

基于位置吸引力的加权复杂供应链网络局域世界演化模型研究

赵志刚^{1,3} 周根贵² 潘瑞芳³

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310014)¹

(浙江工业大学经贸管理学院 杭州 310014)² (浙江传媒学院 杭州 310018)³

摘 要 在一般局域世界演化模型的基础上,文章使得企业节点的初始位置值呈现幂率分布,以体现节点企业的不同角色。受万有引力定律的启发,用位置值的大小和远近值来定义节点企业间位置吸引力的概念,并应用吸引力规则确定每一个新加入节点的局域世界。新节点与局域世界中的老节点之间采用节点度与节点强度的复合优先连接方式,弥补了优先连接仅仅依赖节点度值的缺陷,从而构建基于位置吸引力的加权复杂供应链网络局域世界演化模型。实验模拟了该复杂网络的生长、边的退出和节点的退出等动态演化过程,通过计算与统计整体度分布、平均路径长度和聚集系数等复杂供应链网络的重要参数发现:该复杂供应链网络的度分布呈现出一定的幂率分布形式,能够保证大多数节点的度较低和少数节点的度较高的重尾特征,同时具有较大的集聚系数和较小的平均路径长度的小世界特征。该研究工作为供应链企业实践中构建供应链网络提供了理论依据,有助于更好地分析现实供应链网络的相关特性并识别重要节点以便对供应链网络进行保护。

关键词 复杂网络,供应链,交易量,局域世界,位置吸引力

中图分类号 TP311 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.12.010

Study on Local World Evolution Model of Weighted Complex Supply Chain Network Based on Location Attraction

ZHAO Zhi-gang^{1,3} ZHOU Gen-gui² PAN Rui-fang³

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)¹

(College of Economics and Management, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)²

(Zhejiang University of Media and Communications, Hangzhou 310018, China)³

Abstract The initial position values of enterprise nodes are presented as power-law distribution to reflect different roles of node enterprises on the basis of common local-world evolving network models. Inspired by the law of universal gravitation, this paper utilized the size of position and distance values to define the concept of position attraction of node enterprises, and determined the local world of every newly added node by using attraction rules. The compound priority connection mode of node degree and node strength is adopted among new nodes and the old nodes in the local world, making up for the defect that priority connection only relies on node degrees. In this sense, the weighted complex supply chain network-world evolving model was established based on position attraction. The experiments were conducted to simulate the dynamic evolution process such as complex network growth, edge exit and node exit etc. Through the calculation and statistic analysis of important parameters in complex supply chain networks such as network integrity degree distribution, average path length and average gather coefficient, it is found that the degree distribution of the complex supply chain network shows power-law distribution. It can guarantee the heavy tailed characteristics with the majority of the nodes possessing low degree and few nodes possessing high degree. At the same time, the complex supply chain network possesses small world characteristics with larger clustering coefficient and smaller average path length. This research provides theoretical foundation for supply chain enterprises to establish supply chain networks in practice, and it is conducive to analyze characteristics related to real supply chain networks better and identify important nodes for further protection.

Keywords Complex network, Supply chain, Trading volume, Local world, Location attraction

到稿日期:2017-11-15 返修日期:2018-01-20 本文受国家自然科学基金面上项目(71371169),浙江传媒学院一流学科“计算机科学与技术”(网络空间安全方向)资助。

赵志刚(1976—),男,博士,CCF会员,主要研究方向为复杂网络系统分析,E-mail:zhaozhig2006@126.com;周根贵(1958—),男,博士生导师,主要研究方向为人工智能、供应链网络分析,E-mail:ggzhou@zjut.edu.cn(通信作者);潘瑞芳(1959—),女,教授,主要研究方向为数据库应用、数媒技术,E-mail:896663580@qq.com。

1 引言

供应链是指以原材料采购为起点,通过制造商进行产品制造,最终把产品通过渠道网络送到末端消费者的将供应商、制造商、销售商以及终端用户连为一体的功能网络结构^[1]。物流、信息流、资金流等各种流在复杂供应链网络中相互作用和影响,增加了供应链网络的复杂度^[2]。在现实供应链网络中,网络中的各个节点之间是有联系的,显然更适合用加权网络模型来描述。无权网络仅是对复杂供应链网络的一种近似简化,加权网络则能全面且客观地描述实际复杂供应链网络的动力学演化特性。

