): 560-572.
DING Hao, YANG Xiaoping. SWARM—An object-oriented platform to construct artificial life model [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2002, 14 (5): 560-572
- [6] 冯迪砂, 吴 斌. 两种数字生命的 Swam 仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (4): 928-933.
FENG Disha, WU Bin. Research on Swam-based simulation for two digital lives [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2007, 19 (4): 928-933.
- [7] 游文霞, 王先甲. StaLogo 在基于 agent 复杂系统建模与仿真中的应用 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2006, 39

- (3): 91-96
- YOU Wenxia, WANG Xianjia Application of StarLogo to agent-based modeling and simulation oriented complex systems[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(3): 91-96
- [8] 罗 批, 司光亚, 胡晓峰, 等. Swarm 及其平台下建特定民意模型的探讨 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 5-7.
- LUO Pi, SI Guangya, HU Xiaofeng, et al. Swarm & discussion of the method of constructing the special public opinion model[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2004, 16(1): 5-7.
- [9] 孙 建, 叶民强. SWARM 在博弈论中的仿真分析研究 [J]. 计算机工程与应用, 2003, 33(3): 58-61.
- SUN Jian, YE Minqiang Simulation and analysis research of Swarm in the game theory[J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 33(3): 58-61.
- [10] 张 江, 李学伟. 人工社会——基于 Agent 的社会学仿真 [J]. 系统工程, 2005, 23(1): 13-20.
- ZHANG Jiang, LI Xuewei Artificial societies—Agent based social simulation [J]. Systems Engineering, 2005, 23(1): 13-20.
- [11] 夏永红. StarLogo 对 Wiki 演化过程模拟探析 [J]. 图书情报知识, 2008, 23(3): 23-27.
- XIA Yonghong Exploring and analysing the simulation of the evolution of Wiki based on Starlogo [J]. Document, Information & Knowledge, 2008, 23(3): 23-27.
- [12] 吴 彤. 若干复杂性著作和 emergence 近期文献分析研究 [J]. 系统科学学报, 2007, 15(3): 98-106
- WU Tong Review present literatures of complexity studies [J]. Chinese Journal of Systems Science, 2007, 15(3): 98-106

作者简介:



曹 征,男,1982年生,博士研究生,主要研究方向为金融统计、智能系统.



张雪平,男,1975年生,硕士研究生,主要研究方向为模式识别与智能系统.



曹谢东,男,1954年生,教授,油气田数字化研究与工程中心主任,中国人工智能学会智能工程专业委员会副主任. 主要研究方向为油气测控、智能系统. 承担多项国家 863 计划课题、国家十五科技攻关课题和省部级课题,获省部级科技进步奖 4 项,发表学术论文 90 余篇.

2009 智能人机系统与控制论国际学术会议

2009 International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics

The organizing committee and our local organizers wish to extend to you our personal welcome to attend the 2009 International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC09) which will be held at Hangzhou, China in 26-27, August 2009.

Important Dates:

Paper submission site open: Dec 1, 2008

Full paper submission: April 15, 2009

Acceptance Notification: May 10, 2009

Camera-ready papers: May 20, 2009

Conference: August 26-27, 2009

E-mail: ihm sc09@ gmail .com

Website: <http://www.ihmsc.org/index.html>