

网络的策略演化模型及其 在知识交流网络结构仿真中的应用*

谢吉亮, 彭 灿, 王燕夷

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 210016)

摘要: 为了验证网络战略演化模型能够生成呈现大部分真实社会网络主要结构特性的网络,并探索知识缄默性对网络结构的影响规律,为此,引入空间动态连接模型来描述代理人之间连接的策略模式,运用时间非齐次的马尔可夫随机过程来刻画网络动态演化过程,进而利用动力学仿真研究知识缄默性对网络结构的影响规律。结果显示,当衰减参数处于区间 $[0.35, 0.7]$ 时,网络呈现集聚性,并且只有很少的代理人维持长连接;当代理人之间连接成本呈正态分布时,度的分布是非对称的。事实上,此时的网络呈现出了小世界特性。

关键词: 策略演化模型; 时间—非齐次马尔可夫随机过程; 知识转移; 小世界网络

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)05-1795-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.051

Network strategic evolution model and its application to structure simulation of knowledge-sharing network

XIE Ji-liang, PENG Can, WANG Yan-yi

(College of Economics & Management, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to verify that the network evolution model can generate the networks that had the major structural characteristics of most real social network, and explored the law that tacit knowledge impacts on the network structure, this paper introduced the spatial dynamic model to describe the connection link between the strategy of the agent model, and made use of time nonhomogeneous Markov random process to characterize the dynamic evolution of the network, thus the use of tacit knowledge dynamics simulation study of the influence of the network structure. The result shows, for the decay parameter in the interval $[0.35, 0.7]$, the network shows clustering and only a few agents sustains long links. When the costs of link formation were normally distributed across agents, asymmetric degree distributions were also obtained. In fact, such networks exhibited the small world property (high clustering and short average path).

Key words: strategic evolution model; time -inhomogeneous Markov stochastic process; knowledge transfer; small-world network

在知识社会中,知识是经济增长的核心要素,知识创新是最基础的创新^[1]。由于知识流动是知识创新的必要条件,知识网络是知识流动的载体^[2],因此,知识网络对于知识创新具有至关重要的作用。但是,一些空网络、星状网络或规则网络均呈现出简单的结构特性,与现实网络相去甚远,因而如何构建更加真实的网络成为当前该领域的研究热点与重点。为此,本文提出了网络的策略演化模型来构建具有大部分真实社会网络主要结构特性的网络。

知识网络(如R&D合作网^[3])往往由参与的代理人策略性构建,其网络结构对许多社会和经济活动的成果有着显著影响^[4,5]。Allen^[6]和 Hippel^[7]曾指出研发活动并非孤立的个人行为,而是团队成员间互动与合作的过程,人际关系网络在改善和促进知识转移方面起着关键作用。Cowan等人^[8]论证了个体间的连接促进知识的溢出,知识的流动随着路径长度的增加而急剧下降。杨玉兵等人^[9]指出不同的网络结构对知识转移的作用不同。前人的研究重在解释网络结构如何影响知识

扩散,而与之相反的一个重要问题——被转移的知识的特性(如缄默性)究竟会否及如何影响知识网络的结构?国内外学者迄今还鲜有研究者。本文将在网络的战略演化模型的基础上,利用动力学仿真来研究知识缄默性对网络结构的影响规律,从而为优化知识网络结构提供数量分析基础。

1 网络的战略演化模型

1.1 模型中网络的数学表示

考虑有 n 个代理人的有限集合 $N = \{1, 2, \dots, n\} (n \geq 3)$,非定向网络中的节点表示代理人,边表示连接。 $\forall i, j \in N, ij$ 表示代理人 i 和 j 之间的连接。一个网络 g 包含代理人和无序连接。若 $\{ij\} \in g$,表示 ij 在 g 中存在。完全网络 $g^N = \{ij | i, j \in N\}$ 意味着任何代理人都与剩余的所有代理人连接。定义 $G = \{g \subseteq g^N\}$ 表示集合 N 上任意可能网络的集合。 $g_1 = g \cup \{ij\}$,表示在网络 g 的基础上增加连接 $ij, g_2 = g \setminus \{ij\}$ 表示在

收稿日期: 2011-09-04; 修回日期: 2011-10-08 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70972073); 航空科学基金资助项目(2009ZG52066); 江苏省高校哲学与社会科学重点研究项目(2010ZDIXM027)

