

分层供应链复杂网络局部演化模型研究

柳虹¹ 周根贵² 傅培华³

(浙江工业大学信息学院 杭州 310014)¹ (浙江工业大学经贸管理学院 杭州 310014)²
(浙江工商大学计算机与信息工程学院 杭州 310018)³

摘要 供应链是一种动态的、自适应性、自组织的复杂网络系统,具有典型的复杂网络特征。考虑了供应链网络的整体宏观行为,通过分析企业节点的产生、衰亡及退出等生长演化规律,以节点多属性参数组合作为优先连接的依据,建立了一个分层加权供应链网络模型。实验结果显示,该模型具有无标度特性,其幂律分布的指数落在(2,3)范围内,而且具有较大的集聚系数及较小的平均路径长度,表明了其具有小世界效应。

关键词 复杂网络,供应链,优先连接,幂律分布,节点强度

中图分类号 TP311 **文献标识码** A

Local Evolving Model Research of Layered Supply Chains Complex Networks

LIU Hong¹ ZHOU Gen-gui² FU Pei-hua³

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)¹

(College of Business Administration, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)²

(Computer and Information Engineering College, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)³

Abstract As a complex network system, supply chains have some characteristics of complex networks as dynamic, self-adaptability, self-organizational, etc. This paper considered the whole macroscopic behavior of supply chains networks, analyzed growth evolving rule of birth, decline, and exit of enterprise node, and constructed a layered weighted supply chains network model based on preferential attachment of multiattribute parameter combination of nodes. The experiment results verify the scale-free property of the model, whose exponent of power law is in the range form 2 to 3, and it has higher clustering and lesser average path length with network size, which shows that the model exhibits small-world property.

Keywords Complex networks, Supply chains, Preferential attachment, Power law, Node strength

1 引言

供应链网络是企业适应市场环境的变化演化出来的运作模式,也是企业之间竞争与协调发展的产物,是一个开放的、动态的、多级多层次的、与环境密切相关的复杂网络。目前供应链网络的研究大部分基于静态的供应链网络结构,多偏向供应链的微观运作层面,缺乏对它系统整体宏观行为和内在规律的研究,研究方法也主要为数学规划或定性分析,例如基于经典运筹学的方法、基于系统动力学的方法等,这些方法对系统作了大量简化,适于描述系统的局部、微观行为,不能很好地描述供应链系统的复杂动态本质。

复杂网络广泛存在于自然界和人类社会,是复杂性科学中复杂系统的抽象,强调系统的结构并从结构角度分析系统的功能,可用于深入分析复杂系统的整体运行规律和宏观行为、系统结构特征等。国外对供应链网络的复杂网络建模已经取得一定的研究成果,如 S. Katare 等^[1]对供应链系统的涌现结构和仿真问题进行了探讨,分析了供应链系统作为复杂

系统构成的交互作用的复杂网络的一些特性;Pathak 等^[2]对供应网络的适应性进行了研究,建立了供应网络的复杂适应系统概念模型;C. S. Langdon^[3]从复杂适应系统角度,对供应链的协调和外包进行了仿真;Surya D. Pathak^[4]研究了供需网络的动态演化、生长问题。目前国内越来越多的学者开始关注供应链网络的复杂网络建模研究,如郭进利^[5,6]提出了供应链网络中双幂律分布模型和老节点间有相互连接的供应链有向网络;于海生^[7]提出了基于交易量的供应链网络模型;朱冰心^[8]基于复杂网络理论研究了供应链应急管理;张纪会、徐军芹^[9]提出了适应性供应链的复杂网络模型;陈晓、张纪会^[10]建立了供应链复杂网络的局域演化生长模型。从研究方法来看,多数研究侧重定性研究供应链系统的复杂性,研究中供应链网络结构演化中新节点的择优连接概率大多只考虑了节点度数的概率。但是对现实世界中复杂网络的研究仅仅依靠节点和边形成的拓扑特性是远远不够的,网络中节点之间位置的相互影响、节点的生长和消亡,这些扩展因素对网络的自组织过程也是非常重要的。

