文章编号:1001-4098(2017)04-0143-06

一种判定多智能体系统状态更新有序性的方法*

肖 宇[1],韩景倜[2,3],韩小妹[4]

(1. 上海对外经贸大学 统计与信息学院,上海 201620;
2. 上海财经大学 信息管理与工程学院,上海 200433;
3. 上海财经大学 实验中心,上海 200433;
4. 驻上海航天局八〇二所军代室,上海 200090)

摘 要:多智能体模型的构建可分为若干环节,其中状态更新规则往往被设定为同步状态更新规则。然而,现实自然和社会系统中普遍存在的是异步状态更新规则。已有文献发现异步状态更新规则下和同步状态更新规则下的系统动力学过程有着显著区别,但目前尚实证或实验研究探索异步性的性质。为此,基于 Pearson 相关系数定义了状态更新序列间一致性度量指标,然后基于由随机异步状态更新规则产生的序列间一致性频率分布,构建了判定状态更新规则有序性的方法。最后,将所构建方法应用于一组二阶段任务更新实验数据,探索性分析了现实系统的异步状态更新规则性质。结果发现,大部分系统的状态更新规则具有随机有序性。研究结论可帮助理解社会系统动力学过程,同时对多智能体建模具有重要启示。

关键词:多智能体建模;状态更新规则;扩散;社会网络

中图分类号:O231 **文献标识码**:A

1 引言

随着计算能力的大幅提升,多智能模型在流行病学[1,2]、经济学[3]、社会学[4,5]、管理学[6,7]和营销学[8,9]等多个学科领域中得到了广泛应用。多智能体模型是一种由"底"至"顶"的模型,即通过定义个体行为规则、个体间交互和个体决策规则构建起概念模型,然后编码概念模型构建计算模型,最后加总系统中个体状态得到宏观层面结果。然而,其中一个常被忽略的环节为个体状态更新规则的设定。

根据多智能体是否在某一时期内同时更新状态,可将状态更新规则分为同步和异步两类。目前,大部分多智能体建模研究采用了同步状态更新规则,即一个时期内所有智能体于同一时刻更新状态。状态更新规则界定了一个周期内多智能体更新状态的次序,潜在影响着多智能体可获取的信息量,由此提供了状态更改的条件。文献[10]对同步状态更新规则提出了质疑,认为它只适用于少部分自然或社会系统,据此探讨了更新规则异步性对于宏观涌现的影响,最后发现状态更新规则的变化对部分规则下的宏观涌现具有显著影响。文献[11]对异步更新规则进行了更细致研究,认为现实系统中的个体并非完全随机更新状态,而是遵循一定秩序,据此比较分析了不同有序异步更新多智能体模型,也发现不同状态更新规则对系统动力学行为具有显著影响。

根据智能体的状态更新过程是否存在着固定的顺序,又可将状态更新规则分为有序和无序。值得注意的是,有序和同步属于状态更新规则的两个不同维度的概念。有序或无序界定了不同阶段状态更新次序维度的一致性,同步或异步界定了不同阶段状态更新时间维度的一致性。有序更新规则包含了同步更新规则和异步更新规则,有序

* 收稿日期:2015-09-23;修订日期:2015-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71271126);教育部人文社会科学研究规划项目(15YJCZH201);2017 年上海高校青年教师培养计划项目;上海市教育委员会科研创新项目(14YZ134)

作者简介:肖宇(1986-),男,江西宁都人,讲师,博士,研究方向:多智能体建模,新产品扩散,社会网络;韩景倜(1959-),男,陕西西安人,教授,研究方向:多智能体建模,应急管理,大数据和云计算;韩小妹(1979-),女,陕西西安人,工程师,博士,研究方向:应急管理,复杂系统。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

更新规则不一定是同步的，同步更新规则必定是有序的。图 1 列举了三种典型的状态更新规则。其中，图 1(a)为同步更新规则，该规则下的动力学过程中所有节点均在同一时期的同一时刻更新状态。该规则下，所有智能体只参考上一时期邻居发出的信息，目前的大部分多智能体模型该规则。

