

系统适应性层级进化思想研究

张旺君

(华南师范大学 科学技术与社会研究院,系统科学与系统管理研究中心 广东 广州 510006)

摘要:系统的层级进化问题是系统科学研究的核心问题。复杂适应系统理论的进化思想可以概括为适应性层级进化思想,是系统层级进化思想的重要组成部分。适应性层级进化思想体现为适应性主体相互作用的多层级网络,基于主体的模型与模拟适应性进化的遗传算法,以及适应性景观与适应性进化过程。

关键词:复杂适应系统;适应性主体;层级进化;遗传算法;适应性景观

中图分类号:N94-02 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-6408(2021)02-0012-05

系统层级进化问题是系统科学研究的核心问题。根据西蒙、霍兰等学者的观点,复杂性以层级结构存在,层级是复杂性的必要条件^[1-2]。因此,系统层级进化过程就是复杂性不断生成的过程。圣菲研究所是复杂性研究的中心,代表性理论是霍兰创立的复杂适应系统理论。复杂适应系统理论以复杂适应系统为研究对象,以适应性主体为核心概念,以计算建模为主要研究方法,蕴含着丰富的层级进化思想。复杂适应系统是由一类被称为适应性主体的元素组成,这些元素能够彼此互动,具有自组织、学习以及适应能力。适应性主体能够随着时间而不断进化,其特点是:一能“学习”,二会“成长”^[3]。适应性主体通过改进自身结构和行为模式以适应环境。盖尔曼概括了基于信息流的适应性主体的运作模式。适应性主体之间相互适应,通过资源、信息流形成相互依赖相互作用的多层级网络。霍兰用分类器系统为适应性主体建模,并创立了以综合进化论为基础的遗传算法。适应性主体被看成基于规则的信息处理和执行系统,信用分派和规则发现体现了主体适应的能力。遗传算法模拟了主体适应性进化的机制。主体的适应性及其变化的概念可以用适应性景观加以隐喻。适应性主体在由其他主体构成的环境中进化。为了维持生存和发展,适应性主体产生复杂的结构和功能行为。适应性主体不仅在进化,而且在共同进化,形成结构和功能行为的层级系统。概括来讲,复杂适应系统理论的层级进化思想可以

体现为适应性主体相互作用的多层级网络,基于主体的模型与模拟适应性进化的遗传算法,以及适应性景观与适应性进化的过程。

1 适应性主体相互作用的多层级网络

适应性主体是在一定层次上收集有关周围环境以及它自己和自己行为的信息,然后加工与处理这些信息,并向环境输出信息和作用,从而适应环境的行动主体^[4]。适应性主体之间通过资源流、信息流相互作用进化成多层级网络。

1.1 适应性主体相互作用的网络

适应性主体在与环境互动过程中,能够改变自身的内在结构或关系以适应环境。适应性主体通过资源流、信息的交换相互依赖形成相互作用的网络。

适应性主体描述另一个主体(或自身)时,需要构建一个图式,即从所有数据中提炼出表观规律性^[5]。图式提供了描述、预言和(与行为相关的)行为指令的组合,包括支配经验的规则,而忽略使用规则的环境。适应性主体将从现实中获取的经验看作数据集,通常是从输入到输出的数据,其输入包括系统的行为,而输出包括系统对环境的效应。数据流中共同的部分称为交互信息,是规律性的特征。主体可以从数据集辨识出内在的规律性,并将规律性压缩成用来描述和预言新数据流的性质的图式。在现实世界的每一种情形中,都有多种相互竞争的图式。这些相互竞争的图式需要在实践中进行检验,

收稿日期:2020-11-01

作者简介:张旺君(1979-),男,广东五华人,华南师范大学科学技术与社会研究院讲师,哲学博士,研究方向:系统科学哲学。

检验成效或从现实世界中获得的反馈结果将影响到它在与它竞争着的其他图式中的地位。根据适者生存的原理,经过实践的检验,有些图式将被淘汰,有些图式将保存下来,甚至升级。这个反馈回路不断地探测出大量的可能性,开辟出高层次的复杂性^[6]。

