

论文题目：抽象斑图的复杂巨系统自动建模方法

内容摘要：

关键词分类：

中图分类号：

文献标识码：

作者简介：

基金项目：

1 引言

21 世纪以来，人类社会出现了越来越多的高度“复杂性”问题，归纳文明的崩溃史发现[1]，这些问题会在庞大完备的系统中酝酿、发作，最终在社会无法适应创新的收益递减时，致使复杂性迅速流失和旧社会政治体制和相关文化的衰亡。复杂问题来自各个社会生产生活领域，这些领域都可以共性地抽象为一个开放的复杂巨系统：具有组成元素数量巨大、异质、元素间互作非线性、系统与环境深度交互、系统内部形成一定层次等特征[2]，这使传统建模方法和数理方程解法对复杂巨系统建模的描述力较差或计算耗能巨大，因此为了应对新世纪大量的高复杂性问题，建立新的方法描述、理解和引导控制复杂巨系统是 21 世纪系统工程面临的重要课题。

复杂系统的核心特征是涌现，涌现最早可追溯至古希腊时期亚里士多德认为“整体不等于其部分之和”，现代的涌现观认为涌现是指系统中的单元遵循简单的规则，通过局部的相互作用构成一个整体的时候，系统层面突然诞生某些新的属性和现象的过程[3]。涌现出的新现象表现为斑图，斑图是系统局部单元互作产生的宏观有序结构。斑图广泛存在于多主体系统中，有化学反应斑图、基因网络斑图、生物体表观斑图、社交网络斑图等大量具体形式，理想化一个“多主体系统中涌现的抽象斑图”，并研究其产生、维持、消亡的性质和斑图间互作的模式，对认识现实世界中大量涌现出来的具体复杂巨系统：基因调控系统、生物体系统、大脑系统、社会系统等具有重要意义。

传统上对复杂系统的建模，强调领域专家的经验选择，由专家给出一系列领域内各种理论和观察总结的基本动力学机制。例如对复杂城市的建模就可以通过四条简单的法则[4]：1) 空间吸引。城市的自然资源优势和活跃人口密度越大吸引新人口的力度越大；2) 匹配生长。新入城市的社区如果离当前城市人口过远就难以持续；3) 道路生长。人口密度分布决定道路网密度，并按简单的泰森多边形划分构建路网；4) 社会互动。市民互动沿道路展开，互动密度=人口密度×路网密度，视作城市的经济产出和创新活动，由此观察到复杂城市经济规模的尺度法则。依此思路实践的复杂系统模型还有很多：鸟群模型、SIR 病毒传播模型、Tierra 人工生命模型、糖域模型等等，它们固然对复杂系统的基本属性给出了简单的量化描述方法，但对于复杂巨系统则难以见效，复杂巨系统是跨领域极多、互作量极大的复杂系统，对此传统思路无法给出完备的各领域基本规则，系统中丰富的规律与细节也难以捕捉，所以必须采用一套全新的范式量化处理复杂巨系统。

近年来人工智能与大数据技术的兴起展示了复杂系统建模的全新思路。大数据和深度学习启发了数据驱动（date-driven）的研究方法[5]，在观测复杂系统所得的大量数据中，运用机器学习挖掘模式和捕捉内部斑图、导出系统规则和参数，进而实现复杂系统建模。例如 RNN 可以记忆复杂系统长程关联[6]、Neural ODE 对连续性复杂系统自动建模[7]，该类方法准确度和泛化能力好，对专家依赖性不高；但该方法对演化的适应系统、多尺度的层次系统的自动建模研究较为缺乏[8]。演化性、层次性均为复杂巨系统普遍具有的性质，因此本研究旨在探索自动建模方法在复杂巨系统领域的推广。

2.1 复杂巨系统的层次模型

复杂巨系统表现为纵向上多层复杂系统的重叠和横向上复杂系统的延展，纵向上每一层复杂系统通过作为底层的组成单元大量互作，反复涌现出新的复杂系统层次而不断增厚其“巨”复杂性；横向上复杂系统与外界进行繁复的物质、能量交换，产生巨大的多样性而增广其“巨”复杂性。复杂巨系统的复杂性是

“突现”的，每一层的组分单元在大量互作、形成较高复杂性后，涌现出新的宏观层次，视此为一个“涌现过程”。传统的还原论观点认为对繁复的现象总是可以通过分析其组成要素及其相互作用对隐藏在现象背后的统一模型进行“重建”，描述并理解系统生成的复杂现象。这种观念在层次量级较大的复杂巨系统并不适用，一方面是从某个最低的层次出发描述更高层次的很多层次会出现“指数爆炸”，系统行为的态空间极其巨大而无法收敛，这使简单彻底的还原论无力建模复杂巨系统；另一方面是相邻层次间的涌现过程在抽象的系统意义上具有共性，把握层次和层次生成过程，也即涌现的共性，必然可以大大缩减高层系统的复杂性熵，以较低的描述复杂性对巨系统各个层级进行有效建模。

