

跨层次仿真中网络形成的涌现机制研究综述

黄祥钊^{1,2} 费奇^{1,2} 欧阳敏¹ 毛子骏¹

(华中科技大学系统工程研究所 武汉 430074)¹

(华中科技大学图像信息处理与智能控制教育部重点实验室 武汉 430074)²

摘要 为实现复杂系统的控制,提出了跨层次仿真的概念和理论框架,其中重点关注了微观个体的自组织集成方式。进一步指出在社会经济系统中,通过建立激励机制来仿真网络系统的整体协调;利用网络工具分析主体交互的自组织聚合,分别从理论和试验应用角度,综述了社会经济系统中主体交互的网络集成,最后对研究存在的问题和未来发展的趋势进行了总结和展望。

关键词 复杂系统, 跨层次仿真, 集成, 网络形成, 涌现

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Survey on Emergence Mechanism of Network Formation for Inter-hierarchy Simulation

HUANG Xiang-zhao^{1,2} FEI Qi^{1,2} OU Yang-min¹ MAO Zi-jun¹

(Institute of Systems Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)¹

(Key Lab. for Image Processing and Intelligent Control, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)²

Abstract In order to achieve the control of complex systems, the paper proposed the concept and the theoretical framework of inter-hierarchy simulation, which focused on the integration of self-organization. Furthermore, it put forward that simulating the whole coordination of network system can come into effect by means of establishing incentive mechanism, and interacting agent can realize self-organization. The paper reviewed the formation of social and economic network from the prospective of theory and practice respectively. Finally, it also offered a conclusion and expectation for the recent problems and future development.

Keywords Complex system, Inter-hierarchy simulation, Integration, Network formation, Emergence

1 引言

1.1 复杂系统的控制

落实科学发展观是一项系统工程,不仅涉及经济社会发展方方面面,而且涉及经济活动、社会活动和自然界的复杂关系,涉及人与经济社会环境、自然环境的相互作用。这就需要采用系统科学的方法来分析、解决问题,从多因素、多层次、多方面入手研究经济社会发展和自然形态、自然形态的大系统。系统科学是从事物的部分与整体、局部与全局以及层次关系的角度来研究客观世界的^[1]。

系统科学是研究复杂系统的性质和演化机制、揭示各种系统在演化过程中遵循的共同规律的现代前沿科学。复杂性科学是系统科学发展的新阶段。系统的复杂性主要表现在^[2]:首先,系统各单元之间的联系广泛而紧密,构成一个网络。因此单一单元的变化都会受到其它单元变化的影响,并会引起其它单元的变化。其次,系统具有多层次、多功能结构,每一层次均成为构筑其上一层次的单元,同时也有助于系统的某一功能的实现。再次,系统在发展过程中能够不断地学习并对其层次结构与功能结构进行重组及完善。第四,系

统是开放的,它与环境有密切的联系,能与环境相互作用,并能不断向更好地适应环境的方向发展变化。第五,系统是动态的,它处于不断发展变化之中,而且系统本身对未来的发展变化也有一定的预测能力。

系统科学中有一条很重要的原理,就是系统结构和系统环境以及它们之间的关联关系决定了系统的整体性和功能。也就是说,系统的整体性与功能是系统结构内部与外部环境综合集成的结果。通过改变系统组成部分或调整组成部分之间、层次结构之间以及与系统环境之间的关联关系,使它们相互协调,从而在整体上涌现出我们满意的和最好的功能,这就是复杂系统控制、干预和组织管理的内涵,也是控制工程、系统工程所要实现的目标^[3]。

1.2 实现跨层次的仿真集成

目前,单个层次上的仿真研究较多,将多个层次的仿真联系起来研究得较少,而且缺乏将微观层仿真向宏观层仿真聚合的系统化方法。当今迫切要实现复杂系统的控制。如何实现呢?这就需要实现集成的跨层次仿真。我们认为跨层次仿真是连接不同层次的仿真,本文指连接微观与宏观的仿真。在真实世界中,“层次”就是指不同的观测尺度,这个尺度可以