用计算机模拟包含企业节点及节点之间边加入和退出的供应链网络的动态演化过程,统计并分析供应链网络的平均路径长度和集聚系数等重要特征,有利于缩短交货期,加强信息交流,能有效地提高核心企业应对不确定性的能力,将有利于控制企业的不确定性。

目前,国内外学者在复杂供应链网络的概念、特征、属性、网络建模、网络风险等方面开展了广泛的研究。Liu等^[3]研究发现:可以通过控制关键节点的控制参数和特征来控制整个网络系统。杨康等^[4]研究了供应链网络风险传播模型并通过小世界网络进行仿真。一些近期的研究^[5-6]表明,在网络遭受攻击时,网络结构对鲁棒性有显著影响,如学者们研究了簇团结构对多网络的影响。柳虹等^[7]将供应链网络中的节点按照不同功能划分为4个层次,从而建立加权多参数优先连接的模型,改进BA模型,但是没有考虑跨层连接的情况。Menichetti等^[8]结合结构可控性和复杂供应链网络的脆弱性及鲁棒性进行研究,指出网络的低度数节点的密度决定网络的可控性。曹文彬等^[9]把边效益引入到复杂供应链网络的演化过程中,提出了复合优先连接概率,同时很好地解释了部分经济学现象,但新增节点随机选取一个局域网络作为该节点的连接世界。谢逢洁等^[10]改进了BA模型,引入边的增长机制和城市间的地理位置因素,建立了城市快递网络的演化模型,研究了加权陆运快递网络的优化方法,但对节点的增长并不太关注。

以上研究成果对于供应链网络适应性地生长有一定的作用,但这些研究大多以定性分析为主,缺乏定量计算分析。实际上,对于很多真实的环境,例如贸易合作网的供应链网络,全局优先连接并不是首选的和必须的,大多数国家贸易时,往往喜欢选择与地理位置较近的或同一区域联盟内部的国家合作,这就是现实复杂网络中出现的一个重要特征——局域世界网络的选择^[11]。

在选择局域世界时,复杂供应链网络在演化过程中可以依据位置近的节点吸引力强的特点构建其局域网络世界,距离近意味着交易时将获得更多的成本优势。但节点间仅仅位置距离近,还不足以确定新加入节点的局域网络世界。本文将在一般局域世界模型的基础上,使企业节点的初始位置值呈现幂率分布,以体现节点企业角色的不同;用类似万有引力定律的位置值的大小和远近值来定义节点企业间位置的吸引力概念,并应用吸引力规则确定每一个新加入节点的局域世界;接着采用综合节点度与节点强度的复合优先连接方式对新节点与局域世界中的老节点进行连接,克服了优先连接仅

仅依赖节点度值的缺点。此外,在网络动态演化过程中会出现边退化(交易中断)和节点消失(企业退出)的现象。节点企业度值为0,能够反映出网络中没有贸易伙伴的节点企业可以退出网络。而边退化现象反映出贸易伙伴之间的交易量小于设定阈值时双方交易中断的现实情况。本文将基于复杂供应链网络的位置吸引力规则,建立综合节点度和节点强度优先连接的供应链网络局域世界动态演化模型,为实际复杂供应链网络的正常运行提供帮助。

2 复杂网络的统计特征及相关模型

2.1 统计特征

度分布:节点的度即与该节点相连的边的数量。度分布通常用概率分布函数 $P(K)$ 表示,它表示节点中的度为 K 的节点的概率。

平均路径长度:在加权网络中,节点 i 到节点 j 的距离是这两个节点之间的最短路径上的边权值之和。网络的平均路径长度 L 则是两个任意节点之间距离的平均值,即:

$$L = \frac{1}{N(N+1)/2} \sum_{i>j} d_{ij} \quad (1)$$

其中, N 为网络的总节点数, d_{ij} 是网络中节点 i 到节点 j 之间的距离。

集聚系数:集聚系数是网络的集团化程度。节点 i 的集聚系数 C_i 是与此节点直邻的节点间实际存在的边数目除以可能存在的最大边数目获得的比值,其表达式为:

$$C_i = 2E_i / [k_i(k_i - 1)] \quad (2)$$

其中, k_i 表示与节点 i 连接的边的数目, E_i 表示与节点 i 的相邻节点之间存在的实际边数。而网络的集聚系数 C 为所有节点集聚系数的平均值,即:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (3)$$