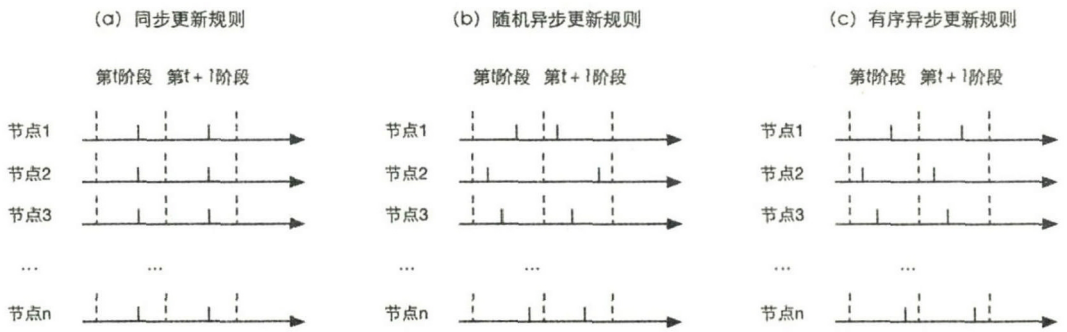

图 1 几种典型的状态更新规则

图 1(b)为随机无序异步更新规则。在该规则下，每一时期所有多智能体都将更新状态，但其状态更新顺序随机确定。这就意味着，同一时期内靠前更新的智能体参考上一时期的邻居信息，而靠后更新的智能体受靠前更新邻居状态变更信息的影响。很直观地，相对同步更新规则，随机无序异步规则下的扩散速度更快。图 1(c)为绝对有序异步更新规则，该规则下，节点 i 和 j 将在同一期内的同一时刻更新状态。值得注意的是，“有序”并不一定是严格如图 1(c)中随时间不变的排他性有序，而是指节点状态更新顺序由一定规则决定。

通常情况下，现实社会经济系统中的状态更新不符合绝对有序或随机无序，而是呈现出随机有序。受随机因素的干扰，不同时期智能体的状态更新次序具有一定程度的扰动，从而表现为系统整体状态更新过程有序性的扰动。目前，尚无文献对这种随机有序性进行深入研究，而仅依据常识建立异步或同步状态更新规则。为此，本章基于相关性构建了状态更新序列间一致性度量，然后在得出其频率分布基础上，提出了一种判定状态更新规则是否具有随机有序性的方法。

2 基于 Pearson 相关系数的状态更新规则随机有序性判定

随机有序状态更新规则下，不同阶段状态更新序列间存在着一致性。因此，可基于不同阶段状态更新规则序列间的一致性，判定是否由随机有序规则“主导”着状态更新次序，具体过程如图 2。

假定网络中有 n 个节点，且所有节点在一个阶段更新一次状态。此外，假定 t 阶段节点更新次序为 $R_t=(r_{1,t},r_{2,t},\ldots,r_{n,t})$，节点的更新次序具有排它性，即 $r_{i,t}$ 取自 $\{1,2,\ldots,n\}$。据此，可得到网络中 a 和 b 阶段状态更新序列之间的相关系数为：

$$O(a,b)=\frac{\mathrm{cov}(R_a,R_b)}{\sqrt{D(R_a)}\ \sqrt{D(R_b)}} \tag{1}$$

显然，$O(a,b)$ 越大，两个阶段状态更新次序越一致。序列 $\{1,2,\ldots,n\}$ 的可能排列总数量由 n 决定。随着 n 的增大，排列总数量将增大，$O(a,b)$ 的可能取值数量也将增大。