到稿日期:2008-04-01 本课题得到国家自然科学基金(60074008, 60574025)和湖北省自然科学基金资助项目(2004ABA055)资助。

黄祥钊 男,博士研究生,主要研究方向为复杂系统与系统网络, E-mail: xiangzhao. h@gmail. com; 费奇 男,博士生导师,主要研究方向为决策支持系统、系统集成技术与方法。

分为空间和时间两个方面。所以,层次也同时具备空间和时间的两层含义。比如细胞、器官、生物体、生态系统等,指的是空间的层次。而另一种层次是时间上的观测尺度,例如一年包含了12个月,一个月包含了30天,等等。世界上一切变化过程都被包含进了不同的时间尺度之中。

协同论^[4]体现了跨层次仿真的思想,而且协同学对于理性系统(激光系统等)中宏微观的连接做了很好的解释。因协同学研究的是由大量组分构成的系统宏观行为,故引入的序参量是宏观参量,用于描述系统的整体行为;而且序参量是微观子系统集体运动的产物、合作效应的表征和度量;序参量支配子系统的行为,主宰着系统演化过程。哈肯的协同学沟通了从微观到宏观的通路,使系统在宏观上表现出来的规律能和微观上的运动联系起来。但是从目前的情况来看,哈肯研究的系统特性仍属于“简单巨系统”的范畴。对于相互作用的大量具有认知与决断能力的微观个体所形成的复杂系统与网络,协同学遇到了根本性的困难。对于这样的复杂系统,急需发展宏微观层间连接的行为仿真实理论与方法。

跨层次仿真的研究目的在于建立不同仿真层次的仿真模型之间的有机联系,形成宏观层仿真指导微观层仿真、微观层仿真支持宏观层仿真的协调有序的仿真评估活动。在复杂的社会经济系统中,对于复杂系统的控制,如何进行微观与宏观层次中的连接仿真,有重要的理论意义和现实意义。跨层次仿真能够真实再现微观行为的宏观表现;反之,对于宏观特性能够解释微观个体的动机和相互作用关系。其次,可以解释宏观政策怎样影响微观决断与行为。跨层次仿真对于新技术的推广、创新网络的形成、交易网络的小世界性质及探寻产业的发展规律,进一步地对于决策的形成、政策的实施等由微观网络拓扑连接关系所带来的宏观经济发展演化过程有现实的指导意义。

2 跨层次仿真的理论框架

20世纪90年代,美国圣菲研究所提出的复杂适应系统(Complex Adaptive System, CAS)理论成为当代复杂性科学的理论基础,它能够描述由于个体的微小适应性变化而引起系统整体进化的系统。其基本思想可以这样概括:系统中的成员称为具有适应和学习能力的主体,简称为主体。所谓具有适应性,就是指它能够与环境以及其它主体进行交互作用。主体在这种持续不断的交互作用的过程中,不断地“学习”或“积累经验”,并根据学到的经验改变自身的结构和行为方式。整个宏观系统的演化,包含新层次的产生、分化和多样性的出现,新的、经聚合而成的更大的主体的出现等等,都是在这个基础上逐步派生出来的。这涉及到基于Agent的建模方法和个体的认知与决断。

以上也表明一切事物都是相互作用和相互交互的表现。如果我们将系统内部的各个元素(作用体)抽象为节点,元素之间的关系(作用)抽象为连接边,那么系统就构成了一个网络结构。结构决定功能是系统科学的基本观点,而网络的形成和演化机制决定网络的结构,因此研究网络结构的演化动力学则是系统科学的研究重点之一。

微观主体之间的拓扑连接关系决定网络系统涌现特征的内生机制。复杂网络研究关注个体之间的微观相互作用导致的系统宏观现象,强调系统的结构并从结构角度分析系统的

功能,正是复杂网络的研究思路,最终目的是通过研究结构来了解和解释基于这些网络之上的系统运作方式,进而预测和控制网络系统的集成行为。这种将系统行为作为一个整体的研究方式不受传统还原论方法的限制,从而能够预言复杂系统丰富的整体行为,包括自组织特性、涌现等。