适应性主体之间通过资源流、信息流相互依赖形成相互作用的网络。适应性主体的存在能够为其他主体创造小生境。适应性主体的每一次新的适应,都为进一步的相互作用和新的生态位开辟了可能性^[7]。当主体相互适应,开辟了可以被其他主体加以利用的新的生态位时,就产生了多样性。西蒙说,“如果存在着这么一种奔向多样化的趋势,那么就不应将进化理解为一系列占据固定小生境的比赛,...反之,进化使小生境增多。对于多数生物,它们要适应的环境主要是由其他生物构成的。”^[8]多样化的主体通过资源和信号的交换相互依赖,形成相互作用的网络。流的概念可以用来描述适应性主体的相互依赖作用。霍兰说,“参与循环流的主体使得系统能够保留资源。这样保留的资源可以被进一步利用 - 它们将提供新的生态位以便被新的主体所使用。”^[9]

1.2 相互作用网络的层级进化

适应性主体在进化过程中,通常有两种策略,一种变成通才,另一种是形成专业化的主体,由多个专业化主体链接同样拥有通才的功能。按照适者生存的观点,更有效利用有限的生存所需资源的组织就是生存的组织。同等互动与数量的专业化主体的级联比通才有更高的资源利用效率,即有选择优势^[10]。在进化过程中,通常产生一些极端的特征,如达尔文彗星兰花与鹰蛾共同进化产生长达一英尺长的花粉管和一英尺长的喙。这种适应性产生的极端特征通常是相互作用网络产生新变化的来源。当相互作用的网络中产生一个新的变化时,可能会在网络中创造新的路径。新路径与复杂适应系统中原有的路径一起工作,因此,可以在保留原有的路径的同时探索新的路径。如果这个新的路径增加了乘数效应,将会持续存在。新专业化主体的出现将促使越来越多的专业主体的级联出现。

除了开发利用已有的资源外,复杂适应系统还探索大量专业化的相关性。有两种探索相关性的方式,一种是随机探索社区(或子网络)之间的相关性,另一种是通过层级的方式探索社区之间的相关性。社区是适应性主体通过资源和信号的交换相互

作用形成高度局部再循环的子网络。相比随机探索社区的相关性,以积木构建的方式形成多层次网络结构是探索社区之间相关性的主要途径。霍兰说,“社区不是单一的“谁吃谁”的社区,而是被用作构成更大社区的积木。也就是说,联系紧密的社区与其他社区交换一些资源,形成更大、联系较少的社区。通过重复这个过程,很容易形成一个具有多个层次的层级网络。”^[11]西蒙以钟表匠组装钟表为例证明了层级方式进化是自然选择的必然结果。生物学家 R. 罗森也用广义进化论和概率论证明了自然选择决定了系统朝着增加等级层次的方向进化。

2 基于主体的模型与模拟适应性进化的遗传算法

霍兰对主体及其适应性进行了建模,并创立了以综合进化论为基础的遗传算法。基于主体的模型和遗传算法为适应性层级进化的研究提供了科学基础。

2.1 基于主体的模型

适应性主体可以看作是基于规则、具有适应能力的信息处理系统。通过分类器系统可以为适应性主体建模,信用分派和规则发现是主体适应能力的体现^[12]。

适应性主体的执行系统由探测器、IF/THEN 规则和效应器三部分组成,表征某一固定时刻的能力。探测器表征主体从环境中抽取信息的能力。主体要对信息进行筛选、分类,接受有关生存和目的有关的信息。效应器则表征它作用于环境的能力。IF/THEN 规则表征处理信息的能力。主体的规则可以分为三类,分别是用于处理环境信息的规则,来自探测器;用于作用于环境的规则,来自效应器;以及探测器与效应器之间起作用的一系列中间规则。如果把每个规则想象成微主体,每个规则有相应的探测器和效应器,那么每个主体就可以看作是消息处理规则。规则之间的信息输入输出的概念就可以扩展到主体间的相互作用。

信用分派指的是在经验的基础上,修改主体规则信用度或强度的过程。信用分派体现了主体获得经验改变系统行为的能力。信用分派的本质是根据已有经验强化对系统有用的规则,以提高系统预知未来和适应环境的能力。信用分派方法的基础是竞争。霍兰根据交易所拍卖的经济模型建立了一个信用市场,来给创造条件的规则分派信用。由于从环境获得好处使得最终消费者规则的强度变得很高,