作者简介: 谢吉亮(1987-),男,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向为知识管理(xjl0512107669@163.com); 彭灿(1962-),男,湖南长沙人,教授,博导,主要研究方向为创新管理、知识管理、工业工程等; 王燕夷(1986-),女,江苏无锡人,硕士研究生,主要研究方向为创新管理。

网络 g 的基础上删除连接 ij 。对于任何网络 g , 定义 $N(g) = \{i | \exists j: ij \in g\}$ 为至少存在一个连接的代理人的集合, $N_i(g) = \{j | \exists j: ij \in g\}$ 为代理人 i 的邻居的集合。节点 i 的度 $\eta_i(g) = \#N_i(g)$, 网络 g 中连接的总数 $\eta(g) = \#g$, i 到 j 的路径的集合 $i \leftrightarrow j$, 最短路径的集合为 $i \overset{\leftarrow}{\rightarrow} j$ 。路径的长度为其所包含连接的数量, $\forall k \in i \overset{\leftarrow}{\rightarrow} j$, 则最短路径长 $\#k = \min_{h \in i \overset{\leftarrow}{\rightarrow} j} \#h$ 。代理人 i 和 j 之间的路径长度为连接 i 和 j 的最短路径上连接的数量, 即 $d(i, j) = \#k$ 。当 i 和 j 之间没有路径时, $d(i, j) = \infty$ 。

代理人在给定空间上的确定位置代表着现实中的地理位置。首先以固定的间隔把代理人分配到一个圈上。代理人 i 和 $i+1$ 是地理上直接连接的邻居, 除此之外还有代理人 1 与 n 。代理人 i 和 j 沿圈上的最少间隔数为 $l(i, j) = \min\{|i-j|; n - |i-j|\}$ 。不失一般性, 假定距离最远的代理人在圆的一条直径上, 则代理人 i 和 j 的距离 $s_{ij} = l(i, j) [\frac{n}{2}]^{-1}$ 。其中, $[\frac{n}{2}]$ 为大于等于 $\frac{n}{2}$ 的最小整数。可见, 代理人 i 和 j 的距离和代理人数 n 呈负相关。代理人在固定的圆上是均匀间隔的, 人口密度越大, 间隔越小。

1.2 空间动态连接模型

英国哲学家波兰尼于 1958 年在《个体知识》一书中首次提出了缄默知识的概念, 他把知识分为显性知识和缄默知识。显性知识是指可以用语言文字来表示的知识; 缄默知识是指以整体经验为基础的只可意会不可言传的知识, 是一种经常使用却又不能通过语言文字符号予以清晰表达或直接传递的知识。知识的缄默程度越高, 转移起来就越困难; 反之, 知识的缄默程度越低, 转移起来就越容易。在模型中, 代理人通过知识流动来获利, 但知识流动并不是完美的, 知识转移的质量随路径长度的增加急剧下降^[10]。知识转移质量在形式上用衰减参数来表示, 与知识缄默性息息相关。在给定的网络中, 代理人承担维持直接连接的费用, 但无法策略性地控制知识的流动。长连接和短连接同样有效, 但长连接需要更多地维护成本, 这些长连接也称之为“弱关系”^[11] 或是“桥连接”^[12]。

代理人 i 从网络中获取的利润为

$$\Pi_i(g) = \sum_{j \in N_i} \delta^{d(i,j)} \omega_{ij} - \sum_{j: ij \in g} c_{ij}$$

其中: $d(i, j)$ 为代理人 i 和 j 之间的路径长度; c_{ij} 为代理人 i 与 j 连接所承担的成本; ω_{ij} 为代理人 i 从代理人 j 获取知识的内在价值。为便于分析, 假设 ω_{ij} 对所有的代理人都是固定的、标准化的: $\forall i \neq j: \omega_{ij} = \omega = 1$ 。衰减参数 $\delta \in [0, 1]$ 表示知识的缄默性, δ 越大表示知识缄默程度越低; δ 越小表示知识缄默程度越高。代理人 j 对代理人 i 利润的积极影响 $\delta^{d(i,j)}$ 随着路径长度 $d(i, j)$ 的增加而急剧减小。特别地, 代理人 i 与 j 之间没有路径, 即 $d(i, j) = \infty$, 则 $\delta^{d(i,j)} = 0$ 。