对于复杂的社会经济网络系统,宏微观层次内的动力学仿真理论与方法已快速发展,然而层间连接的行为仿真成为其发展的瓶颈;因此,基于上述理论与方法,我们提出跨层次仿真实理论框架,如图1所示。上层(宏观)为均衡机制仿真及激励因素选择,主要是对宏观层次的均衡机制的建模与仿真,其中激励因素是指宏观政策等;下层(微观)为受激行为聚变仿真及观测指标发现,主要是对微观层次的分散自主个体的行为仿真,其中观测指标是指个体交互所涌现的观测量。

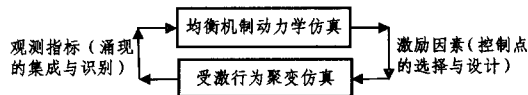


图1 跨层次仿真实理论框架

首先上层对下层的作用是通过给下层参与者以激励,使得参与者在追求个人利益的同时也达到宏观政策所设定的整体目标。同时,在激励因素的约束下,使得下层个体的相互作用产生自组织的集聚行为,正是个体的相互作用和不断适应过程,使得个体向不同方向发展变化。在下层产生自组织集成后,需要设计指标来统计和评估集成效果,并反馈到上层,作为调整政策的依据。而且,上层用指标进行宏观政策的系统动力学仿真,以此评估政策。

跨层次仿真的难点在于下层受激个体的自组织集聚行为,即下层仿真实向上层仿真实的聚合机制。拟采用网络工具分析主体交互的自组织聚合,在表现形式上,研究社会经济系统中主体交互的网络集成,即社会经济网络的形成,以期对实现跨层次仿真实做一些探索。以下我们从理论和仿真实试验两方面来阐述这方面的进展。

3 社会经济网络形成的理论与应用分析

3.1 理论

从个体成本收益等动力来刻画网络形成是理论研究的主要方面。Jackson和Wolinsky^[5]首先引入了网络的稳定性和有效性的概念,将网络的形成看作经济活动参与者理性决策行为的结果,从而认为经济网络的形成是经济活动的内生过程,这样能采用类似于Nash均衡的分析方法作为网络形成过程建模的出发点。他们将价值函数直接定义在网络上,提出的主要问题是效率与稳定性之间的冲突。而不同的网络结构会产生不同的外部效应,对网络的稳定性产生不同的影响。基于所提出的联结模型(Connection Model),行为主体由所有的直接和间接联结获得收益。间接联结可获得的收益小于直接联结的收益,但维护直接联结需要付出成本。对称型联结模型中强有效的网络有3种类型:一是完全网络,对于成本充分低于收益的网络,所有可能的直接联结都会形成;二是空网络,对于成本大大高于收益的网络,没有关系可以联结;三是星型网络,星型结构可以看作是网络结构中最简单的层级形式,在这种结构下,通过与其他人的间接联系获得好处的网络参与者人数达到了最多,而形成和维持这些联系的成本最小。

Bala 和 Goyal^[6]则从个人动机角度研究了网络的形成,所提模型与 Jackson 和 Wolinsky 的联结模型相似,即主体从连接到的其他主体得到收益并且为了维持直接连接而付出成本。但他们采取单边非合作(只要一方承担某些成本就可以建立与其他方的联系)的网络形成途径,并区分了收益在两个参与者之间的单向流动和双向流动。

有些文献关注有地理成本的连接模型。Carayol 和 Roux^[7]的模型中主体的连接成本与距离成正比,模型在局部比例上产生了更高的连接率,并且由于间接收益主体维持一些远距离的连接,因而有“小世界”特性。事实上,研究显示在某些情况下,成对稳定网络具有小世界特性。通过仿真显示至少有一个参数化的变化,使随机稳定趋向于选择小世界网络。Galeotti, Goyal 和 Kamphorst^[8]构建了更一般的地理成本结构,主要考虑由于距离收益慢慢衰减,以至于任何均衡网络都是最小化连接。因为最小化连接网络无聚集,所以衰减是此模型的中心特性并且集聚是涌现网络的一个很重要的方面。