到稿时间:2012-05-16 返修日期:2012-08-24 本文受国家自然科学基金项目(71171178),浙江省自然科学基金项目(Y7100556)资助。

柳虹(1979—),女,博士生,副教授,主要研究方向为人工智能、系统集成与优化,E-mail:LLH@mail.zjgsu.edu.cn;周根贵(1958—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为系统集成与优化、人工智能,E-mail:ggzhou@zjut.edu.cn(通信作者);傅培华(1966—),男,博士生,教授,主要研究方向为系统集成与优化、供应链管理。

传统企业之间的联系方式就如同规则模型,各企业之间的联系呈相对稳定、单一的状态。而供应链网络是企业基于利益和效率优先的原则,在最大化利润的前提下与一切可能的合作企业结成的联盟,其结构既有一定的规律可循,又存在随机性,无法用标准的规则网络或是随机网络来解释供应链网络。BA模型是大部分复杂网络的恰当描述,但BA模型的网络演化过程中,提出边连接的概率仅与节点现有的度有关,这并不能较好地描述实际的网络连接情况。考虑到供应链网络本质上的动态性和演化特征,本文以BA模型为基本参考模型,以节点的重要度作为优先连接的依据,引入多个随机量(如边的权值)模拟供应链网络的不确定性,改进模型的优先选择机制,提出分层的加权供应链网络演化模型,以刻画供应链形成和演化机理。

2 BA模型

1999年,Barabási和Albert^[11,12]通过追踪万维网的动态演化过程,发现了许多复杂网络具有大规模的高度自组织特性,即多数复杂网络的节点度服从幂律分布,并把具有幂律度分布的网络称为无尺度网络。他们认为产生幂律分布的原因有两点,一是节点的不断增长,二是边的择优连接方式。Alberto、Ibrahim和John等^[12]在此基础上总结了4点原因,即边的择优连接方式、节点的不断增长、节点在空间中的分布情况和边连接的局部性。

BA模型的生成算法如下:

(1)增长性:开始网络中有 m_0 个节点,在每个时间间隔增加一个具有 $m(m \leq m_0)$ 条边的新节点,连接这个新节点到 m 个不同的已经存在于网络中的节点;

(2)择优连接:在选择新节点连接时,新节点连接到节点 i 的概率 W 取决于节点 i 的度数 k ,即满足 $\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$ 。

3 供应链复杂网络模型

3.1 问题描述

Fu-Renlin和Michael J. Shaw^[14]提出的一般供应链网络的结构模型如图1所示。

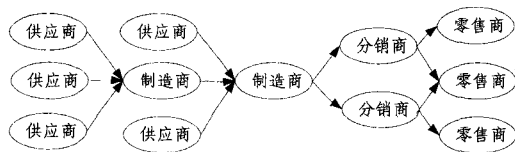


图1 一般供应链网络结构

由图1可见,该模型中有一个核心企业(制造商),其它的企业都围绕它展开业务。而实际上供应链上的每个节点企业都可以有多个前驱和多个后继,即一个节点企业会同时间面对多个供应商和多个客户的情形。供应链网络的成员是完全自主或半自主的业务实体,分别处于供应链网络的不同位置,完成不同的业务活动。

在供应链网络结构中,不同行业的不同类型的企业构成了网络不同的组织结构,其体现了网络的层次性,同行业内同类企业间存在竞争关系,而该级的企业节点又与它前后级之间存在合作关系。随着企业间供应、生产、销售等关系越来越复杂,节点企业将越来越多,在供应链网络中相邻两个节点企

业间的关系也是多级的,每级有多个同类型的节点企业。每个节点企业都可能作为信息的供应方,同时作为信息的需求方。为了生存和发展,每个企业都会不同程度地融合在不同的供应链中,因此同一行业各条供应链的各节点企业之间存在着复杂的竞争合作关系,最终形成供应链网络。同一行业中,位于不同供应链上的同一级节点企业(如制造商)之间是纯粹的竞争关系,它们各自的信息如企业优势、生产技术和财务状况等对于竞争对手而言是商业机密,它们可能同时与相同的上下游企业(如零售商)组成供应链。因此本文假设节点与节点之间的联系只发生在层与层之间,不发生跨层连接,又考虑到同层节点间的竞争关系,在演化过程中引入同层节点间的连接,构建的分层供应链网络模型如图2所示。