2.2 相关模型

规则网络模型和随机网络模型都与实际社会网络的特性不一致,为了更好地揭示实际网络的内在机制,Watts等提出了著名的WS小世界网络^[12],但它仍然不能完全解释日常生活中的网络特征和行为。

后来Barabs和Albert首先发现了无标度BA网络模型。BA网络主要具有以下特性:度分布符合幂律分布,还具备小世界特征。BA模型的构造算法如下^[13]。

(1)增长特性:最初网络中具有 m_0 个节点和 e_0 条边,每次增加一个新节点,并与网络中 m 个已存在的节点相连,此处 $m \leq m_0$ 。

(2)择优选择连接:新节点 j 与旧节点 i 相连接的概率 P 与节点 i 的度数 k_i 、节点 j 的度数 k_j 之间满足以下关系:

$$P = k_i / \sum k_j \quad (4)$$

其中, $j=1,2,3,\dots,n$, n 为网络中节点的总个数。

经过 t 个时间步后,BA模型最终变成一个拥有 mt 条边和 $N=t+m_0$ 个点的网络。

3 复杂供应链网络演化模型

3.1 复杂供应链网络拓扑结构

由图论的知识,可把复杂供应链网络描述为由边集 E 和

点集 V 构成的图 $G=(V, E)$ 。边记为 $M=|E|$, 节点记为 $N=|V|$ 。其中 $E=\{(i, j)|i, j \in V, i \neq j\}$ 。边集 E 中的每一条边都对应于点集 E 中的一对点。给每条边都赋予相应的权值, 该网络即为加权网络。网络中还可能包含多种不同类型的节点, 这些节点代表企业的不同角色。对于加权网络, 可以用 $N \times N$ 阶连接矩阵中的元素来表示边上的权重。企业 i 和企业 j 之间的交易量用 A 的矩阵元素 A_{ij} 来表示^[14]。若企业间的交易量大于阈值 P_0 , 则有 $A_{ij} > 0$, 说明企业之间有贸易关系; 否则 $A_{ij} = 0$, 表示两企业间无贸易关系。此模型供应链网络为无向网络, 这是因为双边贸易具有相互性。

3.2 复杂供应链网络演化规则

首先定义位置吸引力。供应链网络中的节点包括供应商、制造商、销售商、客户等, 可用不同位置参数描述它们在市场中的角色, 以此评价两节点间建立合作关系的可能性和优先级。模型中, 针对每一个节点 i 给予一个“位置”值, 记为 $w_i \in R^n$, w_i 为一个 n 维变量, 简便起见可以使 $n=1$ 。位置吸引力参数用来评价该节点与网络中其他节点相互吸引的程度^[15]。度分布、聚类系数和平均路径长度是 3 个通用典型的评价指标, 用以评价复杂供应链网络演化生成的结果特性。文献[15]也从这 3 个方面进行了研究, 但仅是通过理论推导。优先连接概率综合的是节点度和节点吸引度, 其节点吸引度是指节点在单位时间内获得的连接次数, 与本文节点强度的含义是不同的; 且其节点吸引度也仅是一个理论公式, 未做进一步说明和验证, 实验仅对度分布进行简单仿真, 未考虑网络演化过程中节点及边的退出等动态演化现象。而本文研究的优先连接概率则是在局域世界选定后综合了节点度和节点强度, 并通过实验仿真对度分布、聚集系数和平均路径长度这 3 个典型评价指标做了带参数调节变化的详细仿真。特别需要指出的是, 位置吸引力的强弱除了与节点之间位置的远近有关外, 还应与两个节点位置的乘积有关, 就像万有引力一样, 且本文初始位置按幂率分布。文献[15]给出了节点之间的相关度公式:

$$W_{ij} = 1 / (w_i - w_j) \quad (5)$$

另外, 文献[15]中节点的初始位置值为随机分布, 且没有进一步编程实现; 而在本研究中使初始位置值呈现幂率分布。初始位置呈现幂率分布能体现出现实生活中大多数节点企业的度值小、少数节点企业的度值高的特征。这样的位置值分布更能反映出节点企业的不同身份角色。本文中的节点 i 与节点 j 的位置吸引力定义为类似万有引力定律的形式:

$$W_{ij} = w_i * w_j / (1 + |w_i - w_j|) \quad (6)$$

其中, $i=1, 2, \dots$ 。两个节点的位置值乘积越大, 且相距越近, 关系越密切, 吸引力就越大。为防止 $|w_i - w_j| = 0$, 在公式的分母上加 1。