代理人根据从网络中所获取的利润大小来决定是否建立、维护或断开连接。网络 $g_t \in G$ 表示网络在 $t (t = 1, 2, \dots)$ 时期的状态。在每个时期, 代理人 i 和 $j (i, j \in N)$ 根据各自在网络中获取的利润来作出决定。若已建立连接, 则他们可以共同决定维护或是单方面断开连接; 若没有建立连接, 则可以共同决定建立或是单方面反对建立连接。符号表达如下:

- a) 当 $ij \in g_t$ 时, 若 $\Pi_i(g_t) \geq \Pi_i(g_t - ij)$ 且 $\Pi_j(g_t) \geq \Pi_j(g_t - ij)$, 则维护连接; 反之, 则断开连接。
- b) 当 $ij \notin g_t$ 时, 若 $\Pi_i(g_t + ij) \geq \Pi_i(g_t)$ 且 $\Pi_j(g_t + ij) \geq \Pi_j(g_t)$, 则建立连接。

(g_t), 则建立连接。

1.3 演化机制

系统在任何时间 t 的演化只取决于网络 g_t 目前的状态, 所以此过程为 Markov 随机过程。系统 $\{g_t, t > 0\}$ 的演化可以通过概率矩阵 P 来描述, 概率矩阵中的元素为有限状态空间 G 上所有可能转移状态间的一步转移概率。Jackson 等人^[13] 引入随机扰动 $\bar{\varepsilon} (\bar{\varepsilon} > 0)$ 来表示对代理人作出正确决定 (建立、维护或断开连接) 的干扰, 这些扰动可能理解为失误或是突变。对于任意小但非零的 $\bar{\varepsilon}$, 离散时间马尔可夫链的转移过渡矩阵 $P(\bar{\varepsilon})$ 是不可约和非周期的, 因此具有唯一的平稳分布 $\mu(\bar{\varepsilon})$, 即 $\mu(\bar{\varepsilon}) \times P(\bar{\varepsilon}) = \mu(\bar{\varepsilon})$ 。所以, 这种随机扰动过程是遍历的。显然, 任何可能直接或间接转移的两个状态之间, 遍历性在足够长的时间内总能发生。通常, 如果极限平稳分布 $\mu^* = \lim_{\bar{\varepsilon} \rightarrow 0} \mu(\bar{\varepsilon})$ 存在非零概率, 那么状态 g 为随机稳定状态^[14]。因此, 随机稳定状态的集合 $G^* = \{g \in G | \mu_g^* > 0\}$ 。在网络演化背景下, $G^* = \{g \in G | \mu_g^* > 0\}$ 为稳定网络的集合。

在实践中, 扰动并不是固定不变的, 往往随着时间的延长而逐渐减小, 因此上述的标准 Markov 随机过程并不令人满意。在此, 设定随机扰动 $\varepsilon_t = 1/(t+1) + \bar{\varepsilon} (\bar{\varepsilon} > 0)$ 。此规则确保演化过程之初有一个显著的噪声影响, 而且噪声随时间增加单调递减, 直到 $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_t = \bar{\varepsilon}$ 。Robles 论证了时间非齐次的 Markov 链长期均衡分布 $\psi(\bar{\varepsilon})$ 是存在的且唯一, 等于含有固定扰动 $\bar{\varepsilon}$ 的 Markov 链的均衡分布, 即 $\psi(\bar{\varepsilon}) = \mu(\bar{\varepsilon})$, 显然时间非齐次的 Markov 链也是遍历的。代理人随着时间的推移犯错误的概率越来越小, 但在长期仍有一个非常小的犯错概率存在, 因此噪声的时间非齐次设定比时间齐次更加合理。

在长期演化过程中形成的稳定网络 g 的集合 $\hat{G} = \{g \in G | \psi_g(\bar{\varepsilon}) > 0\}$ 。对于任何 $g \in \hat{G}$, 若 $\lim_{\bar{\varepsilon} \rightarrow 0} \psi_g(\bar{\varepsilon}) > 0$, 则 $\psi_g(\bar{\varepsilon}) > 0$ 。因此, 集合 $\hat{G} = \{g \in G | \psi_g(\bar{\varepsilon}) > 0\}$ 包含上述集合 $G^* = \{g \in G | \mu_g^* > 0\}$ 。

