

综合节点异质性、删除及 DPA 的网络演化模型^①

胡平, 王文, 刘志华
(西安交通大学管理学院, 西安 710049)

摘要: 曾分别研究节点适应度的择优连接、节点的删除及两端择优连接(double preferential attachment, DPA) 3种网络演化机制, 在现实网络中它们显著并存, 文章构建综合这3种机制的网络演化模型, 并对该模型进行数理推导, 求出度分布, 而且将经典的 BA 网络一般化. 结果显示, 建立的综合模型具有无标度特性, 3种演化机制对网络的度分布具有不同的影响, 且利用仿真方法验证了结果.

关键词: 节点异质性; 节点删除; DPA; 网络演化

中图分类号: C94 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2011)08-0001-07

0 引言

近年来, 针对复杂网络尤其是其形成与演化的相关研究成果累累, 复杂网络理论作为新兴的理论已经成为学术界的研究热点, 推动着复杂系统科学^[1]的发展. 复杂网络理论的特点是通过探讨网络演化的基本机制, 来模仿网络的动力学特性以及网络个体的行为, 对网络的演化进行模拟实现, 从而探讨各种因素对网络演化的影响.

虽然对于复杂网络演化的各种机制已有很多研究^[2], 但现实中也有很多问题用现有的复杂网络理论并不能解释. 例如, 在信息产业的企业技术合作网络中, 企业的技术能力是不同的, 随着发展, 有的企业会消亡, 有的企业之间会建立新的技术合作关系, 那么如何研究此技术合作网络的演化问题? 用现有的模型不能很好地表达. 本文主要基于构建节点异质、带有删除和 DPA 机制的网络演化综合模型, 并对其进行数理推导, 将经典的 BA 网络一般化. 基于推导结果, 探讨节点适应度分布、节点删除以及 DPA 机制分别对网络演化中

度分布的影响, 并利用仿真对其进行验证.

1 理论综述

Barabasi 和 Albert^[3]提出了 BA 网, 也就是无标度网络理论, 这是公认的 1999 年社会网络研究领域最有影响力的创新理论, 开创了复杂网络研究的新局面. BA 网建立了增长与择优连接两个机制, 成功模拟出了无标度网络. 在经典 BA 网中, 老的节点由于有更多的得到连接的时间, 因此会有更大的连接. 这种现象的结果就是富者愈富^[4], 而同时加入的两个节点除去统计浮动后其期望度数是一样的. Bianconi 和 Barabasi^[5]提出由于每个节点都有靠消耗其他节点而竞争获得边的本能, 实际网络具有竞争势态, 所以, 他们提出了 fitness 模型, 首先关注到了节点异质性.

同时, 现实网络的演化中还有很重要的一个现象——节点的死亡. 例如社会网络中人的死亡, 企业网络中企业的破产倒闭等, 这些都是网络增长的限制因素. 一些研究者也在其演化模型中考虑了这个机制^[6-10], 然而在 fitness 模型这种节点

① 收稿日期: 2009-07-27; 修订日期: 2010-02-23.

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(10BGL032); 中国工程院信息与电子工程学部咨询资助项目.

作者简介: 胡平(1961—), 女, 江苏无锡人, 博士, 副教授. E-mail: huping@mail.xjtu.edu.cn

异性的环境中也没有研究删除机制.

而两端择优连接(DPA)^[11]的概念是在建立现存两节点之间的连接时,同时通过择优选择选择这两点,通俗来说就是“强强联合”,而这也是不少现实网络中显著存在的机制,并且可以在节点删除的情况下保护网络度分布的无标度性^[7-8].关于其他的模型扩展还有许多研究^[12-14].

在国内的相关研究中,陶少华等^[15]建立的基于吸引因子的演化模型,及覃森等^[16]建立的具有边连接增长速度的演化模型,分别考虑了节点异质性;李增扬等^[17]建立的内部演化模型考虑了在已有节点之间增加连接等等;还有对于经典BA模型的改进,其中关于节点删除的相关研究较少,也缺少综合考虑这几种机制的研究.在网络仿真的相关研究中,谭劲松等^[18]以5种连接机制建模,仿真研究了集群的演化过程,发现了集群演化的自组织特性.而李鹏翔等^[19]通过对指挥链网络的仿真研究,发现在极端情况下网络才展现无标度特征.