演化规则如下所示:

(1) 供应链网络初始化。刚开始演化, 即 $t=0$ 时, 生成一个具有 m_0 个初始节点和 e_0 条边的网络, 并随机生成交易量 $A_{ij} \in [0, 1]$ 。对每个节点给予一个位置参数值 w_i ($i=1, 2, \dots, m_0$), 且该位置参数值服从 $(0, 1)$ 之间的幂率分布。节点 i 与节点 j 间的交易量值 A_{ij} 若小于网络中所设定的边断裂门阈值 P_0 , 则两个节点间的边失去连接; 此外, 规定度为 0

的节点因无交易伙伴而退出供应链网络^[9]。

(2) 局域世界里择优增长。在第 t 个时刻, 增加一个新节点 j , 给它分配一个在 $(0, 1)$ 之间按幂率分布的位置参数值 w_j 。新节点 j 的局域世界由与其有较大吸引程度的 M_t 个已存在的节点组成, 其中:

$$M_t = m + t \quad (7)$$

$$m \leq M_t \leq t + m_0 \quad (8)$$

在 $t+1$ 时刻, 通过 $W_{ij} = w_i * w_j / (1 + |w_i - w_j|)$ 计算出新节点 j 与已有的每个老节点 i 之间的吸引程度 W_{ij} , 选择相关程度较大的 M_t 个节点组成新节点 j 的局域世界 *Local*。用优先连接概率 Π 的表达式计算节点 i ($i \in Local$) 与新节点 j 的连接概率, 并以此优先概率从 *Local* 中选取 m 个节点与新节点 j 连接。优先连接概率为:

$$\Pi_{Local}(j > i) = a * k_i / \sum k_j + b * s_i / \sum s_j \quad (9)$$

其中, s_i 为节点 i 的强度, $s_i = \sum A_{ij}$, 即 s_i 是与节点 i 直接相连的邻居节点与节点 i 的交易量之和, k_i 是节点 i 的度。这个概率兼顾了节点度与节点交易量的累加值(节点强度), 在式(9)中, $a+b=1$, 且 $a>0, b>0$ 。此时, 对于网络中具有交易关系的节点, 随机生成节点间的新的边交易量 $A_{ij} \in [0, 1]$ 。

(3) 边断裂。供应链网络中节点企业间的交易量过低时将出现边断裂现象, 即对于变化后的网络, 如果节点 i 与节点 j 之间的交易量值 A_{ij} 小于门阈值 P_0 , 则节点间交易结束, 从而失去连接, 即此时令 $A_{ij} = 0$ 。

(4) 节点退出。供应链网络更新后, 规定度为 0 的节点 i 因缺乏交易伙伴而退出供应链网络。

(5) 模拟终止条件。返回步骤(2), 直到供应链网络达到规定的网络规模 N 为止。

以上演化模型中, 网络中的初始企业节点数 m_0 、网络中的企业节点间的初始连边数 e_0 、企业节点间交易终止门阈值 P_0 、每次新加入节点与老企业节点连边数目 m 和最终企业节点总数 N 的值均可预先设置。

3.3 模型度参数分析

本模型中考虑 $M_t > m$ 的情况, 此时新增节点与旧节点的择优连接规则将会在局域世界中发挥作用, 新节点会在它的局域世界中选择连接概率大的旧节点优先进行连接。基于连续场理论^[16]可以推导出模型的度分布。

用 k_i 表示节点 i 的度, 设 k_i 连续。每一个递进的时间步里, 节点 i 的度 k_i 对时间的导数按如下方式增加:

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{m M_t}{m_0 + t} \frac{k_i}{\sum_{j \in Local} k_j} \quad (10)$$

假设局域世界中节点度的和为:

$$\sum_{j \in Local} k_j = \langle k \rangle M_t \quad (11)$$

其中, $\langle k \rangle$ 表示网络中所有节点度的平均值。

$$\langle k \rangle = \frac{2[mt + e_0]}{t + m_0} \quad (12)$$

将式(11)和式(12)代入式(10), 当 t 足够大时, 得:

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{m M_t}{m_0 + t} \frac{k_i}{2[mt + e_0] M_t / (m_0 + t)} \approx \frac{k_i}{2t} \quad (13)$$

初始条件是:

$$k_i(t_i) = m \quad (14)$$

其中, t_i 为节点 i 进入系统的时间。由式(13)和式(14)可得:

$$k_i(t) = m(t/t_i)^{0.5} \tag{15}$$

由式(15)可以得到节点连接度 $k_i(t)$ 小于某定值 k 的概率为:

$$P(k_i(t) < k) = P(t_i > \frac{m^2 t}{k^2}) \tag{16}$$

假设等时间间隔地向网络中加入节点, 则 t_i 值具备一个常数概率密度:

$$P(t_i) = \frac{1}{m_0 + t} \tag{17}$$

由式(16)和式(17)得到:

$$\begin{aligned} P(t_i > \frac{m^2 t}{k^2}) &= 1 - P(t_i \leq \frac{m^2 t}{k^2}) = 1 - \sum_{t_i=1}^{\frac{m^2 t}{k^2}} P(t_i) \\ &= 1 - \frac{m^2 t}{k^2(m_0 + t)} \end{aligned} \tag{18}$$

利用式(18)对 k 求导数, 得到网络度值分布为:

$$P(k) = \frac{2m^2 t}{m_0 + t} \frac{1}{k^3} \tag{19}$$

当 t 足够大时, 有:

$$P(k) = 2m^2 k^{-3} \tag{20}$$

由此可见, 网络度分布呈现幂率分布。

4 实验仿真及分析

4.1 度分布函数

复杂网络的度分布与其拓扑结构紧密相关。假定有一个由 $N=1500$ 个节点构成的供应链网络, 取初始企业的节点数 $m_0=10$, 每次新节点连边老企业的节点数 $m=2$, 边断裂门阀值 $P_0=0.1$ (代表当两个企业的交易量小于 0.1 时停止交易), 模型参数 $a=b=0.5$ (均衡取值), a 代表优先连接概率中节点度所占比例, b 代表优先连接概率中节点强度所占比例。本文在 Matlab2014b 的环境下进行仿真, 经过仿真得到如图 1 所示的节点度分布图。为避免模拟实验过程中随机因素的干扰, 对每一个实验过程都进行 10 次独立仿真, 将平均值记录作为最终结果。

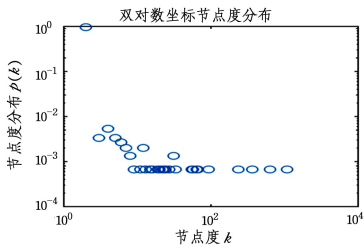


图 1 本文模型的节点度分布图

Fig.1 Node degree distribution of proposed model

由图 1 可以看出, 本模型的度分布函数呈现出一定的幂率分布, 能保持绝大多数节点的度较低而少数节点的度较高。图 2 显示的是当优先概率因子 a 和 b 变化时本文模型的节点度分布情况。由图 2 可以看出, 随着 a 和 b 的变化, 模型度分布大致呈现趋势一致, 并且 a 的值越大, 节点度值也越大。

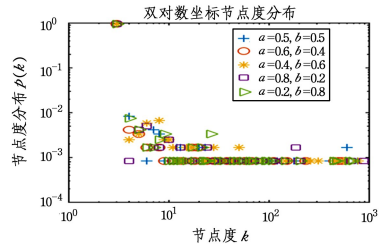


图 2 度分布与模型参数 a, b 的关系

Fig.2 Relationship between degree distribution and model parameter a and b

图 3 给出了度分布函数随加权供应链网络的交易量 m 变化的情况。可以看出, 供应链网络中新产生交易数量 m 的增加会影响供应链网络的度分布, 随着 m 的增加, 长尾现象越发明显, 高度值节点出现得相对较多。由此可以说明: 交易次数增加后, 度越小的企业在供应链网络中存活的概率也越小。