为区分随机异步状态更新规则和随机有序状态更新规则，需根据 $O(a,b)$ 的取值构建判定方法。然而，如上所述，$O(a,b)$ 的可能取值数量由 n 决定，因此不能仅以该值的绝对大小作为区分标准。本文认为应基于随机异步状态更新规则判断特定状态更新序列之间的随机有序性。设定原假设为“随机状态更新规则”，备择假设为“随机有序状态更新规则”。与 p 值检验原理类似，可通过拒绝原假设来判定更新规则为“随机有序”。然而，与该原理不同，由于缺乏足够多的序列，本文假定由原假设生成一个概率分布，在此基础上得到特定序列一致性的概率值，最后通过概率值大小决定是否拒绝原假设。

具体而言，随机状态更新规则下，给定 R_a 后，R_b 由 $\{1,2,\ldots,n\}$ 完全随机排序得出。据此，计算 R_a 与完全排列空间中所有（$n!$ 个）排列对应的 $O(a,\cdot)$ 之后，统计得出 $O(a,\cdot)$ 的频率分布 $P(O)$。最后，结合给定两个状态更新序列 R_a 和 R_b 的一致性指标 $O(a,b)$，判断它们在随机状态更新规则下出现的可能性：

$$\Pi(a,b)=\begin{cases}F(O(a,b)), & O(a,b)<0\\ 1-F(O(a,b)), & O(a,b)>0\end{cases} \tag{2}$$

其中 $F(O)$ 为累积频率分布。显然，如果序列 R_a 和 R_b 间越一致，则 $O(a,b)$ 的值越大（且大于 0），对应 $F(O)$ 的取值也越大，从而 $\Pi(a,b)$ 的取值很小，即随机状态更新规则下出现 R_b 的可能性很小；如果两个序列之间的越不一致，则 $O(a,b)$ 的值越小（且小于 0），对应 $F(O)$ 取值越小，从而随机状态更新规则下出现 R_b 的可能性越小。因此，从定性角度看，可基于 $\Pi(\cdot)$ 构建状态更新规则的判定标准。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