2 仿真分析

本章以时间非齐次 Markov 随机过程选择的稳定网络为研究对象, 用 Monte Carlo 实验生成网络。误差项限定为 $\bar{\varepsilon} = 10^{-4}$, 网络规模 $n = 20$, 对于较大范围的衰减参数 δ 来说, 此值使网络达到局部连通是足够高的。所有的实验在 $T = 20\ 000$ 时停止, 该进程后证实给定的随机稳定网络已经达到稳态。衰减参数 δ 解释为知识转移的质量, 通过衰减参数 δ 来研究稳定网络的结构特性, 为此在区间 $[0, 1]$ 上随机选择 1 500 个参数值进行实验。

2.1 知识转移与网络平均度

平均度是网络的结构特性之一, 是用来描述网络中每个代理人邻居的平均数目。数学表达式为: $\bar{\eta}(g) = 2\eta(g)/n$ 。由图 1 可以看出, 随着衰减参数 δ 的增大, 网络平均度出现了显著的变化。当 $\delta < 0.1$ 时, 平均度为零, 演化网络收敛于空网络; δ 趋向于 0.1 时, 演化网络开始由空网络向平均度为 2 的网络过渡; 当 $\delta \in [0.1, 0.2]$ 时, 演化网络几乎都变成平均度为 2 的网络; 当 $\delta = 0.55$ 时, 网络平均度接近于 6; 当 $\delta \in [0.6, 1]$ 时, 平均度随着 δ 的增大而减小; 当 $\delta = 1$ 时, 网络平均度降为 2。

知识转移质量与知识的特点紧密相关, 知识缄默程度越

高,知识转移质量越差;知识编码程度越高,知识转移质量也越高。当知识高度缄默(即 δ 趋于 0)或知识高度编码(即 δ 趋于 1)时,演化网络是弱连接的,由于此时长连接或局部短连接的边际收益都不足以弥补其成本。当知识的转移质量非常高时,代理人不需要建立直接连接,因为间接连接几乎同样有效;相反,当知识转移质量比较低时,由于知识源的数量较少,导致仅有廉价的短连接形成,所以在这两种情况下只会有微型连接网络出现,当知识极其缄默时,网络中没有连接形成;当知识既不高度编码又不高度缄默时,代理人通过知识流动获得收益足以弥补其维护连接的成本,网络具有较高的平均度。因此,该模型提供了一种通过知识属性预测网络密度的有效方法。

2.2 知识转移与小世界网络

从图 1 的背后会发现许多结构不同的网络,网络的多样性要求用统计分析来研究稳定网络的结构特性。为此,需要计算两个专用指标:

a) 网络的平均路径长度:

$$d(g) = \frac{\sum_{i \neq j} d(i, j) \times I(i \leftrightarrow g^j)}{\#\{(i, j) \mid i \neq j \in N, i \leftrightarrow g^j \neq \emptyset\}}$$

b) 平均集聚度:

$$C(g) = \frac{1}{n} \sum_{i \in N, n_i > 1} \frac{\#\{j \in g \mid j \neq i \in N_i(g)\}}{\#\{(j, l) \mid j \neq l \in N_i(g)\}}$$

其中:示性函数 $I(i \leftrightarrow g^j) = \begin{cases} 1 & i \leftrightarrow g^j = \emptyset \\ 0 & i \leftrightarrow g^j \neq \emptyset \end{cases}$, $\#\{\cdot\}$ 表示集合中元素的个数。

以上两个指标都受网络平均度 $\hat{\eta}(g)$ 的影响,因而其数值是有偏差的,因此找出一种控制平均度的方法是十分必要的。Watts 等人^[15]认为应该把可控随机图与具有相同数量代理人和连接的演化网络联系起来,通过分配一定数量的边并随机选择成对的代理人构建随机网络。对于每个给定边数的网络,网络的平均路径长度和平均集聚度便可以计算出来,然后计算出 1000 个网络的平均距离和平均集聚度的均值。对于演化网络 g , 计算比率 $\frac{c(g)}{c(g^{rd})}$ 和 $\frac{d(g)}{d(g^{rd})}$ 。其中, $c(g^{rd})$ 表示 1 000 个具有相同平均度随机网络的平均集聚度的均值, $d(g^{rd})$ 表示 1 000 个具有相同平均度随机网络的平均路径长度的均值。这两个比率常用于识别特定的但频繁被观测的网络结构——小世界网络。该网络具有如下两个特性:

$$\frac{c(g)}{c(g^{rd})} \gg 1 \text{ 和 } \frac{d(g)}{d(g^{rd})} \approx 1$$

与随机网络相比,小世界网络具有高集聚性,而且平均路径长度接近于随机网络的平均路径长度,均较短。实验结果如图 2 所示。

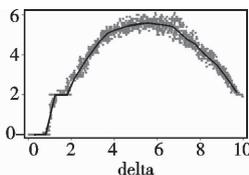


图1 随机选择的1500个衰减参数值 $\delta \in [0, 1]$ 所对应的网络平均度分布

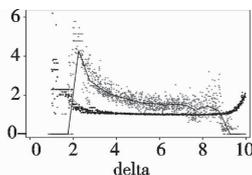


图2 随机选择1500个衰减参数值所对应的网络平均路径长度比率(黑点表示)、平均集聚度比率(灰三角表示)及其拟合曲线

经观测,当 $\delta \in (0.35, 0.7)$ 时,演化网络的平均路径长度接近于单位 1。当 $0.2 < \delta < 0.7$ 时,平均集聚度比率随衰减参数的增大而急剧下降,而且在 $\delta = 0.7$ 时,演化网络的集聚度仍显著

高于相应的随机网络。因此,当 $\delta \in [0.35, 0.7]$ 时,知识流动网络会呈现小世界特性——高集聚性和短的平均路径长度。

2.3 稳定网络的空间结构

本节研究稳定网络的空间结构问题。图 3 就衰减参数 δ 的若干值提供了与之对应的网络结构。当 $\delta \in [0.09, 0.2]$ 时,知识转移网络常常类似于圈(在图 1 中,对应的平均度为 1;在图 2 中,平均集聚度为 0),每个代理人几乎只与两个最近的邻居相连。当 $\delta = 0.3$ 时,网络中的所有代理人都连接到四个较近的邻居,此结构类似于环。当 δ 接近于单位 1 时,代理人在直接或间接连接上的获利可能相同,从而重叠的连接变得多余,此时网络倾向演化成最大链。当 $0.35 \leq \delta \leq 0.7$ 时,这些网络结构上的共同点为局部短连接盛行并且存在长连接。

为了对演化网络中的连接进行相关的系统分析,本文研究了直接连接的密度分布 $p(h)$, 定义为 $p(h) = \frac{1}{\eta(g)} \sum_{i \in g} 1_{\{l(i, j)=h\}}$ 其中, $h = 1, \dots, [n/2]$ 。当演化网络具有小世界结构时,为了探索连接的密度分布,分别对 $\delta = 0.35, 0.5, 0.7$ 作 100 个数值实验。图 4 中展示了对于每个衰减参数 δ 值,连接的平均密度分布。显然,网络结构与路径长度相关。经观测,占 70% ~ 80% 连接的长度最多不超过两个间隔,换言之,70% ~ 80% 连接均为局部的短连接,从而局部空间网络呈现集聚性。同时,网络中也存在长连接,长连接使得密度分布 $p(h)$ 是拖尾的。当连接的长度大于或等于 3 时,连接倾向于减小网络的平均路径长度。具有四个间隔长度的连接的概率密度明显减小,尤其在 $\delta = 0.5$ 和 $\delta = 0.7$ 时。代理人认为建立中等路径长度的连接是无利可图的,因为他们可以通过一个中间代理人间接地从目标代理人那里获利,然而他们更倾向于与集聚范围以外的代理人建立连接,所以长连接并不是在任何距离和成本下都能维持的,但可以由一些战略行为来驱动^[14]。



图3 衰减参数值为0.15、0.3、0.35、0.7、0.98时分别对应的网络结构图

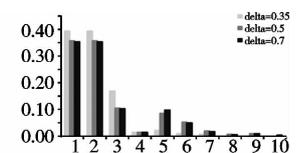


图4 衰减参数 $\delta \in \{0.35, 0.5, 0.7\}$ 分别对应的网络中连接的密度分布

长连接是网络呈现小世界性的必要条件,同时长连接也是昂贵的。但为什么某些代理人会承担如此昂贵的费用? 为了回答此问题,笔者分别记录了 $\delta \in \{0.35, 0.5, 0.7\}$ 时个体的利润 π_i 和 l_i , 代理人 i 最长连接的间隔数量 $l_i = \max_{j \in N_i(g)} l(i, j)$ 。由图 5 可知,当代理人维持一个大于或等于四个间隔的连接时,个体利润在平均上是减小的,因此从长远来看,代理人不愿意支付维持长连接的成本,特别是长连接非常长时。但是对于任何存在的长连接,相比没有此长连接时,代理人的利润仍是增加的,那么维持此长连接还是有利的。