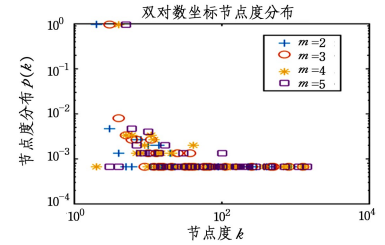


图 3 度分布与模型参数 m 的关系

Fig.3 Relationship between degree distribution and model parameter m

图 4 给出了度分布函数与网络规模 N 的关系。总体来说, 度分布随网络规模 N 值的增加变化不大, 网络中高节点度的企业节点依然呈现很少的态势。

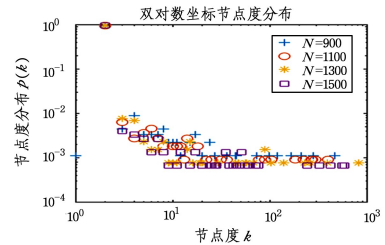


图 4 度分布函数与网络规模 N 的关系

Fig.4 Relationship between degree distribution function and network scale N

4.2 平均集聚系数

平均集聚系数是供应链网络中节点聚集程度的系数, 它体现了网络的模块结构。图 5 和图 6 给出了在不同的边断裂门阀值 P_0 的条件下两种模型 (本文模型和经典 BA 模型) 的平均集聚系数与网络规模 N 的关系。由图 5、图 6 可以看出, 本文模型的集聚系数好于同等情况下的 BA 演化模型的网络集聚系数, 网络平均集聚系数随网络节点数的增加虽然有所波动, 但是仍然高于 BA 模型。图 5 的峰值点达到 0.53, 图 6 的峰值点达到 0.44, 说明随着淘汰率 P_0 的增加 (从 0.01 增加到 0.1), 网络的平均集聚系数会减小。

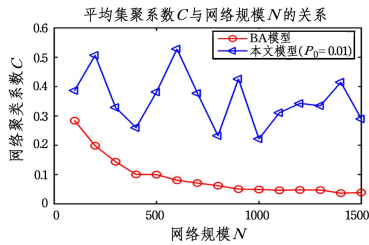


图 5 平均聚集系数与网络规模 N 的关系 ($P_0=0.01$)

Fig. 5 Relationship between average aggregation coefficient and network scale N ($P_0=0.01$)

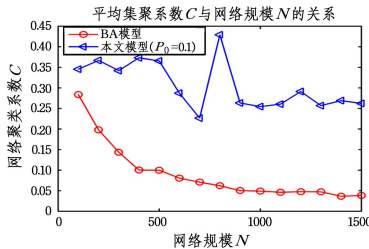


图 6 平均聚集系数与网络规模 N 的关系 ($P_0=0.1$)

Fig. 6 Relationship between average aggregation coefficient and network scale N ($P_0=0.1$)

4.3 平均路径长度

平均路径长度体现了网络运输效率。图 7 和图 8 给出了在不同的边断裂门阈 P_0 的条件下两种模型(本文模型和经典 BA 模型)供应链网络的平均路径长度与网络规模 N 的关系。由图 7、图 8 可以看出,随着网络规模 N 的增大,本文模型的平均路径长度要小于同等条件下的 BA 模型的平均路径长度,网络的平均路径长度虽然随着网络规模的增大有所波动,但依然保持比较小的平均路径长度,说明在供应链网络动态增长的过程中网络传输效率高,反映出供应链的交货能力较强。

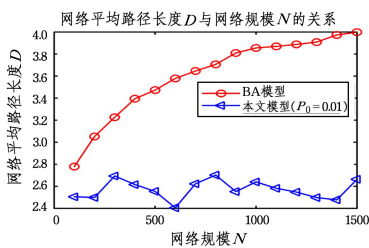


图 7 平均路径长度与网络规模 N 的关系 ($P_0=0.01$)

Fig. 7 Relationship between average path length and network scale N ($P_0=0.01$)

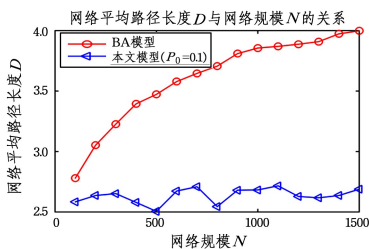


图 8 平均路径长度与网络规模 N 的关系 ($P_0=0.1$)

Fig. 8 Relationship between average path length and network scale N ($P_0=0.1$)

