

国际贸易网络中的靴襻渗流模型

任素婷^{1,3}, 崔雪锋², 樊瑛¹

(1. 北京师范大学系统科学学院 北京 海淀区 100875; 2. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院 北京 海淀区 100875;
3. 北京石油学院附属中学 北京 海淀区 100083)

【摘要】根据国际贸易网络的特点, 提出基于该网络的靴襻渗流基本模型, 模拟危机传播的级联过程。进而得到两个一般模型: 比例模型和GDP模型。接着探究危机具体传播过程, 根据影响方式不同, 将受影响的国家进行分类。模拟结果表明, 大部分源国家的危机传播范围随阈值 Ω 呈现出相变现象, 比较各源国家相变现象的 Ω 值大小可得到相应的危机影响力。针对给定参数 Ω , 探讨模型的具体传播过程和影响程度。结果反映出模型的合理性, 为危机传播预测和过程探讨提供参考。

关键词 靴襻渗流; 复杂网络; 计算机模拟; 危机传播; 国际贸易

中图分类号 TP311.1; N949; F740

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2015.02.003

Bootstrap Percolation Model in International Trade Network

REN Su-ting^{1,3}, CUI Xue-feng², and FAN Ying¹

(1. School of Systems Science, Beijing Normal University Haidian Beijing 100875;

2. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University Haidian Beijing 100875;

3. The Middle School Attached to Beijing College of Petroleum Haidian Beijing 100083)

Abstract Based on the features of international trade network, this paper proposes a basic model of bootstrap percolation to simulate cascading process of crisis propagation. Two general models, proportion model and GDP model, are derived from the basic model. According to different transmission modes, the affected countries are classified into four types and specific propagation processes are explored. Simulation results show that the vast majority of affected countries occur phase transition phenomenon with the threshold Ω . Comparing the threshold Ω in phase transition point of different sources countries, we can obtain their relative crisis consequences. For a given parameter Ω , we discuss the specific transmission and their scope. Results reflect the rationality of this model.

Key words bootstrap percolation; complex networks; computer simulation; crisis propagation; international trade

20世纪中叶以来, 随着经济全球化持续发展, 国家之间的经济联系不断增加, 这使得人们可以从复杂网络的角度研究世界贸易系统。同时, 国际贸易系统的网络结构也是一把双刃剑, 它不仅缩短了世界各国贸易的“距离”, 还更容易将局部危机扩散至更大范围^[1]。一国的经济贸易危机不再是局部问题, 它有可能通过国家之间的网络联系不断地被“放大”, 甚至波及到世界范围。这种危机传播的级联过程可以通过复杂网络的靴襻渗流模型进行较好地描述。根据国际贸易网络的具体特点, 本文提出适用于该网络的靴襻渗流基本模型和一般模型, 并对模型进行进一步探讨。结果表明该模型能较好地

模拟国家的危机传播过程, 为危机传播过程分析和传播预测提供参考。

1 复杂网络中的靴襻渗流模型

在研究网络传播过程的诸多模型中, 常被用于描述病毒传播、信息(谣言)传播的模型为传染病模型(如SIR模型或SIS模型)。但是, 贸易危机在国家之间的传播过程不是通过概率决定的, 而是当危机的影响超过了一定条件时, 国家才会受到影响, 这种传播模式可以通过靴襻渗流模型描述。靴襻渗流模型起源于统计物理学中研究磁铁因非磁性杂质导致磁有序降低并最终消失的现象^[2], 随后该模型被广泛

收稿日期: 2014-02-07; 修回日期: 2015-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(61174150); 教育部新世纪人才资助项目(NCET-09-0228); 教育部博士点基金项目——博导类(20110003110027); 国家973计划资助(2011CB952001)

作者简介: 任素婷(1989-), 女, 硕士生, 主要从事国际贸易网络方面的研究。

地应用于物理、生物和信息技术领域^[3-11], 并由网络研究拓展到随机规则图^[12-13]、树形结构^[14-16]和各种形式网络^[17-23]的研究。该模型是探索复杂性问题的常用模型, 有助于理解现实中的各种复杂现象。随着复杂网络理论的发展, 靴襻渗流模型被推广至无向、稀疏、无关联的随机网络中^[18], 随后学者将研究扩展到幂律分布随机网^[20]、二分网络^[21]、具有社团结构的网络^[22]和空间结构网络中^[23]。其中, 单顶点网络中的靴襻渗流模型描述如下: 在给定分布的网络中, 节点具有active和inactive两种状态; 初始时刻($t=0$), 所有节点状态均为inactive; 以概率 f 赋予节点状态为active; 在每一时刻 t 对状态为inactive的节点进行计算, 若其周围邻居个数超过 Ω , 则该节点下一时刻状态被激活为active; 重复上述过程, 直至没有active状态节点出现为止, 记最终处于active状态节点数占总节点数的比例为Sa。其中, f 称为初始活跃比例, Sa称为最终活跃比例, Ω 为阈值。该模型的研究主要关注网络在上述参数变化中呈现出的相变现象及其在网络结构上的表现。