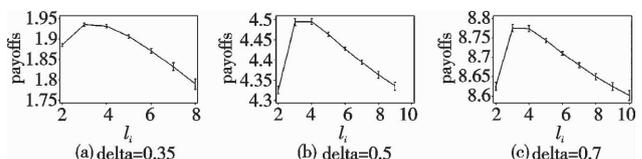


图5 衰减参数 $\delta \in \{0.35, 0.5, 0.7\}$ 时 l_i 对个体利润 π_i 的影响

事实上,代理人之所以维持长连接,是因为代理人可以在此长连接上获利。然而,代理人并不能占有长连接产生的全部社会价值,这些社会价值很大程度上被当地网络中代理人的邻

居所占有。显然,他们间接地从长连接上获利,但他们不会承担高昂的连接成本,他们是免费乘车者。

2.4 代理人异质性和度分布

现实社会网络的度分布通常是不对称的,网络中许多代理人只有很少的连接,而非非常少的代理人有很多连接。在代理人同质模型中,代理人没有动力形成很多连接而形成一个星状网络,这也是在大多数现实网络中没有发现很多稠密连接代理人的原因。因此,本文来探讨对支付函数稍作修改是否可以增加代理人度之间的差异?代理人的正态异质性可以产生偏度分布吗?代理人承担的连接成本是异质的,则支付函数变为

$$\pi_i(g_i) = \sum_{j \in N \setminus i} \delta^{d(i,j)} \omega_{ij} - a_i \sum_{j:ij \in g_i} c_{ij}$$

其中: $\omega_{ij} = \omega = 1$ 且 $a_i > 0$, 意味着两个代理人建立连接所承担的成本($a_i c_{ij}$ 与 $a_j c_{ij}$)不同。假设 a_i 是服从高斯分布且相互独立的,度分布 $\rho(k)$ 表达式为

$$\rho(k) = \frac{1}{n} \sum_{i \in N(g)} 1_{\{\eta_i(g) = k\}} \quad k = 0, \dots, n - 1$$

对于 $\delta = 0.35, 0.5, 0.7$, 各增加 100 次数值实验,并分别计算平均的度分布。图 6 所示展示了同质代理人模型的平均度分布。不难发现,在代理人同质模型中大部分代理人都有 4、5 或 6 个连接,而在异质模型中度分布变得更加分散。果不其然,连接成本低的代理人倾向于形成多个连接,并且形成了非对称的拖尾的度分布。虽然本文研究的是有限代理人网络,但得到的结论与经常观测的大部分社会网络是一致的。此外,在异质代理人模型(由于篇幅限制未予展示)中,当 $\delta \in [0.35, 0.7]$ 时演化网络呈现小世界性。至此,小世界网络的三个特性(短平均路径、高集聚性和偏度分布)在演化稳定网络中均得到呈现。