图 7 中最短平均路径长度达到 2.4;图 8 中最短平均路径长度可达 2.5。这说明随着淘汰率 P_0 从 0.01 增大到 0.1,网络的平均路径长度会增大。实验仿真发现,当 $P_0 \geq 0.48$ 时,网络会出现崩溃现象。因此,演化过程中淘汰率不能太大,否则会导致交易量减少,网络运输效率也会减小,不易于模型的演化。

结束语 本文用复杂网络的理论研究供应链网络的演化模型。首先基于地理位置引入吸引力因子,将初始化位置值按幂率分布,以体现企业的不同功能角色;受万有引力定律的启发,用位置值的大小和远近值来定义节点企业间位置吸引力的概念,并应用吸引力规则确定每一个新加入节点的局域世界;随后对 BA 模型的连接机制进行改进,把反映连接量的节点度和反映交易量的节点强度按比例加权后作为加入供应链网络的新节点连接网络中原有老节点的优先选择概率,构建了基于位置吸引力的加权供应链网络局域世界演化模型。相比于文献[15]通过数学公式推导出来的结论而言,本文主要通过带参数调整的编程仿真对网络进行动态演化,从而获得了一些较有价值的结果。对于本文模型构建的复杂供应链网络,通过实验可得以下结论:1)各种参数下的度分布呈现出一定的幂率分布形式,能够保证大多数节点度低和少数节点度高的重尾特征;2)相对于同参数的 BA 模型,该模型生成的供应链网络保持了较高的平均聚集系数;3)在网络规模不断增大的情况下,该模型生成的供应链网络能保持较短的平均路径长度,体现了网络有着较高的运输效率。本文为供应链企业在实践中构建供应链网络提供了理论依据,有助于更好地分析现实供应链网络的相关特性及识别重要核心企业和关键供应关系,以便对供应链网络进行保护。

下一步将重点研究复杂供应链网络在动态变化过程中的鲁棒性和抗毁性,并结合复杂供应链网络在交通运输网络、快递网络中的应用进行研究,使之发挥更强的现实指导意义。

参考文献

[1] DU Y L. Research on Supply Flow and Cost Optimization in Complex Supply Chain [J]. Modern Business, 2015(21): 31-32. (in Chinese)
杜衍霖. 复杂供应链下的供货流量与成本优化研究[J]. 现代商业, 2015(21): 31-32.

[2] ZHAO G. Research on Dynamic Behavior of Complex Supply Chain Network and Its Controllability [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
赵钢. 复杂供应链网络的动力学行为及其可控性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

[3] LIU Y Y, SLOTINE J J, BARABÁSI A L. Controllability of complex networks[J]. Nature, 2011, 473(7346): 167-173.

[4] YANG K, ZHANG Z Y. The Research on Risk Transmission Mechanism of Supply Chain Network Based on Complex Network Theory[J]. Systems Science and Mathematical Sciences, 2013, 33(10): 1224-1232. (in Chinese)
杨康, 张仲义. 基于复杂网络理论的供应链网络风险传播机理研究[J]. 系统科学与数学, 2013, 33(10): 1224-1232.