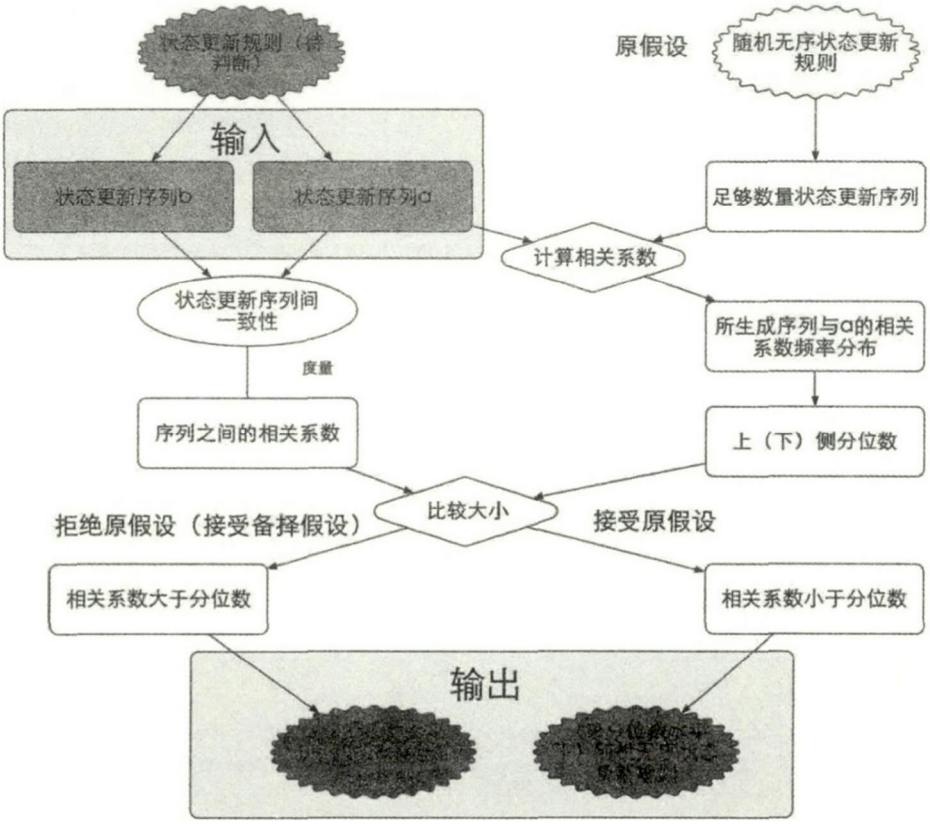

图 2　序列间随机有序性判定过程

如图 3 所示，随着序列长度 n 由 5 增大至 10，频率分布将逐渐变得平滑。随着 $O(a,b)$ 的增大，对应的频率首先增大，然后变小。也就意味着，如果序列间的一致性越高，随机情况下取得该值的可能性越小。据此，可基于上下百分位点设立评判序列间一致性的标准，进而对它们的状态更新规则做出定性判断。

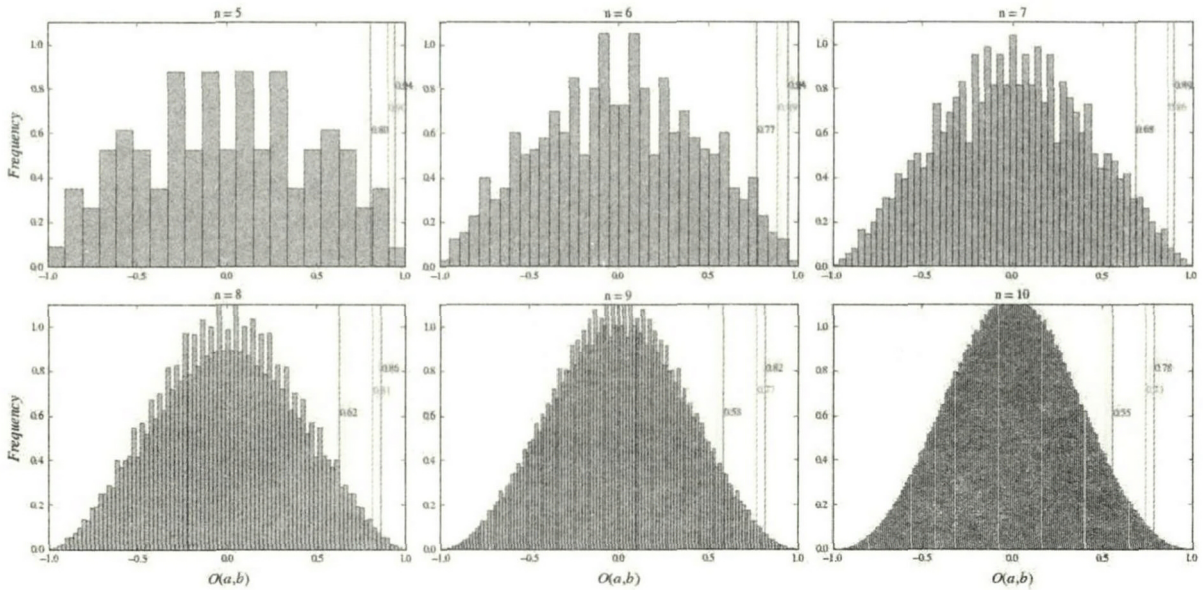

图 3　相关性频率分布图

从理论上讲，可以通过枚举法得出 $n!$ 个 $O(a,b)$ 值得到精确频率分布。然而，随着 n 的增大，该操作方法将耗费大量计算量。因此在实际操作中，当 n 很大时，采用随机抽样方法近似 $O(a,b)$ 的频率分布。随机抽样评估方法也广泛用于指数随机图模型显著性的检验，其基本原理是在足够多次重复实现特定参数组合下的指数随机模

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

型之后，得出所生成图的关键指标抽样分布，进而判断参数估计值的显著性。基于类似原理，根据待评估序列的长度随机生成足够数量的排列，然后求得它们与基准排列（由 1 至 n 的升序排列）的相关性，并得出抽样概率分布。在该抽样频率分布基础上，可以判定状态更新规则的性质。