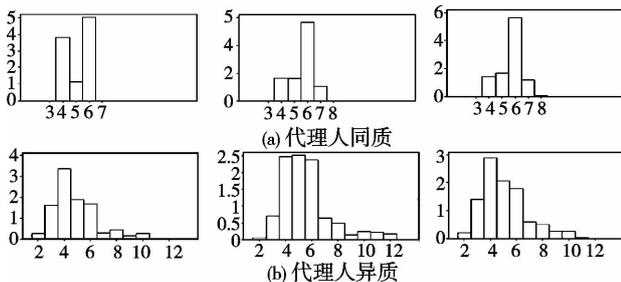


图6 衰减参数 $\delta \in \{0.35, 0.5, 0.7\}$ 时节点的度分布

3 结束语

本文将复杂网络理论和基于博弈论的经济网络理论相结合,建立了一个网络的策略演化模型。在模型中,代理人根据维持连接的成本和通过连接获取的知识收益来决定是否建立、维持或断开连接,利用时间非齐次的马尔可夫随机过程来研究网络长期演化中的结构特性。研究表明,当 $\delta \in [0.35, 0.7]$ 时,演化网络呈现小世界特性。由于维持短连接的成本较低,代理人倾向于建立短连接,从而网络呈现集聚性。这与知识网络中的连接大部分都是在本地建立^[16]是一致的。反过来,产生较高的本地知识扩散水平,促进当地的知识创新。长连接的形成导致了较短的平均路径长度,成本高昂的长连接可以从其他局部网络中获取可观的回报,如长连接可以提高找到工作^[14]、产生好点子^[17]、获得晋升机会^[18]的概率。然而,维持长连接的代理人通常是被锁定的,他们的网络回报往往低于此长连接上的免费乘车者。这也说明了只有少量长连接的原因:

维持长连接的代理人的邻居没有动力去和已经间接受益的网络中的代理人建立连接,从而抑制了更多长连接的形成。此外,在连接成本方面,考虑代理人异质性的影响,演化网络的度分布为非对称的。因此,当衰减参数 $\delta \in [0.35, 0.7]$ 时,网络呈现较短的平均距离、高集聚性和非对称的度分布。

根据系统科学的观点,研究事物的结构与功能,目的是认识事物运动发展的规律,为系统预测和决策提供理论依据^[19]。由于网络的结构与功能是相辅相成的,知识缄默性对网络结构产生了显著影响,必然影响到网络功能。网络结构的变化通常是为了更有效的知识流动,然而,这一变化过程会浪费大量的时间和费用。网络参与者完全可以通过预测网络结构的变化,提前作出正确的决策,降低网络结构调整的成本。本文对知识缄默性如何影响网络结构的研究,为网络结构的预测、决策及优化提供了数量分析基础。

参考文献:

- [1] DAVID P A, FORAY D. An introduction to the economy of the knowledge society [J]. *International Social Science Journal*, 2002, 54(171):9-23.
- [2] ALLEN J, JAMESAA D, GAMLEN P. Formal versus informal knowledge networks in R&D: a case study using social network analysis [J]. *R&D Management*, 2007, 37(3):179-196.
- [3] GOYAL S, MORAGA J L. R&D networks [J]. *RAND Journal of Economics*, 2001, 32(4):686-707.
- [4] JACKSON M O, WOLINSKY A. A strategic model of social and economic networks [J]. *Journal of Economic Theory*, 1996, 71(1):44-74.
- [5] BALA V, GOYAL S. A non-cooperative model of network formation [J]. *Econometrica*, 2000, 68(5):1181-1229.
- [6] ALLEN R C. Collective invention [J]. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 1983, 4(1):1-24.
- [7] Von HIPPEL E. Cooperation between rivals: informal know-how trading [C]// *Proc of Industrial Dynamics, Technological, Organizational and Structural Changes in Industries and Firms*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1989:157-176.
- [8] COWAN R, JONARD N. The dynamics of collective invention [J]. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 2003, 52:513-532.
- [9] 杨玉兵, 胡汉辉. 网络结构与知识转移 [J]. *科学与科学技术管理*, 2008(2):123-127.
- [10] SINGH J. Collaborative networks as determinants of knowledge diffusion patterns [J]. *Management Science*, 2005, 51(5):756-770.
- [11] GRANOVETTER M S. The strength of weak ties [J]. *American Journal of Sociology*, 1973, 78(6):1360-1380.
- [12] BURT R. Structural holes: the social structure of competition [M]. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1992.
- [13] JACKSON M O, WATTS A. The evolution of social and economic networks [J]. *Journal of Economic Theory*, 2002, 106(2):265-295.
- [14] GRANOVETTER M. Getting a job: a study of contact and career [M]. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1974.
- [15] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small worlds' networks [J]. *Nature*, 1998, 393(6684):440-442.
- [16] SINGH J. Collaborative networks as determinants of knowledge diffusion patterns [J]. *Management Science*, 2005, 51(5):756-770.
- [17] BURT R. Structural holes and good ideas [J]. *American Journal of Sociology*, 2004, 110(2):349-399.
- [18] BURT R. The contingent value of social capital [J]. *Administrative Science Quarterly*, 1997, 42(2):339-365.
- [19] 陈忠. 系统科学学 [M]. 上海: 上海科技文献出版社, 2004.