通过主体的交互机制,研究自组织涌现宏观特性,得到了一定的重视和研究。Fagiolo^[9]等对经济学中个体交互网络进行了探讨,研究了系统的集体行为和基于少数者博弈的局部交互,其中交互主体即是有向图的节点,它们利用眼前的最佳回报规则来选择下一周期的状态。仿真显示:当主体给连接边以权值但不能替换时,系统自组织成有高回报值的网络集聚系数,但不稳定而且很容易中断使得随后的报酬下降;另一方面,如果主体能够抛弃表现差的连接边,系统能迅速地收敛到稳定状态,并且主体能有最高报酬。

Schweitzer^[10]提出了一种多主体方法来建模自组织网络。这种方法是基于在微观水平上的主体交互行为和适合的外部条件,这能导致在宏观水平上整体结构的涌现。在模型中,网络结构的出现,即连接边的自组织形成,是由主体的动力学交互而产生的。主体要同时解决两个不同任务,即在没外有的指导下发现新节点和连接它们到网络中,它们也不得不确保网络的适应性。在任意节点之间的连接网络是基于布朗主体的非线性交互,指出网络形成是建立在反馈过程的动力学本质而不是主体的内在复杂性上。

还有文献引入复杂网络“小世界”特性,研究涌现宏观特性的微观集成机制。Jackson 和 Rogers^[11]研究了网络形成的经济模型,其中主体从间接的关系中受益。文章研究了“小世界”的基于经济的推理,考虑主体连接边会产生成本和利益,然后研究了当主体以自我利益形成边时,将形成怎样的网络。并且分析了主体的成本和利益的变化以确定小世界特性的产生。通过比较两类模型,说明网络结构是怎样由节点交互过程所影响并且怎样由主体的经济动机而形成连接的。Even-Dar 和 Kearns^[12]对于网络形成引入了一个博弈理论模型,这个模型将局部化和长距离连接结合起来。模型中局中人可以以距离为 d 的 d^α 成本购买边,并且希望最小化购买边的总和与它们到其他局中人的平均距离。结果显示有显著的“小世界”阈值现象:对于二维空间,如果 $\alpha < 2$,每个 Nash 均衡导致常数直径的网络;如果 $\alpha > 2$,每个 Nash 均衡的网络直径随着网络大小的根而增长,是无限限制的。

3.2 仿真试验

大多数有关社会经济网络形成的研究主要集中在各特定

市场类型上,如劳工市场、美国劳工市场的职业分配咨询网、马赛市鱼批发市场、电力市场等。这些对特定市场机制的研究,都从特定的角度分析了底层的 Agent 如何由底层个体交互而涌现出复杂网络的两种主要模型,即随机再接模型与生长和择优连接模型。随机再接模型可以使一个局部连接的网络转变为小世界网络,大大缩短了节点之间的平均距离,如社会中人们的接触。生长和择优连接模型中,新加入的节点会根据自己的偏好优先选择某些节点,使得整个复杂网络的节点的度呈幂律分布,如万维网的网页链接、电影演员合作网等。

Tesfatsion^[13]等人把重点放在劳动力市场上^[14]。一个多主体的劳工市场模型用于分析市场结构、雇佣关系、工作行为和福利之间的相互关系。在连续变更预期效用的情况下,工人和雇佣者都以很大的代价来寻求合作者,他们之间形成了类似囚徒困境的博弈关系。随着时间的推移,他们在过去相互作用关系中形成的保证稳定收入的策略不断地演化。Tassie 和 Menczer^[15]构建了一个多主体劳动力市场模型。在这个模型中工人既可直接找工作,又可通过社会联系找工作。研究产生了两个主要结果:首先,自组织后的社会网络具有小世界的特点。具体地说,网络之间不仅具有聚集性(局部结构),同时具有远程的联系。这些特点提高了社会网络代替职业介绍网络的能力。其次,伴随着演化过程,主体最终还是重视直接找工作,以及建立社会关系网络,而不是把精力用于提高社会的效率。这种社会效率的损失与个体的生存时间呈正相关性。