它的出价将会很高,因为规则的出价与强度相称。反过来,为最终消费者规则创造条件的供应商规则由于获得更多的收入,强度也会加强。假设主体所有的规则的强度一开始都是相同的,然后主体在适应环境的过程中,随着经验的积累,规则的强度在信用分派机制作用下发生改变,就形成不同适应度的规则。

规则发现则是主体发现和构建新规则以适应环境的机制。规则发现用更好的规则来代替弱规则,使得主体能够实现更高次上的适应。相比随机试错法,积木构建的方式发现规则更有效率,这是因为利用强规则的部分构建新规则的方法是基于以往经验的基础上进行的。强规则可以通过规则的交叉和信用分派来发现。规则共有的部分称为模体,某些强规则共同的模体在某些情况下成为有用的积木。新的模体组合可以通过交叉规则产生,类似通过动物或植物通过杂交获得理想的特性。新产生的规则(积木组合)在信用分派方法下进行检验和验证。如果子代规则有足够的强度(或适应度),将继续杂交。高适应度的积木组合能够带来更高层次上的适应。某一层上经过验证的积木,通过选择性的组合可以成为更高层次的积木。进化过程就是不断创新,在各个层次上生成和选择性的组合积木的过程。

适应性主体通过内部模型来描述、预言世界和规范主体的行为。霍兰所指的内部模型,相当于盖尔曼说的图式。主体的内部模型通过利用备用规则积木来预见环境的未来状态或者过去从未出现过的环境新状态。这些积木是通过中间规则并行性的特征实现的。

2.2 模拟适应性进化的遗传算法

遗传算法是霍兰对综合进化论进行简化、概括和抽象而成的进化算法^[13]。遗传算法模拟了主体适应性进化的机制。

(1) 遗传算法的实施

遗传算法以群体为基础,实施步骤可分为四步: 1) 随机生成染色体串的群体,即是 n 个解决特定问题的试探解的集合。随机生成的染色体串相当于进化论中变异的多样性。2) 求出群体中各个染色体的适应度的值。染色体的适应度的值可通过适应函数或目标函数作用于每个染色体串(或试探解)得到。3) 产生新的染色体群。新染色体群是通过重复进行随机配对、交换(交叉)、突变运算得到。这个过程相当于进化论中的选择过程。4) 进行下一世代的运算。这里的世代更替,即迭代计算。相当

于综合进化论中的遗传。

遗传算法的突变规则类似于规则发现的随机试错法,交换规则类似于积木组合模体的交换过程,选择则类似于对发现的规则进行检验的信用分派过程。对于系统的进化而言,选择、交换、突变规则的反复运用的目的是为了保证主体产生多样性变异,利用计算机快速迭代的运算,使适应性强的后代得以保存,从而实现适应性进化。

(2) 多样性变异和选择

多样性变异通常由突变规则和交换规则实现。这两种规则分别有不同的进化意义。交换规则指的是两个解决方案交换彼此的解决方案的一部分。尽管发生交叉的地方是随机的,但交换的部分的构成不是随机的。交换规则能够使系统很好地保存并组合建构积木,实现自下而上构建良好解决方案。突变被看作避免陷入适应性地形的狭小范围,以一种非建设性的方式搜寻解决方案。然而,突变在进化过程中仍然是必要的,因为突变偶尔也产生新的机会。选择通常由目标函数或适应函数来实现的。在复杂适应系统中,系统通常都是共同进化的,某个系统的适应性取决于组成其环境的其他系统,所以共同适应的系统其目标函数或适应函数是内部产生的。

遗传算法使得进化论推广到一般系统和复杂适应系统,具有普遍的意义。适应性主体间的频率分布通过突变、交叉等过程一代又一代地发生变化。自然选择使得有助于更高适应度的特征和特征组合的主体有更高的生存繁殖能力,并战胜其他主体。

3 适应性景观与适应性进化过程

适应性景观可以隐喻主体适应性及其变化的概念。适应性主体在适应性景观中进化,同时也影响着适应性景观地形的变化。适应性主体通过竞争与合作共同进化,形成结构和功能行为的层级系统。