为了检验该抽样方法的有效性，取 $n = 50$，并进行 1000000 次随机抽样，最后得到 1000000 个相关系数。然后从中随机抽取出一定数量的样本，得到该数量下的下侧 0.005、0.01 和 0.05 分位数，重复该过程 50 次，从而得到关于三个上侧分位数的随机统计量，具体见图 3。表 1 为由两个数量不同的样本得出的分位数之间的相对误差，从中可看出，随着样本数量的增大，三个分位数值均将减小，但其减小幅度也将减小。由此可以推断，随着样本数量的逐渐增大，所生成的一致性指标的频率分布将逐渐收敛至真实值。当样本量足够大时，相邻数量级之间的相对误差将变得非常小。因此，抽取足够大的样本以判断序列间一致性出现的随机性是合适的。

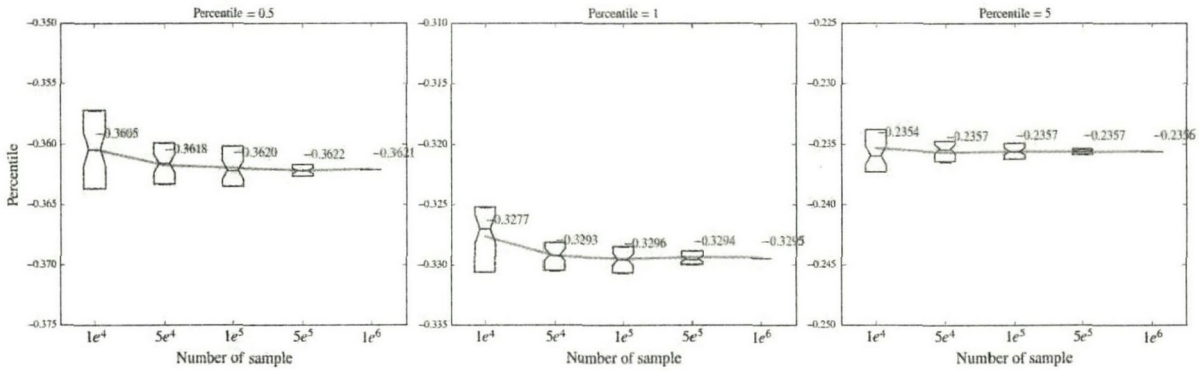

图 4 下侧分位数平均值随抽样数量的变化

表 1 两个不同数量样本得出的分位数之间的相对误差

两个样本的个体数	相对误差		
	下侧 0.005 分位数	下侧 0.01 分位数	下侧 0.05 分位数
5.0E04，1.0E04	3.6E－03	4.9E－03	1.1E－03
1.0E05，5.0E04	6.7E－04	7.2E－04	2.0E－04
5.0E05，1.0E05	5.5E－04	3.9E－04	1.2E－04
1.0E06，5.0E05	3.0E－04	9.3E－05	1.9E－04

3 实验设计与数据收集

社会系统动力学过程的复杂性和隐藏性加大了采集一手数据用于验证判别方法的困难。此外，用于评估一致性的数据集还要求完备性，即两个时期内，社会系统中的所有个体都应更新状态。针对于此，本研究设计一个包含二阶段任务的实验情景，收集一手数据用于探索典型社会系统中状态更新规则的性质。

为验证不同阶段间社会成员状态更新序列是否存在着一致性，设计了两份内容基本一致问卷，问卷包含了问卷填写者的姓名和年龄。问卷面向某一乡村中学所有在校学生发放，并现场回收问卷。该校共有 12 个班级，每个班级约有 50 位学生。两份问卷分别于 2014 年 10 月下旬和 2015 年 1 月上旬发放，因此可认为这两次测试是相互独立的。所有的调查中，研究者均参与问卷的发放和回收，并且严格按照问卷提交的先后顺序依次对问卷进行编号。调研过程中，最先提交的问卷编码为 1，以此类推，直至对所有回收问卷编码。据此，通过两次问卷调研，可得到每一个班级的两个问卷提交序列。最后，可通过被调查者姓名确定两个序列之间的关系。