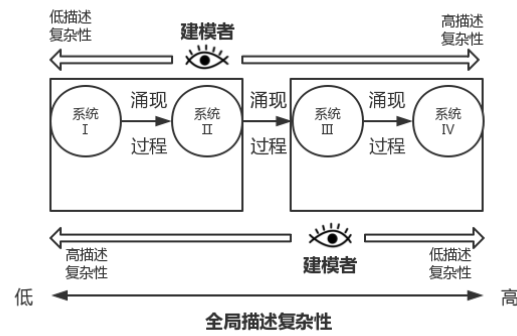


图1 层次系统的描述复杂性示意图

如图1所示，如应用最彻底的还原论建模，从系统I或更低层次展开一层一层地建模，每一新层级系统都需要越来越高的“全局描述复杂性”，模型熵快速增长使模型解难以收敛、容易产生歧义；现抽象一个“建模者”表示基于特定层级的知识体系的模型，建模者可以从所居层级出发建模，降低全局描述所带来的高复杂性熵，例如我们不能从粒子物理模型或分子生物学模型一层层搭建起人类社会行为的知识大厦，但是我们从心理学去理解、阐释社会学模型则是低熵且有效的[9]。

不同的涌现过程是独立且同构的[10]，高层级系统不必拘于低层次系统运行的细节而独立展开本层级的知识体系，可以由本层级或近层级系统知识进行建模，由更低级系统构建本级系统以还原论分解重建的方法为主，由更高级系统构建本级系统以行为学和宏观分析方法为主，本级系统则以分类学进行，该种模式在层次系统链条中同构重复。这是非线性动力系统“窗口效应的表现”，有序诞生于混沌边缘[11]。

若允许“建模者”跳动变换，对于复杂巨系统的模拟必须从多个层面展开。

既然要求对复杂巨系统的模拟，多个模拟层面所用的实现工具要求是相同的，将不同领域的具体模拟内容的不同转换到工具参数的不同选择上。多主体模型（Multi-Agent Model）采用大量基本单元集聚互作产生宏观斑图现象的模拟路径，传统的多主体模型主要采用同质运算、大规模并行的思路，并发生在一定的时空中，而复杂巨系统各领域往往不会采用同一套规则、空间结构时间周期乃至规则行为完全不同，例如反应扩散系统需要发生在三维空间结构中，但社交网络则遵从一套不同的社会关系逻辑。这要求使用异质元胞自动机而非同质元胞自动机来对复杂巨系统进行刻画，不同的领域规则即是不同的非线性函数，主体根据不同的状态展开相异的运算，以在三维空间实现不依赖空间逻辑的规则。

异质多主体模型实质上可以表达为一类特殊的同质多主体模型，斑图自动机（Pattern Automata）。异质多主体模型表述为 $M^* = \{A, S^*, R^*, T\}$ ，同质多主体模型表述为 $M = \{A, S, R, T\}$ 。其中 A (Agent) 为主体集， S (State) 为主体的可能状态集， R (Rule) 为规则， T 表示时间步。多主体模型的“同质”在于其规则与状态组合的单一性：单一规则将不同状态的任意组合都视为影响因素。

$$R(A)|_{\{S^*\}-S, T=0} = R(A)|_{\{S^*\}-S, T=1} = \dots = R(A)|_{\{S^*\}-S, T=\infty}$$

假定多主体模型的状态均为离散状态且只有有限个，对 M^* 有 $\text{Card}(S^*) = N$ ，则 $\text{Card}(P(S^*)) = 2^N$ ，而任意规则 R 均为 $R: \{S^*\} \times \{S^*\} \times \dots \times \{S^*\} \rightarrow \{S^*\}$ 即为状态集一些状态的线性组合到某状态的函数，当状态集各状态的任意组合均有函数可以覆盖时， R^* 与 $P(S^*)$ 呈一一对应，因此 $\text{Card}(R^*) \in (N, 2^N)$ 。

因此斑图自动机可以给出斑图到异质规则的一一对应，斑图自动机可以通过同质多主体模型完备地描

述异质多主体模型。

多领域建模在各领域完备建模时必须要求各领域充分展开相互作用。

规则=模式=大型非线性函数=斑图

参考：

[1].Panicking about societal collapse?Plunder the bookshelves.[J].Nature.

[2].李析.钱学森开放复杂巨系统研究

[3].系统涌现的要素和动力学机制.[J].系统科学学报

[4].Li, R., Dong, L., Zhang, J., Wang, X., Wang, W. X., & Di, Z & Stanley, H. E. (2017). Simple spatial scaling rules behind complex cities. Nature Communications, 8(1), 1841.

[5].Rob Kitchin: Big Data, New Epistemologies and Paradigm Shifts, Big Data & Society, vol. 1 no. 1, 2014, pp. 1–12.

[6].Model-Free Prediction of Large Spatiotemporally Chaotic Systems from Data: A Reservoir Computing ApproachJaideep Pathak,Brian Hunt,Michelle Girvan.et al.physical review letters(2018).

[7].Neural ODE

[8].张江.复杂系统自动建模综述：描述、预测与理论发现

[9].More Is Different

[10].混沌边缘的复杂性探析