3.1 在适应性景观中进化

适应性景观概念是由生物学家、群体遗传学创始人 S. 怀特^[14]首先提出,近年来从生物学推广到其他学科领域。所有可能的基因型以及它们的相应的适应性或适合度组成一种适应性景观^[15]。适应性景观可以用三维的状态空间图景来表现,基因型的不同组合构成了二维平面,每个基因型的适应性(或适应度)用相应的高度来表示。适应性变化在三维空间上表现为许多山峰和山谷,构成了一幅崎岖不平的三维的适应性景观。进化总是表现为从较

低的山谷往较高的山峰的爬山运动。在复杂适应系统中,不同的适应性主体适应度及变化也可以用适应性景观来隐喻。任何特定的适应性主体都生活在由其他主体构成的环境中,任何主体都在努力地适应其他适应性主体。一个特定主体的各种活动效用,很大程度上依赖于其他主体提供的、不断变化的情境^[16]。因此,主体在适应性景观中的进化就像是一个寻找山峰的爬山运动。

根据系统中元素或主体非线性相互作用的程度,适应性景观大致可分为平滑的适应性景观和崎岖的适应性景观两类^[17]。复杂适应系统的适应性景观大多处于两者之间。在平滑的适应性景观中,特别是整个适应性景观只有一个山峰时,适应性主体能够很容易地找到局域性的山峰或全局最优的适应度。在崎岖的适应性景观中,有众多高低不一的适应性山峰,山峰和山谷越多,适应性景观的地形就越崎岖。具有有限搜索能力的主体很容易在崎岖的适应性景观地形找到局部最优,一直往上走到局域性的山峰即可,但是要找适应性景观的最高山峰或全局最优则是极其困难的。系统通常停留在一个局域性的山峰或局部最优,而很难达到全局最高峰或全局最优。在这种情况下,给系统一个随机扰动或“噪音”或“涨落”,可以使系统离开局域性的山峰,爬向更高的山峰。

适应性主体及主体组成的适应性景观地形并不是固定不变的,当其他主体的适应性发生改变时,系统的每一个主体和整个系统的适应性景观都会发生变形。当系统中的元素或主体非线性相互作用的增加,适应性景观中的山峰和山谷也会越来越多,从较为平滑的适应性景观向越来越崎岖的适应性景观变化。考夫曼在共同演化的N-K景观模型研究中,指出有机体通过调节自身在适应性景观中进化的同时,也改变了适应性景观的地形,将适应性景观推向适合自然选择的较为平滑的适应性景观^[18]。共同演化的N-K景观模型表明,不但适应主体之间在共同进化,而且由适应性主体以及它们的适应性构成的适应性景观也在进化。

3.2 适应性进化过程

适应性主体及复杂适应系统整体在适应性进化过程中,无论在行为策略还是功能结构趋向层次性。

竞争是适应性进化的重要形式。竞争通常导致进化的军备竞赛,表现为攻击/防御或捕食/被捕食的竞赛。进化的军备竞赛推动适应性主体日益复杂化。譬如:有两个相互竞争的主体的系统中,适应性

主体通过不断改进自身而进化,另一个适应性主体同样针对其他主体改进自身进化,虽然两者都不能获得对对方的持久优势,但两者共同进化,逐渐超越周围的其他适应性主体。由于其他主体(同样在适应过程中日益复杂化)构成的环境日益复杂,为了能够维持生存,系统需要通过增加控制的层次来实现对环境控制。奥林通过“必要的层次定律”解释了功能复杂性的增长,即控制的缺乏可以通过层次的增加来实现对环境控制。竞争不但导致进化的军备竞赛,而且导致合作现象的突现。“囚犯的困境”可以揭示通过竞争而合作的本质。虽然在“囚犯困境”的单次博弈中,背叛是唯一的理性选择。但罗伯特·爱克斯罗德通过多次重复的“囚犯困境”实验证实,合作成才是主体的最优选择^[19]。

由相互适应产生的合作也是进化的重要形式。适应性主体相互适应形成共生结构,共同组成了一个更高层次的系统,实现层级结构上复杂性增加。结构复杂性不但有增加的趋势,还存在自我加强的趋势。在生态系统中,物种的存在通常为其他物种创造小生境。假设一个物种占领了一个空的生态位或小生境,这个物种本身也为其他物种创造了一个小生境,在这个不断相互适应、相互依赖的过程,生态系统的结构越来越复杂。将生态系统推广到复杂适应系统,每出现一个新的主体,就变成一个新的选择器,提供了更多的机会,体现了系统的结构复杂性自我加强的趋势。