2 国际贸易网络中的靴襻渗流模型

2.1 基本模型

国际贸易系统可以描述为将国家看作节点, 国家间贸易出口关系作为有向边的复杂网络。由于国际贸易网络是加权、有向的网络, 具有特殊结构, 因此本文提出了国际贸易网络靴襻渗流模型的基本模型如下:

1) 模型初始化。给定网络中节点(国家)具有两个状态: 正常状态(normal, 记作 N)和不正常状态(abnormal, 记作 A)。所有节点(国家)初始均为 N 状态。 N 状态节点(国家)一旦受到危机影响, 其状态在下一时刻会变成 A 状态。

2) 初始时刻($t=0$), 将节点(国家) i 的状态由 N_i 变为 A_i , 意味着危机传播的源头是节点(国家) i 。

3) t 时刻, 对于每一个 N 状态的节点(国家) j , 判断其受影响的程度 W_j , 以及该节点(国家)能够承受的范围(抵御危机的能力) C_j , 如果:

$$W_j \geq \Omega C_j \tag{1}$$

则该节点(国家)下一时刻状态由 N_j 变为 A_j 。

4) 重复过程3), 直至不再有 A 状态节点(国家)出现为止。记最终时刻 A 状态节点(国家)总数占所有节点总数的比例为Sa, 到达最终状态的时间为 T 。

该模型将网络中的节点(国家)看成是异质的。在给定的 Ω 下, 每个国家受危机影响的程度不同, 抵

御能力不同, 最终的影响程度也会不同。同样的, 由于网络的结构不同, 最终受影响的情况也会有所差异。

2.2 两种具体模型

在国际贸易网络中, 国家 j 受影响的程度可以用受影响的边权的总和, 即受影响的进口贸易总额来衡量, 则 W_j 表示为: $W_j = \sum_A \tilde{W}_{Aj}$, 其中, A 表示节点(国家) j 的非正常邻居, \tilde{W}_{Aj} 表示由不正常邻居到节点(国家) j 的进口额。对于不同的抵御能力指标 C_j 的选取, 会得到不同的具体渗流模型。本文提出两个相对简单的具体模型。

模型一: 比例模型。

该模型记指标 C_j 为节点(国家) j 的边权总和, 即总进口额。则式(1)可以表示为:

$$\frac{\sum W_{Aj}}{\sum_k W_{kj}} \geq \Omega \tag{2}$$

上式表示若节点(国家) j 所有不正常状态邻居的进口占总进口的比重超过给定阈值 Ω , 则该节点(国家)下一时刻变为不正常状态。

模型二: GDP模型。

GDP作为反映一个国家经济实力的指标, 在一定程度上可以表示国家抵御危机影响的能力。因此, 记指标 C_j 为节点(国家) j 的GDP, 则式(1)可表示为:

$$\frac{\sum W_{Aj}}{\text{GDP}_j} \geq \Omega \tag{3}$$

该式子表示若节点(国家) j 所有不正常状态邻居的进口占该国GDP的比重超过给定阈值 Ω , 则该节点(国家)下一时刻变为不正常状态。

3 模型的进一步讨论

3.1 具体传播过程的讨论

危机在网络中的传播过程不同, 造成的影响是有差异的。对传播过程的细致探讨有助于理解和预测危机传播的进程, 定量衡量影响的危害。根据危机在网络中传播过程的不同, 可以将国家分为4个类别^[24]。

1) 一步直接影响国家: 仅危机的源国家就能影响的国家。

2) 多步直接影响国家: 只由一个直接影响国家影响的国家。多步直接影响可以描述为危机由源国家开始传播的链式影响。

3) 间接影响国家: 不能通过直接影响, 能通过多个直接影响国家共同产生影响的国家。

4) 剩余影响国家: 通过除了直接影响和间接影响之外的传播方式受到影响的国家。如传播方式是通过直接影响国家和间接影响国家共同作用的国家是剩余影响国家, 传播方式是通过间接影响国家影响的也是剩余影响国家。剩余影响表现为通过宏观网络结构产生的影响。