通过对问卷发放、填写和回收等环节的观察，发现在问卷填写过程中，学生之间存在着多种形式的交互。问卷发放过程中，靠前排位置的学生可更早拿到问卷，从而有可能更早提交问卷。问卷填写过程中，一些学生能迅速理解题目内容并迅速完成问卷，一些学生对某些问题不确定而花费较长时间才能完成问卷。问卷填写完成之后，部分学生马上提交问卷，而部分学生则等待与其他学生一起提交。由此可见，问卷填写到问卷回收环节中有着影响最终问卷提交顺序的诸多因素。这些因素包含了个体特质、能力、性格和个体所处的物理位置等。类似的情景也常见于日常生活和工作中。因此，本章收集的数据可作为社会系统动力学行为的代表案例。

4 结果分析

根据各班级人数生成序列一致性频率分布图。具体

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而言，对应于不同班级人数，随机生成 1000000 个序列。然后，计算这些随机序列与前一阶段问卷提交序列的一致性。最后，统计得出一致性的频率分布和具体频率分布对应的上侧分位数表，具体结果见表 2。基于式(1)可计算得到 12 个班级前后两次问卷提交次序的相关系数，具体结果见表 3。从中可以看出，除了六年级(1)班外，所有序列前后之间的状态更新都具有一定程度的一致性。而从年级平均相关性系数值可以看出，随着年级的增大，一致性也将增强，即前后两次状态更新之间呈现出有序性。

表 2　序列一致性百分位表

序列长度	上侧 0.005 分位数	上侧 0.01 分位数	上侧 0.05 分位数
34	0.439	0.400	0.287
36	0.427	0.388	0.279
42	0.396	0.359	0.257
47	0.373	0.339	0.243
49	0.367	0.332	0.237
51	0.359	0.326	0.233
53	0.352	0.320	0.229
57	0.339	0.308	0.220
60	0.332	0.300	0.214
65	0.319	0.289	0.206

表 3　状态更新一致性度量

年级	六年级			七年级			八年级			九年级		
班级	1 班	2 班	3 班	1 班	2 班	3 班	1 班	2 班	3 班	1 班	2 班	3 班
人数	42	51	49	65	49	53	60	57	57	47	34	36
一致性	0.002	0.285	0.145	0.406	0.138	0.450	0.361	0.288	0.495	0.217	0.562	0.572
平均	0.144			0.332			0.381			0.45		
Π	0.588	0.044 *	0.319	0.001 ***	0.342	0.001 ***	0.004 ***	0.03 *	0.001 ***	0.142	0.001 ***	0.001 ***

注：* 表示在 0.05 水平下为随机有序更新规则，** 表示在 0.01 水平下为随机有序更新规则，*** 表示在 0.005 水平下为随机有序更新规则。

此外，通过对比表 2 中各序列长度下的百分位表可以知道，七年级(1)和(3)班，八年级(1)和(3)班，九年级(2)和(3)班的前后两次更新均在 0.005 水平下一致；六年级(2)班和八年级(2)班在 0.05 水平下一致；六年级(1)和(3)班，七年级(2)班和九年级(1)班均不能在 0.05 水平下拒绝随机规则下产生两次序列的假设。由此可看出，随着年级的增大，随机规则下产生序列的可能性趋于减小。当然，这仅是初步分析结果，若想继续研究得出影响状态更新序列间相关性系数大小及其显著性的因素，还需深入分析目标群体特性和收取更多样本。然后，通过构建恰当的统计模型，判断它们与状态更新序列间相关系数是否存在显著影响关系。