适应性层级进化思想是对自组织层级进化思想的重要发展。自组织层级进化思想以理论阐述为主,缺乏对个体进化中的主动性地研究^[20]。与自组织层级进化思想相比,适应性层级进化思想强调个体在进化中的主动性以及以计算建模为主的研究方法。由于计算机模型同时具备理论和实验的特性,因此,计算建模为系统适应性层级进化思想的研究提供了科学基础。

参考文献

- [1][8]西蒙. 人工科学[M]. 武夷山,译. 北京:商务印书馆,1987:170,155.
- [2][10][11]Holland J H. Complexity: a very short introduction[M]. Oxford:Oxford University Press,2014;5,35,70.
- [3]陈禹. 复杂适应系统(CAS)理论及其应用——由来、内容与启示[J]. 系统科学学报,2001,9(4):35-39.
- [4][6][15]颜泽贤,范冬萍,张华夏. 系统科学导论[M]. 北京:人民出版社,2006:377,53,373.
- [5]Gell-Mann M. 夸克与美洲豹[M]. 杨建邺,译. 长沙:湖南科学技术出版社,1997:365.
- [7][9][16]霍兰. 隐秩序[M]. 陈禹,译. 上海:上海科技教育出版社

- 社,2000:29,29,93.
- [12] Holland J H. Hidden order; how adaptation builds complexity[M]. MA: Addison-Wesley, 1995:41-92.
- [13] Holland J H. Genetic algorithms and the optimal allocation of trials [J]. SIAM Journal on Computing, 1973, 2(2):88-105.
- [14] Wright S. The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution[C]//Proceeding of the Sixth International Congress on Genetics. Brooklyn Botanic Garden, 1932:355-366.
- [17] 米勒,佩奇. 复杂适应系统-社会生活计算模型导论[M]. 隆云滔,译. 上海:上海人民出版社,2012:251.
- [18] 考夫曼. 科学新领域的探索[M]. 池里平,蔡勤,译. 湖南:湖南科学技术出版社,2004:253.
- [19] 沃尔德罗普. 复杂:诞生于秩序与混沌边缘的科学[M]. 陈玲,译. 上海:三联书店,1997:368.
- [20] 张旺君. 系统自组织层级进化思想研究[J]. 系统科学学报, 2019, 27(2):29-32, 68.

Thought of Systematic Adaptive Hierarchy Evolution

ZHANG Wang-jun

(Institute for Science, Technology and Society, Center for Systems Science and Systems Management Research, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Hierarchy evolution of system is the core issue of system science research. The evolution thought of complex adaptive system theory can be summarized as adaptive hierarchy evolution thought, which is an important part of hierarchy evolution thought of system. The idea of adaptive hierarchical evolution is embodied in a multi-level network in which adaptive agents interact, an agent-based model and a genetic algorithm that simulates adaptive evolution, and an adaptive landscape and adaptive evolution process.

Key words: complex adaptive system; adaptive agent; hierarchy evolution; genetic algorithm; adaptive landscape



(上接第5页)

System Hierarchy Principle and Its Methodological Value in Organization Management

HUANG Jian FAN Dong-ping

(Institute for Science, Technology and Society, Center for Systems Science and Systems Management Research, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The concept of hierarchy is a basic concept of systems science. The development from general system theory to cybernetics, information theory and even complex adaptive system theory shows that hierarchy is a necessary concept and basis for understanding complexity. System hierarchy principle is an important part of the systems thinking, which can be summarized as: the hierarchy structure of the system is a recursive nested structure composed of interconnected subsystems; The necessary hierarchy is the stable structure of the existence of the system and the main way of system evolution; Systems lacking regulatory capacity can be compensated by adding hierarchy to the organization, but there is a limit to how many hierarchy can be added. System hierarchy principle has been successfully applied in organization management, especially in viable system? model, which has important methodological value.

Key words: the hierarchy; principle of hierarchy; the laws of requisite hierarchy; the viable system model