节点异质性、节点删除以及DPA是3个在现实网络^[3,5,20]中显著存在的演化机制,早先提出的网络演化模型对这3个机制均有一定的讨论和分析,然而却没有将这3个机制结合起来进行进一步的研究,缺乏对现实情况中3个机制同时存在的一般性结论.

网络演化动态特性分析方法众多,主流方法包括连续域理论^[3],主方程法^[21]以及变化率方程法^[22].而在带有节点删除的模型中,连续域变化率方程法^[23]是最常用的方法.其基本思想是在求出了节点*i*的度*k_i*与时间*t*的关系后,得到在时刻*t*度为*k*的节点的比率,进而求得度分布.它在处理带有节点删除情况的时候非常有效^[6],因此,本文采用连续域变化率方程法作为本文分析的主要理论方法.

2 提出模型

将节点适应度分布、节点删除以及DPA相结合,本文提出的网络演化综合模型基于fitness模型并对其进行改进,具体算法如下

1) 网络初始条件 网络初始时有*m₀*个节点和*e₀*条边;

2) 网络增长 每个时间段,加入1个新的节点*i*,这个*i*拥有1个适应度(fitness) η_i ,这个 η_i 的选择服从某一个适应度分布(fitness distribution) $\rho(\eta)$.节点*i*用其加入网络的时间点*i*来进行标记;

3) 择优连接 新节点会带有*m*条边,这*m*条边会连接到原有的节点上.假设原有点*j*被其连接的概率为 Π_j ,具体形式如下

$$\Pi_j = \frac{\eta_j k_j}{\sum_h \eta_h k_h} \tag{1}$$

4) 删除 在每个时间段加入节点*i*后,以概率*c*随机删除一点,以及它所有的边;

5) DPA以概率*b*,加入*m*条边,边两端节点的选择机制均基于 Π_j .

3 模型理论推导

3.1 度的增长速率方程

根据连续域理论,假设节点*i*在时刻*t*仍然存在(某些节点在演化过程中会被删除),则它在时刻*t*度增长速率的期望值为

$$\begin{aligned} \frac{\partial k(i,t)}{\partial t} &= m \frac{\eta_i k(i,t)}{S(t)} - c \frac{k(i,t)}{N(t)} + 2bm \frac{\eta_i k(i,t)}{S(t)} \\ &= (2b+1)m \frac{\eta_i k(i,t)}{S(t)} - c \frac{k(i,t)}{N(t)} \end{aligned} \tag{2}$$

其中*N(t)*表示在时刻*t*网络中存在的节点数目的期望值,有

$$N(t) = (1-c)t \tag{3}$$

*S(t)*表示在时刻*t*存在于网络中的所有节点的适应度与度的乘积之和,表达式为

$$S(t) = \int_0^t D(i,t) k(i,t) \eta_i di \tag{4}$$

*D(i,t)*表示节点*i*仍然存在于网络中的概率,有

$$D(i,t) = \left(\frac{t}{i}\right)^{c-1} \tag{5}$$

以上具体的解法可以参考文献[6].

3.2 自我一致特性验证

在前人的研究中,例如经典BA网络模型^[3]以及带有等概率分布的择优连接模型^[5]中,均认

为节点的度具有自我一致 (self-consistency) 特性, 即 k_i 随时间的演化具有幂率特性, 也就是说 $k(t) \sim t^\beta$. 假设本文模型中的节点度同样有这样的特性, 同时 β 肯定与节点的适应度 η 有关, 得到

$$k_{\eta_i}(i, t) = m \left(\frac{t}{i} \right)^{\beta(\eta_i)} \quad (6)$$

将其带入式(4) 得到

$$S(t) = \int \eta \rho(\eta) m \frac{t - t^{\beta(\eta) + \frac{c}{c-1}}}{1 - (\beta(\eta) + \frac{c}{c-1})} d\eta \quad (7)$$