5　结论

多智能体模型中的状态更新规则往往被设置为同步状态更新规则，然而大部分现实系统服从随机异步状态更新规则。本文系统研究了多智能体模型的异步状态更新机制，基于序列之间的相关性为基础定义了序列间一致性度量。利用随机抽样方法生成频率分布图，在此基础上判断状态更新规则的性质。然后，设计了一个二阶段的行为实验，将不同阶段中个体任务完成顺序作为状态更新的次序。基于所构建的方法发现，部分系统中的状态更新顺序呈现出随机有序性，但也有部分系统程序随机无序性；此外，初步对比不同系统之间平均年龄的异同发现，系统状态更新序列间相关系数值随着群体平均年龄的增加而增

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

大。这些结论可为多智能体模型状态更新规则的设定提供一定参考。

未来研究可收集更大样本量,以及提取系统关键特征,进而构建统计模型探索系统关键特征和状态更新规则之间的关系。

参考文献:

[1] Rahmandad H, Sterman J. Heterogeneity and network structure in the dynamics of diffusion: Comparing agent-based and differential equation models [J]. Management Science, 200854(5): 998～1014.

[2] Barnes S, Golden B, Wasil E. MRSA transmission reduction using agent-based modeling and simulation [J]. INFORMS Journal on Computing, 2010, 22(4): 635～646.

[3] Bramoullé Y. Anti-coordination and social interactions [J]. Games and Economic Behavior, 2007, 58(1): 30～49.

[4] Watts D J, Dodds P S. Influentials, networks and public opinion formation [J]. Journal of Consumer Research, 200734(4): 441～458.

[5] Deffuant G, Huet S, Amblard F. An individual-based model of innovation [J]. American Journal of Sociology, 2005, 110(4): 1～31.

[6] Hanaki N, Peterhansl A, Dodds P S, Watts D J. Cooperation in evolving social networks [J]. Management Science, 2007, 53(7): 1036～50.

[7] Trusov M, et al. Improving prelaunch diffusion forecasts: Using synthetic networks as simulated priors [J]. Journal of Marketing Research, 2013, L(December): 675～690.

[8] Garber T, Goldenberg J, Libai B, Muller E. From density to destiny: Using spatial dimension of sales data for early prediction of new product success [J]. Marketing Science, 2004, 23(3): 419～428.

[9] Goldenberg J, Libai B, Muller E. The chilling effects of network externalities [J]. International Journal of Research in Marketing, 2010, 27(1): 4～15.

[10] Fates, A. Nazim, Michel Morvan. An experimental study of robustness to asynchronism for elementary cellular automata [J]. 2005, (16): 1～27.

[11] Cornforth D, et al. Ordered asynchronous processes in multi-agent systems [J]. Physica D, 2004, 204: 70～82.

A Method for Discriminating the Random Ordering of Asynchronous State Update Rule of Multi-agent System

XIAO Yu[1], HAN Jing-ti[2,3], HAN Xiao-mei[4]

(1. School of Business Information, Shanghai University of International Business and Economics, Shanghai 201620, China;
2. School of Information Management and Engineering, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China;
3. Experiment Center, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China;
4. Military Representative Office at 802 Institute of Shanghai Space Agent, Shanghai 200090, China)

Abstract: The construction of multi-agent-based model consists of several components, in which the state update rule is mostly set as synchronous. In real life, however, a great portion of natural and social systems follow asynchronous state update rules. Furthermore, a few studies have revealed that the pattern of dynamics under different state update rules might be totally different. Which emphasizes the importance of discriminating or deducing the properties of state update rule that is not explored in exist literature. This paper defines an index for depicting the ordering between two sequences by using Pearson correlation coefficient, and develops a method for discriminating the property of state update rule based on the distribution of this index. A two-stage state update experiment is designed to generate the state update sequences. These sequences are analyzed by the proposed discriminating method, and thus their orderings of state update rule are revealed. The result shows that state update rule in most social systems are random ordering. This finding would help understand the dynamics of social systems, and also enlighten agent－based modeling.

Key words: Multi-agent-based Model; State Update Rule; Diffusion; Social Network

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net