- [5] HUANG X Q, SHAO S, WANG H, et al. The robustness of interdependent clustered networks[J]. *EPL*, 2012, 101(1): 18002-18007.
- [6] SHAO S, HUANG X Q, STANLEY H E. Robustness of partially interdependent network formed of clustered networks[J]. *Physical Review E*, 2014, 89(3): 032812.
- [7] LIU H, ZHOU G G, FU P H. Local Evolving Model Research of Layered Supply Chains Complex Networks [J]. *Computer Science*, 2013, 40(2): 270-273. (in Chinese)
柳虹, 周根贵, 傅培华. 分层供应链复杂网络局域演化模型研究[J]. *计算机科学*, 2013, 40(2): 270-273.
- [8] MENICHETTI G, ASTA L D, BIANCONI G. Network Controllability Is Determined by the Density of Low In-Degree and Out-Degree Nodes[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(7): 078701.
- [9] CAO W B, XIONG X. Local-world Evolution Model of Complex Supply Chain Network Under Edge Benefit [J]. *Application Research of Computer*, 2016, 33(1): 75-81. (in Chinese)
曹文彬, 熊曦. 边效益因素下复杂供应链网络局域演化机制[J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(1): 75-81.
- [10] XIE F J, CUI W T. Complex Structural Properties and Evolution Model of the Ground Express Network [J]. *Journal of Systems Management*, 2016, 25(2): 364-369. (in Chinese)
谢逢洁, 崔文田. 陆运快递网络的复杂结构特性及演化模型[J]. *系统管理学报*, 2016, 25(2): 364-369.
- [11] FU J Y, ZHANG J, XIONG J, et al. Research on the Weighted Local Evolution Model of Urban Logistics Network's Spatial Structure [J]. *Compound Systems and Complexity Science*, 2015, 12(3): 38-44. (in Chinese)
付江月, 张锦, 熊杰, 等. 城市物流网络空间结构加权局域世界演化模型研究[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2015, 12(3): 38-44.
- [12] WATTS J, STROGATZ S H. Collective Dynamics of Small-World' Networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [13] 徐野. 复杂互联系统与网络鲁棒性研究[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 57-58.
- [14] FU P H, LI J, LIU Y C. Cluster Supply Chain network Evolving Model Based on Degree and Path Preferential Attachment [J]. *Operations Research and Management*, 2013, 22(1): 120-125. (in Chinese)
傅培华, 李进, 刘燕楚. 基于度与路径优先连接的集聚型供应链网络演化模型[J]. *运筹与管理*, 2013, 22(1): 120-125.
- [15] GE W, QIN X H. Evolution Model of Supply Chain Network Based on Complex Network [J]. *Business Age*, 2012(32): 18-19. (in Chinese)
葛伟, 秦效宏. 基于复杂网络的供应链网络演化模型[J]. *商业时代*, 2012(32): 18-19.
- [16] 孙玺菁, 司守奎. 复杂网络算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 67-69.

(上接第 51 页)

- [87] WU D, PIGOU L, KINDERMANS P J, et al. Deep Dynamic Neural Networks for Multimodal Gesture Segmentation and Recognition [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2016, 38(8): 1583-1597.
- [88] BAO P, MAQUEDA A I, DEL-BLANCO C R, et al. Tiny hand gesture recognition without localization via a deep convolutional network[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2017, 63(3): 251-257.
- [89] CAI L, CUI S, MIN X, et al. Dynamic hand gesture recognition using RGB-D data for natural human-computer interaction[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2017, 32(5): 3495-3507.
- [90] OHN-BAR E, TRIVEDI M M. Hand Gesture Recognition in Real Time for Automotive Interfaces: A Multimodal Vision-Based Approach and Evaluations[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(6): 2368-2377.
- [91] YAN L M, DU B, LI Y, et al. An extraction of key feature points and recognition of dynamic gesture trajectory based on depth data [J]. *Industrial Control Computer*, 2015, 28(11): 86-88. (in Chinese)
严利民, 杜斌, 李跃, 等. 基于深度数据的关键特征点提取及动态手势轨迹识别[J]. *工业控制计算机*, 2015, 28(11): 86-88.
- [92] MARIN G, DOMINIO F, ZANUTTIGH P. Hand gesture recognition with jointly calibrated Leap Motion and depth sensor [J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2016, 75(22): 1-25.
- [93] YAO Y Y. Research and implementation of key technologies of dynamic gesture recognition[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)
姚圆圆. 动态手势识别的关键技术研究及实现[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2016.
- [94] ZHANG Q, DENG F. Dynamic Gesture Recognition based on LeapMotion and HMM-CART Model [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 910(1): 012037.
- [95] TUNTAKURN A, THONGVIGITMANEE S S, SA-ING V, et al. Natural interactive 3D medical image viewer based on finger and arm gestures [C] // *Biomedical Engineering International Conference*. IEEE, 2013: 1-5.
- [96] ABDELNABY M, ELAZEM M A, ALY H A, et al. Augmented Reality Maintenance Training with Intel Depth Camera [C] // *International Conference on Machine Vision and Information Technology*. IEEE, 2017: 116-122.
- [97] SONG L, WEN F. The Human-Computer Interaction Design and Research of Virtual Experiment [C] // *Sixth International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*. IEEE, 2014: 50-53.
- [98] MOLCHANOV P, GUPTA S, KIM K, et al. Hand gesture recognition with 3D convolutional neural networks [C] // *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. IEEE, 2015: 1-7.