3.2 加权模型的讨论

前面的基本模型和具体模型是对“国家是如何受影响”为主题构建模型, 在“国家受影响后如何传播出去”则是做了一个假定: 国家一旦受到影响, 它的所有出口都会受到影响(断边), 把这种模型称为无权模型。但是事实上, 国家遭受危机影响, 并不是要将所有出口都断绝, 它会以一定比例 $(1-f)$ 减少出口。因此, 还可以将无权模型扩展到加权模型: 设国家受到影响后出口变为原来的 f 倍。

则式(2)和式(3)可以表示为: $\frac{\sum_A fW_{Aj}}{\sum_k W_{kj}} \geq \Omega$ 和

$\frac{\sum_A fW_{Aj}}{GDP_j} \geq \Omega$ 。由于 f 为常数, 则上述两式可以变化为:

$$\frac{\sum_A W_{Aj}}{\sum_k W_{kj}} \geq \frac{\Omega}{f} = \Omega' \quad (4)$$

和

$$\frac{\sum_A fW_{Aj}}{GDP_j} \geq \frac{\Omega}{f} = \Omega' \quad (5)$$

因此, 在给定 Ω 和 f 下, 模型一和模型二的加权模型最终可以转化为无权模型。2.2节讨论的模型一和模型二包含加权模型的含义, 此时的 $\frac{\Omega}{f}$ 为无权模型的 Ω 。

4 实例分析

4.1 数据来源和网络构建

本文根据2008年~2012年的实际贸易数据构建国际贸易网络。贸易数据来源IMF eLIBRARY-Data的Direction of Trade Statistics(DOTS)数据库, 数据统一以美元计价。选取数据库中2008年~2012年共5年的进口年度数据, 将这5年贸易数据的平均值作为

网络的边权。GDP数据采用2008年~2012年的购买力平价GDP数据(Constant 2005 international \$), 数据来源于世界银行的World Development Indicators数据库, 缺失的GDP数据采用线性插值或CIA(central intelligence agency)数据进行补充。将5年的GDP数据的平均值作为模型中国家的GDP数据。构建起的国际贸易网络包含205个节点(国家/地区)。

4.2 模型结果

遍历每个国家作为危机传播的源国家, 选取 Ω 从0~0.5, 间隔0.001进行模拟, 得到每个源国家及给定 Ω 下相变点处的不正常状态国家比例 S_a 、时间 τ 和相变点前后不正常状态国家比例的差距 $S_{a_{\tau-1}} - S_{a_{\tau}}$ 。结果表明, 模型一和模型二在 S_a 随 Ω 变化过程中, 绝大部分源国家发生的渗流过程均出现相变现象(分别有193和167个源国家/地区发生相变。相变现象即随着阈值 Ω 的连续变化, 最终不正常国家的比例值 S_a 呈现大幅跳跃, 表现为随着 Ω 的减小, 源国家的影响范围由小突然变大)。根据相变现象发生的阈值 Ω 大小, 源国家(地区)的排序情况如表1和表2所示。源国家相变点的 Ω 值越大, 表明在给定阈值 Ω 下, 该国家更容易造成大范围影响。

表1 模型一中源国家(地区)相变点处 Ω 值排序(Top 10)

序号	源国家	Ω	S_a	$S_{a_{\tau}} - S_{a_{\tau-1}}$	T
1	德国	0.299	0.888	0.810	13
2	中国大陆	0.227	0.888	0.815	6
3	荷兰	0.193	0.888	0.883	6
4	美国	0.181	0.888	0.698	7
5	日本	0.179	0.888	0.859	7
6	俄罗斯	0.165	0.888	0.732	11
7	法国	0.157	0.888	0.824	9
8	新加坡	0.156	0.888	0.815	10
9	印度	0.148	0.888	0.776	9
10	加拿大	0.144	0.888	0.883	5

表2 模型二中源国家(地区)相变点处 Ω 值排序(Top 10)

序号	源国家	Ω	S_a	$S_{a_{\tau}} - S_{a_{\tau-1}}$	T
1	中国大陆	0.117	0.624	0.468	12
2	法国	0.113	0.366	0.346	9
3	英国	0.105	0.444	0.415	11
4	美国	0.101	0.800	0.634	13
5	德国	0.089	0.868	0.263	14
6	荷兰	0.082	0.873	0.849	13
7	日本	0.079	0.873	0.771	14
8	比利时	0.077	0.873	0.863	11
9	意大利	0.064	0.883	0.849	11
10	俄罗斯	0.063	0.883	0.824	11