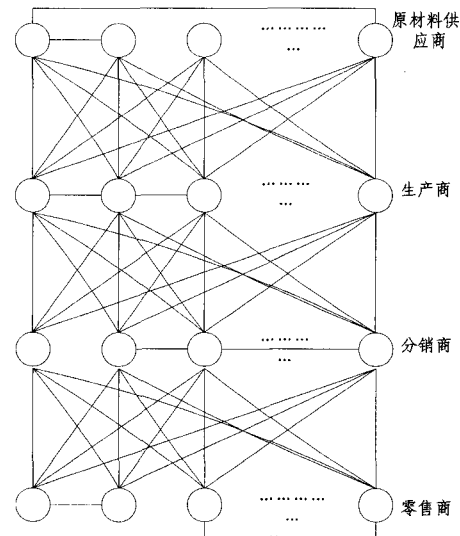


图2 分层供应链网络模型

3.2 供应链网络模型

本网络模型用图型结构表示为 $G^w = (V, E, W)$,其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 表示节点的集合,表示参与供应链活动的企业,并且根据相应企业在供应链中所处的层次位置进行分类,类别包括:供应商、生产商、分销商、零售商;各个节点企业之间通过物流、信息流、资金流建立动态的连接; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$ 表示边的集合,代表各个企业彼此之间的各种关系; $W = \{w_1, w_2, \dots, w_M\}$ 表示边的权值集合。 G^w 可以采用 $N \times N$ 的权值矩阵表示,其中元素 w_{ij} ($w_{ij} \geq 0$)表示连接节点 i 到节点 j 的边权值(如交易量等)。 $w_{ij} = 0$ 表示节点 i 和节点 j 不相连。考虑到企业间建立连接的动态相互性,这里假定供应链网络是无向网络。

本文用于体现供应链复杂网络特征的网络特性有:

(1)节点的度 k_i :描述与企业 i 有联系的企业个数,表示为:

$$k_i = \sum_j e_{ij} \quad (1)$$

(2)度分布 $p(k)$:描述网络中节点度的分布情况,可以描述为网络中度为 k 的节点数占网络节点总数的比例。

(3)权值 w_{ij} :描述节点间连接强度,在供应链中可以代表不同的含义,如成员企业间的交易量等。

(4)节点强度 S_i :描述网络中各个企业之间的联系紧密度,表示为:

$$S_i = \sum_{j \in N_i} w_{ij} \quad (2)$$

式中, N_i 是企业 i 的近邻集合。该节点强度既考虑了成员企业的近邻数, 又考虑了该企业与近邻之间的权重, 整合了节点的度数和与该节点相连的边权值的所有信息, 综合体现了网络中成员企业的区域信息。

(5) 平均路径长度 L : 用于描述网络的传输性能与效率, 表示为:

$$L = \frac{1}{N(N+1)/2} \sum_{i>j} d_{ij} \quad (3)$$

式中, d_{ij} 指连接企业 i 和企业 j 最短路径上的权重和。

(6) 聚类系数 C_i ^[15]: C_i 描述网络中与该节点直接相连的节点之间的连接关系, 表示为:

$$C_i = \frac{E_i}{k_i(k_i-1)/2} \quad (4)$$

式中, k_i 表示节点 i 的度, E_i 表示 k_i 个节点之间实际存在的边数。整个网络的聚类系数 C 为所有节点聚类系数的平均值。

(7) 节点重要度 I_i : 节点连接度和与节点相连的边权值的综合体现, 用于反映节点在网络中重要程度, 表示为:

$$I_i = \alpha s_i + (1-\alpha) k_i \quad (5)$$

式中, s_i 为节点 i 的节点强度, k_i 为节点 i 的当前度数, $\alpha \in [0, 1]$ 为节点重要度的调节参数。

3.3 分层供应链复杂网络演化模型

在复杂网络演化模型的研究领域, 大多都以“节点度的偏好性选择连接原则”作为网络连接和权值生成的行为驱动力, 即度越大的节点与新加入网络的节点连接的概率越大。但在实际供应链网络中, 网络的演化过程是一个复杂的动态过程, 企业生存环境存在诸多不确定性, 不仅不断有新的企业加入到该行业的供应链网络体系中, 而且因为企业转型、破产等原因, 供应链网络中的一些原有企业也会退出, 与那些退出的企业有供需关系的节点需进行重新选择, 以满足自身发展要求。新进入供应链网络的企业和失去原有业务伙伴的企业在选择与何企业发生业务关系时, 会有某种倾向性存在。

供应链网络中成员企业间的连接是多方面的, 不能仅仅考虑节点之间有无连接, 而应考虑连接的数量、性质和强度, 其中连接强度对网络结构具有决定性的意义。因此在构建加权供应链复杂网络演化模型时, 不仅仅考虑了将节点度作为节点的重要性判断依据, 还考虑了节点的边权值信息, 边权值信息能够充分体现网络中不同身份的成员节点在网络中所处的不同地位和作用。本文中网络节点重要度是节点连接度和与节点相连的边权值的综合体现, 用于反映节点在网络中的重要程度。按照偏好性连接的原则, 节点的重要度越大, 其在网络中的地位越重要, 那么它获得新的连接的概率也就越大。所以, 对节点度的偏好性连接原则进行扩展, 即可得到“节点重要度偏好性选择连接原则”。

本文提出的分层供应链网络演化模型基本演化规则为:

(1) 网络初始状态 $t=0$, 设置网络的初始节点共 N_0 个, 为了考虑网络的普遍适用性, 假设边的权值随机生成, 并归一化为 $w_i \in [0, 1]$ 。在以后的每一个时间步内, 新增一个度为 m_i 的点 ($m_i \leq N_0$), 并将 m_i 条边连接到网络中已经存在的 m_i 个不同的节点上。设定 3 个常数 $p_a, p_b, p_c \in [0, 1]$ 并且 $0 \leq p_a < p_b < p_c < 1$, 产生一个随机整数 $level\ num \in (0, 4]$ 和一个随机实数 $r \in [0, 1]$ 。

(2) 当 $0 \leq r < p_b$ 时, 属于在网络中增加新边的情况, 它包

括两种类型:

1) 当 $0 \leq r \leq p_a$ 时, 增加新节点, 根据 $level\ num$ 值区别不同类型的新增节点, 新边连接规则如下:

当 $level\ num=1$ 时, 表示新增节点为第一层的企业节点, 它只能选择和第二层的企业节点建立连接; $level\ num=2$ 时, 表示新增节点为第二层的企业节点, 它可以选择和第一层、第三层的企业节点建立连接, 依次类推。该规则体现了同行竞争的关系。

2) 当 $p_a < r \leq p_b$ 时, 在老节点间建立连接, 模拟网络中老企业之间的新业务往来, 以及同行企业之间的竞争合作关系。

(3) 择优选择: 在第 t 个时间步, 新增节点 (无论该节点的类型) 选择与网络中已存在的 m_i 个不同的老节点进行权重为 $g(t)$ 的连接。被选择的节点 i 与新节点连接的概率为: $\Pi_i = \frac{I_i}{\sum_i I_i} = \frac{\alpha s_i + (1-\alpha) k_i}{\sum_i \alpha s_i + (1-\alpha) k_i}$ 。经过 t 个时间间隔后, 便会形成一个有 $N \leq N_0 + t$ 个节点、 $M \leq \sum_i m_i t \leq N_0 t$ 条边的网络。

(4) 当 $p_b < r < 1$ 时, 模拟企业从网络中退出或是业务结束的情况, 包括两种形式:

1) 当 $p_b < r \leq p_c$ 时, 在网络中随机选择两个节点, 将它们之间的连接边去掉, 模拟两个企业之间业务往来中断的情况。

2) 当 $p_c < r < 1$ 时, 在网络中随机选择一个节点, 将它和其他节点的所有连接边去掉, 模拟该企业从网络中退出。

(5) 模拟终止条件: 网络中的节点达到预期的 N 个。

4 实验分析

本实验在 MATLAB7.0 环境下进行。设置初始网络模型为 $m_0=4$ 个节点构成线性的供应链网络, 即网络中每类节点各一个, 彼此之间进行关联; 通过实验调整网络参数设置, 得到参数为: $p_a=0.9, p_b=0.94, p_c=0.95$ 时模型效果比较好, 以下实验都在此参数设置的情况下进行。网络的仿真时间设为 $N=4000 \sim 6000$ 个时间步长, 权值取随机数, $w_i \in (0, 1)$ 。为了消除仿真过程中随机因素产生的影响, 对每一仿真过程都进行了 10 次独立的仿真, 再将结果取平均值。

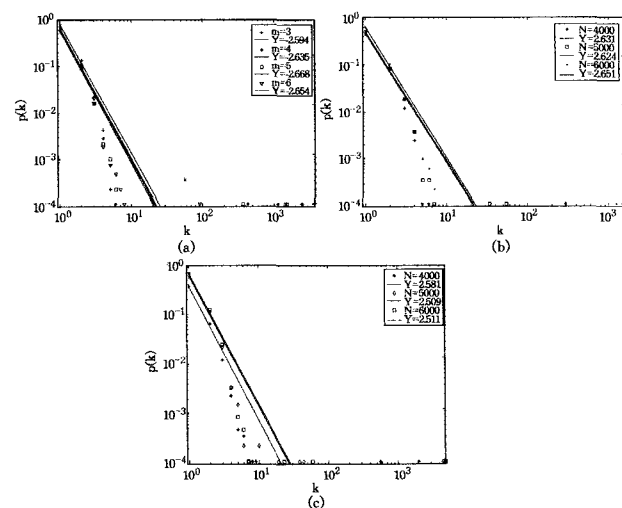


图 3 不同情况下的度分布

对于本模型度分布, 我们做了不同因素情况下的实验, 结果如图 3 所示, 图(a)中考虑 N 值固定, 不同的 m_i 值对模型中节点度分布的影响; 图(b)中考虑新增节点的度固定, 设置 $m_i=5$, 不同的时间步长 N 对模型中节点度分布的影响; 图

(c)中新增节点的度取随机值,设置 $m_i \in (0, 5]$,不同时间步长 N 对模型中节点度分布的影响。

由图可见:

(1)演化网络模型节点度分布服从幂律分布,具有“无尺度”的特征。

(2)BA 模型得出的幂律分布的指数范围不太符合实际情况,而实验中拟合 $p(k) \sim k^{-\gamma}$,获得 $\gamma \in [2.5, 3)$,本模型得出的幂律指数在(2,3)范围内变动,能够很好地模拟供应链网络的实际情况。

(3)在上述 3 种情况下获得的度分布情况比较类似,可以得出结论,当 N 值固定时, m_i 值对度分布影响比较小;当 N 不固定时, m_i 设置为固定值还是随机值对度分布影响也比较小。

m_i 取固定值 5,当网络规模 $N \in [1000, 5000]$ 时,网络集聚系数统计结果以及平均路径长度 L 的关系曲线分别如图 4、图 5 所示。

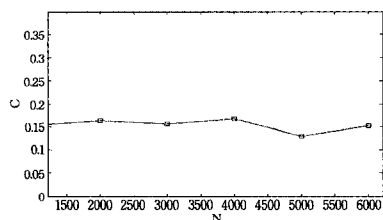


图 4 网络模型的集聚系数统计结果

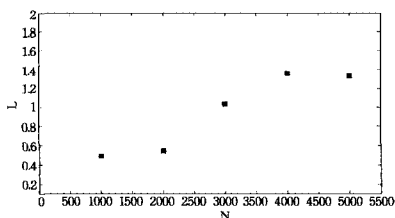


图 5 网络规模 N 与平均路径长度 L

图中显示了不同 N 值的情况下,演化得到的网络模型集聚系数的统计结果,其显示了不同网络规模的集聚系数变化比较小,可见网络规模对集聚系数没有影响,但整体集聚系数的值都不是很大。而随着网络规模的增大,网络的平均路径长度有一定的增长,但其值变化同样不大。网络模型的这种特性及较大的集聚系数表明了模型具有小世界特性。