近年来利用多主体仿真模型研究复杂交易网络的也较多。小世界网络^[16]的发现和无标度网络^[17]的研究揭示了社会经济系统中隐含的有趣的规则。复杂网络的研究表明,经济主体的社会交往结构既不是规则的,也不可能是完全随机的网络结构,在很多场合下都应该具有复杂网络的一些统计特征,如小世界效应、高类聚系数或度的幂律分布等。

Wilhite^[18]利用多主体仿真模型研究了不同市场有效性和交易成本之间的交易,分析了在 4 种类型的贸易网络中每个交易者如何寻找合适的交易者,协商价格,并与具有最好交易条件的交易者进行交易。研究结果显示,当相互联系的局部性经济在保持交易成本不变时,小世界贸易网络在产生了完全联系贸易市场所具有的市场有效性几乎全部优势的同时,也保持了几乎与局部交易网络相同的较低的交易成本;同时也表明,存在着促使小世界贸易网络形成的微观层面的诱因,因为用这种网络进行交易的交易者比不用这种网络的交易者往往做得更好。

张江^[19]等人提出了人工经济模型(Artificial Economic Model, AEM)。AEM 是一个计算机中的虚拟经济系统,它具有一个二维网格环境,上面分布了两种不同的资源:糖和香料。Agent 通过自组织的交易会形成整体的交易网络。通过对交易网络的拓扑属性进行统计分析得出结论:交易网络会逐渐朝向无尺度网络的方向发展。这说明,交易网络会通过自组织而涌现出具有更强鲁棒性的网络结构,并且该网络的演化存在正反馈现象,少数节点对交易网络的建设起到了关键作用。

Pujol^[20]等人提出了基于社会交易理论的计算模型,主体在各式各样的人群中搜索有吸引力的交易伙伴。指出由下而

上涌现出复杂交易网络必须满足以下特征:1)网络变化的局部决策由个体 Agent 给出;2)个体 Agent 在有限理性决策基础上优化自己的目标;3)个体 Agent 只能得到局部和不完全的信息;4)系统的整体目标与个体利益之间存在着矛盾,网络中的成员面对着一个社会性的两难困境。计算机仿真显示,涌现的社会网络拓扑结构主要取决于两类条件,即交易博弈的苛刻性和主体的学习能力。进一步的分析指出,不同的条件组合可以涌现出星状、小世界、无标度等网络结构。

还有一些考虑外在政策对个体行为的影响。Weitzel 等^[21]用网络效应市场上个体购买决策的简单模型开发了一个仿真模型。他们的主要结论是网络效应市场的动态性作为多主体的系统不仅依赖于参与者的个人决策,也与个体邻域结构有关。Y. Ikeda^[22]等人构建了一个基于 Agent 交互的企业模型,交互主体(即企业)理性地投资资本和劳动力以最大化企业收益。模型考虑了交易和生产,仿真了在真实交易网络上单个企业的行为,再现了收入、原料成本、资本和劳动力的累积概率分布;并且讨论了在外在冲击的变化下企业的反应。但文中的网络构建是通过公司的交易关系来建立的,而不是通过 Agent 的交互。

结束语 对于复杂系统的控制,跨层次仿真是一个全新的问题。我们提出了跨层次仿真的理论框架,指出跨层次仿真的难点在于下层个体的相互作用如何产生自组织的集聚行为。用网络工具分析主体交互的自组织聚合,在表现形式上,研究社会经济系统中主体交互的网络集成,即社会经济网络的形成,以期对实现跨层次仿真做一些探索。

对于社会经济网络的形成,国内尚未深入研究,所以主要综述了国外的研究成果。我们分别从个体成本收益与网络结构关系、地理成本的连接模型、自组织涌现的主体交互机制、涌现宏观特性的微观机制这 4 个角度阐述了理论方面的研究进展。试验研究又总结了在特定市场类型上宏观特性的涌现、复杂交易网络和外在政策对个体行为的影响这 3 方面的概况。我们认为待进一步研究的问题有:

(1)决策个体的集成功力与整体功能提升、利益需求的均衡分析。因为经济网络的形成不会无止境地生长,个体连接有经济成本的限制,同时交互有一定目的并且产生效益,所以,在微观水平上,个体的成本与效益之间产生冲突。在宏观方面上,经济网络形成的主要问题是效率(也就是价值最大化)和稳定性之间的冲突,即要达到效率与稳定性的平衡。所以,在经济网络的形成过程中,考虑成本、规模与效率之间的冲突是值得研究的问题。

(2)反馈到宏观层次的集成效果评价与激励因素的设计调整。在预设的社会经济政策下,考虑网络个体行为怎样受到政策的影响,对于网络自组织行为趋势做评估,并与激励政策做对比,作为调整政策的实验。这对于决策的形成和政策的实施有重要的实践意义。

可以看出研究社会经济网络的形成正方兴未艾,而且所得结果已经在很大程度上改变和拓展了我们对跨层次仿真的认识。研究主体交互如何自组织涌现出集成效果并反馈到宏观层次,建立激励机制来仿真网络系统的整体协调,必将对跨层次仿真理论,进而对于复杂系统的控制产生重大的促进作用。

- [1] 钱学森. 创建系统学[M]. 太原:山西科学技术出版社,2001
- [2] 成思危. 复杂科学与系统工程[J]. 管理科学学报,1999,2(2): 1-7
- [3] 于景元,周晓纪. 系统科学与系统工程的发展[J]. 复杂系统与复杂性科学,2004,1(3):4-9
- [4] 哈肯(Haken H.). 协同学导论[M]. 徐锡申,等译. 北京:原子能出版社,1984
- [5] Jackson M O, Wolinsky A. A Strategic Model of Social And Economic Networks[J]. Journal of Economic Theory, 1996, 71 (1):44-74
- [6] Bala V, Sanjeev G. A Noncooperative Model of Network Formation[J]. Econometrica, 2000, 68(5):1181-1229
- [7] Carayol N, Pascale R. Collective Innovation in a Model of Network Formation with Preferential Meeting[R]. Université Louis Pasteur and Université de Toulouse I, 2003
- [8] Galeotti A, Sanjeev G, et al. Network Formation with Heterogeneous Players[R]. Tinbergen Institute, 2004
- [9] Fagiolo G, Valente M. Minority Games, Local Interactions, and Endogenous Networks [J]. Computational Economics, 2005, 25(1):41-57
- [10] Schweitzer F. Multi-agent Approach to the Self-organization of Networks[C]// Understanding and Managing Complex Agent-based Dynamical Networks. Singapore: World Scientific, 2007 (forthcoming)
- [11] Jackson M O, Rogers B W. The Economics of Small Worlds[J]. Journal of the European Economic Association, 2005, 3(2):617-627
- [12] Even-Dar E, Kearns M. A Small World Threshold for Economic Network Formation[J]. Advances in Neural Information Processing Systems 19 (NIPS), 2006:385-392
- [13] Tesfatsion K. Handbook of Computational Economics[M]. 1st Edition. Netherlands:North-Holland Imprint, Elsevier, 2006
- [14] Tesfatsion. Structure, behavior, and market power in an evolutionary labor market with adaptive search[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2001, 25(3):419-457
- [15] Tassier M. Emerging small-world referral network in evolutionary labor markets [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2001, 5(5):482-492
- [16] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of "small-world" networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442
- [17] Barabási A-L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439):509-512
- [18] Wilhite A. Bilateral trade and "small-world" networks[J]. Computational Economics, 2001, 18(1):49-64
- [19] 张江. 基于 Agent 的计算经济学建模方法及其关键技术研究[D]. 北京:北京交通大学经济与管理学院, 2006
- [20] Pujol J M, Flache A, Delgado J, et al. How Can Social Networks Ever Become Complex? Modelling the Emergence of Complex Networks from Local Social Exchanges[J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2005, 8(4)
- [21] Weitzel T, Wendt O, Westarp F. Reconsidering Network Effect Theory[C]//Proceedings of the 8th European Conference on Information Systems (ECIS 2000). Vienna, Austria, 2000:484-491
- [22] Ikeda Y, Aoyamab H, Iyetom H, et al. Response of firm agent network to exogenous shock[J]. Physica A, 2007, 382(1): 138-148