参考表1和表2, 根据排名前列国家相变点处的 Ω 值, 选择合适的 Ω 。在模型一中选取 $\Omega=0.14$, 模型二中选取 $\Omega=0.05$ 进行模拟, 得到两个模型中各源国家的具体传播过程情况。本文关注排名前30位的国家, 发现模型一和模型二中, 排名前列的国家均能造成大范围影响, 同时危机传播过程包括一步直接影响、间接影响和剩余影响, 其中, 主要以剩余影响的方式进行。就一步直接影响而言, 中国大陆、美国、德国、俄罗斯、新加坡在两个模型中均影响了多个国家(大于等于10), 是直接影响力最大的国家。

4.3 与中心性结果的比较

将本文结果与中心性结果进行比较分析。计算该网络的中心性指标: 加权度Deg(weighted degree)、紧密度Clo(closeness)、特征向量中心性Eig(eigenvector)和介数中心性Bet(betweenness)。截取167个模型一和模型二中均发生相变的国家, 重新对其相变点的 Ω 值和中心性值进行排序, 得到每个国家相应指标的排名。将各指标的排名结果进行Spearman相关性分析, 指标的Spearman相关系数如表3所示。

表3 模型结果与中心性结果的相关性

	Deg	Clo	Eig	Bet	模型一	模型二
Deg	1.000	0.969	0.986	0.547	0.876	0.867
Clo	0.969	1.000	0.980	0.499	0.858	0.853
Eig	0.986	0.980	1.000	0.528	0.859	0.848
Bet	0.547	0.499	0.528	1.000	0.532	0.520
模型一	0.876	0.858	0.859	0.532	1.000	0.922
模型二	0.867	0.853	0.848	0.520	0.922	1.000

*注: 相关性Sig(双侧, 置信度0.01)显著。

表3结果表明, 模型一和模型二的结果具有极强的相关性, 它们与加权度、紧密度和特征向量的相关性也较高, 与介数的相关性较低, 模型结果具有一定合理性。靴襻渗流模型通过整个网络的作用, 利用给定传播机制模拟危机传播过程, 以研究节点作为传播源的影响力, 从节点重要性评价的功能和作用上来说其他节点中心性和重要性指标无法替代的。

5 结论

伴随世界经济全球化、一体化的持续发展, 国家之间的经济高度关联, 一国的经济危机极有可能波及到多数国家甚至影响世界经济。根据国际贸易网络的特点, 本文提出基于该网络的靴襻渗流基本

模型, 该模型下绝大部分源国家的危机传播范围随阈值 Ω 均出现了相变现象。对给定具体参数 Ω 下, 可以探讨国家间危机传播的具体过程和影响程度。进一步根据网络的特点, 给出了两个靴襻渗流的一般模型: 比例模型和GDP模型, 并对这两个模型进行加权的讨论。结合实际数据构建国际贸易网络, 在网络上进行模型模拟, 得到的结果能很好地反映模型的合理性, 为危机传播预测提供参考。模型靴襻渗流模型给出节点重要性, 从节点重要性评价的功能上来说具有不可替代性。进一步的研究可改进模型中的 W_j 和 C_j , 得到更现实的模型, 也可将模型应用在更加具体的贸易网络中。

参 考 文 献

- [1] KALI R, REYES J. The architecture of globalization: a network approach to international economic integration[J]. Journal of International Business Studies, 2007, 38: 595-620.
- [2] CHALUPA J, LEATH P L, REICH G R. Bootstrap percolation on a Bethe lattice[J]. Journal of Physics C: Solid State Physics, 1979, 12(1): L31-L35.
- [3] ECKMANN J P, FEINERMAN O, GRUENDLINGER L, et al. The physics of living neural networks[J]. Physics Reports, 2007, 449: 54-76.
- [4] GOLTSEV A V, DE ABREU F V, DOROGOVTSSEV S N, et al. Stochastic cellular automata model of neural networks[J]. Physical Review E, 81(6): 061921-1-9.
- [5] SORIANO J, MARTINEZ M R, TLUSTY T, et al. Development of input connections in neural cultures[J]. PNAS, 2008, 105(37): 13758-13763.
- [6] ADLER J, PALMER R G, MEYER H. Transmission of order in some unusual dilute systems[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(9): 882-885.
- [7] ERTEL W, FROBOSE K, JACKLE J. Constrained diffusion dynamics in the hard - square lattice gas at high density[J]. The Journal of Chemical Physics, 1988, 88(8): 5027.
- [8] NAKANISHI H, TAKANO H. Numerical study on the kinetic Ising model for glass transition[J]. Physics Letters A, 1986, 115(3): 117-121.
- [9] SELLITTO M, BIROLI G, TONINELLI C. Facilitated spin models on Bethe lattice: Bootstrap percolation, mode-coupling transition and glassy dynamics[J]. Europhysics Letters, 2005, 69(4): 496-502.
- [10] TONINELLI C, BIROLI G, FISHER D S. Jamming percolation and glass transitions in Lattice models[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(3): 035702.
- [11] KOGUT P M, LEATH P L. Bootstrap percolation transitions on real lattices[J]. Journal of Physics C: Solid State Physics, 1981, 14(22): 3187-3194.
- [12] BALOGH J, PITTEL B G. Bootstrap percolation on random regular graph[J]. Random Structures Algorithms, 2007, 30(1-2): 257-286.
- [13] FONTES L R G, SCHONMANN R H. Bootstrap