结束语 本文以 BA 模型为基础,提出了考虑边权重的分层供应链网络演化模型,以权重值作为演化模型中优先连接的依据之一,并给出了此模型的节点度分布以及集聚系数和平均路径长度等情况。该模型有效地模拟了供应链网络中

企业进入、退出等演化情况,刻画了供应链网络的形成和演化机理。同时得到的供应链网络演化模型具有现实大多数网络所具有的拓扑特性:小的平均路径长度、较大的集聚系数和无尺度的度分布。

参考文献

- [1] Venkatasubramanian V, Katare S, Patkar P, et al. Spontaneous emergence of complex optimal networks through evolutionary adaptation[J]. Computers and Chemical Engineering, 2004, 128(9): 1789-1798
- [2] Pathak S D, Dilts D M, Biswas G. On the Evolutionary Dynamics of Supply Network Topologies[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2007, 54(4): 662-672
- [3] Langdon C S, Sikora R T. Conceptualizing co-ordination and competition in supply chain as complex adaptive system[J]. Information systems and E-business management, 2006, 4(1): 71-81
- [4] Pathak S D. An investigative framework for studying the growth and evolution of complex supply network [D]. Nashville, Tennessee: Vanderbilt University, 2005
- [5] 郭进利. 供应链型网络中双幂律分布模型[J]. 物理学报, 2006, 55(8): 3916-3921
- [6] 郭进利. 老节点间有相互连接的供应链有向网络[J]. 系统管理学报, 2007, 16(3): 337-344
- [7] 于海生, 赵林度, 来向红. 基于交易量的供应链网络演化模型演技[J]. 管理学报, 2009, 6(2): 187-191
- [8] 朱冰心, 胡一屹. 基于复杂网络理论的供应链应急管理研究[J]. 供应链管理, 2007, 26(11): 147-150
- [9] 张纪会, 徐军芹. 适应性供应链的复杂网络模型研究[J]. 中国管理科学, 2009, 17(2): 76-79
- [10] 陈晓, 张纪会. 复杂供需网络的局域演化生长模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5(1): 54-60
- [11] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286: 509-512
- [12] Barabási A L, Albert R, Jeong H. Mean-field theory for scale-free random networks[J]. Physica A, 1999, 272: 173-187
- [13] Medina A, Matta I, Byers J. On the origin of power laws in internet topologies[J]. ACM Computer Communication Review, 2000, 31(2): 18-34
- [14] Fu R L, Michael J S. Reengineering the Order Fulfillment Process in Supply Chain Networks[J]. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 1998, 10(3): 197-229
- [15] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442
- [16] (上接第 240 页)
- [9] Xu Wei-tao, Xu Yang, Li Tian-rui. The Structure of Generalized Literals in Linguistic Truth-Valued Propositional Logic Systems [C]//2009 International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering. Hasselt, Belgium, Nov. 2009: 631-636
- [10] Xu Y, Liu J, Ruan D, et al. Determination of α -resolution in lattice-valued first-order logic LF(X) [J]. Information Science, 2011, 181(10): 1836-1862
- [11] Xu Y, Liu J. Theories and Approaches to Treat Incomparability [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2011, 7027: 16-17
- [12] Zhong X M, Liu J, Chen S W, et al. α -Quasi-Lock Semantic Resolution Method for Linguistic Truth-Valued Lattice-Valued Propositional Logic $L_{V(n \times 2)} P(x)$ [C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering. Shanghai, China, 2012, 122: 159-169
- [13] Lu Zhi-rui, Augusto J, Liu Jun, et al. A Linguistic Truth-Value Temporal Reasoning (LTR) System and Its Application to The Design of an Intelligent Environment [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2012, 5(1): 173-196