- percolation on homogeneous trees has 2 phase transitions[J]. *Journal of Statistical Physics*, 2008, 132(5): 839-861.
- [14] BALOGH J, PERES Y, PETE G. Bootstrap percolation on infinite trees and non-amenable groups[J]. *Combinatorics, Probability and Computing*, 2006, 15(5): 715-730.
- [15] BISKUP M, SCHONMANN R. Metastable behavior for bootstrap percolation on regular trees[J]. *Journal of Statistical Physics*, 2009, 136(4): 667-676.
- [16] BOLOB'AS B, GUNDERSON K, HOLMGREN C, et al. Bootstrap percolation on Galton-Watson trees[J]. *Electronic Journal of Probability*, 2014, 19(13): 1-27.
- [17] WHITNEY D E. Dynamic theory of cascades on finite clustered random networks with a threshold rule[J]. *Physical Review E*, 2010, 82(6): 066110.
- [18] BAXTER G J, DOROGOVTSSEV S N, GOLTSEV A V, et al. Bootstrap percolation on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2010, 82(1): 011103.
- [19] JANSON S, LUCZAK T, TUROVA T, et al. Bootstrap percolation on the random graph G_n, p [J]. *The Annals of Applied Probability*, 2012, 22(5): 1989-2047.
- [20] AMINI H, FOUNTOLAKIS N. Bootstrap percolation in power-law random graphs[J]. *Journal of Statistical Physics*, 2014, 155(1): 72-92.
- [21] 万宝惠, 张鹏, 张晶, 等. 二分网上的靴襻渗流[J]. *物理学报*, 2012, 61(16):166402.
WAN Bao-hui, ZHANG Peng, ZHANG Jing, et al. Bootstrap percolation on bipartite networks[J]. *Acta Physical Sinica*, 2012, 61(16): 166402.
- [22] WU C, JI S, ZHANG R, et al. Multiple hybrid phase transition: Bootstrap percolation on complex networks with communities[J]. *EPL*, 2014, 107(4): 48001.
- [23] GAO J, ZHOU T, HU Y. Bootstrap percolation on spatial networks[J/OL]. ArXiv:1408.1290 [physics.soc-ph].
- [24] LEE K M, YANG J S, KIM G, et al. Impact of the topology of global macroeconomic network on the spreading of economic crises[J]. *PLoS one*, 2011, 6(3): e18443.

编辑 蒋晓

(上接第177页)

- [15] 阚佳倩, 谢家荣, 张海峰. 社会强化效应及连边权重对网络信息传播的影响分析[J]. *电子科技大学学报*, 2014, 43(1): 21-25.
KAN Jia-qian, XIE Jia-rong, ZHANG Hai-feng. Impacts of social reinforcement and edge weight on the spreading of information in networks[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2014, 43(1): 21-25.
- [16] MCAULEY J, LESKOVEC J. Image labeling on a network: Using social-network metadata for image classification [M]//FITZGIBBON A, LAZEBNIK S, PERONA P, et al. *Computer Vision-ECCV 2012*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 828-841.
- [17] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scalling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [18] 周涛, 傅忠谦, 牛永伟, 等. 复杂网络上传播动力学研究综述[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(5): 513-518.
ZHOU Tao, FU Zhong-qian, NIU Yong-wei, et al. Research on dynamics of complex network communication[J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(5): 513-518.
- [19] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 310-312.
WANG Xiao-fan, LI Xiang, CHEN Guan-rong. *Network science: an introduction*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 310-312.
- [20] MAKSIM KITSACK, LAZAROS K, GALLOS, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. *Nature Physics*, 2010, 6(11): 888-893.

编辑 蒋晓