由于度的成长系数 β 不能大于 1, 否则度的增长会比网络规模增长得更快, 这在长期来说是不可能的. 所以, 当 t 越来越大乃至趋近于 ∞ 的时候, $t^{\beta(\eta) + \frac{c}{c-1}}$ 相对于 t 来说可以被忽略, 得到

$$S(t) \approx mt \int \frac{\eta \rho(\eta)}{1 - c - \beta(\eta)} d\eta \quad (8)$$

假设有 $\Phi = \int \frac{\eta \rho(\eta)}{1 - c - \beta(\eta)} d\eta$, 则当 t 很大

时, 有 $S(t) \approx mt\Phi$ 得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_{\eta}(i, t)}{\partial t} &= (2b + 1) m \frac{\eta_i k_{\eta}(i, t)}{S(t)} - c \frac{k_{\eta}(i, t)}{N(t)} \\ &= \left(\frac{2b + 1}{\Phi} \eta_i - \frac{c}{1 - c} \right) \frac{k_{\eta}(i, t)}{t} \\ &= \beta(\eta_i) \frac{k_{\eta}(i, t)}{t} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $\beta(\eta) = \frac{2b + 1}{\Phi} \eta - \frac{c}{1 - c}$. 自此, 本模型的我一致特性被验证了.

3.3 度分布的确定

当 β 确定后 $P(k)$ 实际上由多个 $\beta(\eta)$ 的取值组成的多个幂率分布构成. 当 1 个 η 确定的时候, 根据 Sarshar^[6] 的计算, 每一个 η 对应的有 1 个幂率指数, 为

$$\gamma(\eta) = 1 + \frac{1}{(1 - c)\beta(\eta)} \quad (10)$$

根据 Bianconi^[5] 对 fitness 模型的计算, 有

$$P(k) \propto \int_{\eta_{\min}}^{\eta_{\max}} \rho(\eta) k^{-\gamma(\eta)} d\eta \quad (11)$$

通过一系列代换, 得到

$$P(k) \propto \int_{\eta_{\min}}^{\eta_{\max}} \rho(\eta) k^{-\left(1 + \frac{\Phi'}{(1+c)(2b+1)\eta-c\Phi'}\right)} d\eta \quad (12)$$

$$\text{其中 } \Phi' = \frac{1 + c}{1 - c} \Phi.$$

在 fitness 模型中 $P(k)$ 由多个幂率分布重叠而来, 但是实际上 $P(k)$ 受其中最大的 η 的影响最大^[5], η_{\max} 对模型的结果起着决定性作用.

4 结果分析

在得到了带有等概率删除机制的网络演化模型的数理推导结果后, 本节将就具体的情况对模型进行演算, 分析节点适应度分布, 删除率以及 DPA 的频率对网络演化中度分布的影响, 并且将用仿真结果对数理演算结果进行综合分析验证.

4.1 节点适应度同质

当节点均为同质节点时, 所有节点的 η 为定值, 不妨假设为 1. 利用 Dirac Delta Function 的方法, 得到

$$\gamma = 1 + \frac{2b + 2}{2b + 1 - c} \quad (13)$$

如果没有删除与 DPA 机制, 则模型退化为经典 BA 网, 得到 $\gamma = 3$. 这与经典 BA 网的理论推导是一致的. 所以, 可以看到, 本文的模型将 BA 网包含了进来, 是 BA 网络的一般化, 经典 BA 网络是本模型的一个极端情况下的特例.

如果 $b = 0$, 即没有 DPA 机制存在时, 随着删除率 c 越来越大, 幂率指数 γ 将逐渐趋近于无穷大. 模型的度分布无标度特性将逐渐消失, 因此这里可以看到, DPA 机制的存在在节点适应度同质的情况下强化了模型的度分布无标度特性, 避免了网络的度分布无标度特性完全消失. 而当 DPA 比较明显的时候, 可以保证网络度分布将存在比较明显的无标度特性.

而当没有删除机制的时候, 随着 DPA 概率 b 的增加, 幂率指数 γ 将从最大值 3 逐渐减小至 2, 但是其度分布无标度特性不会消失, 这说明了从 DPA 机制的角度可以解释现实网络度分布中众多的幂率分布指数不同且分布于 2 至 3 之间的现象.

为了验证解析推导所得到的结果, 根据模型提出的算法进行了仿真, 结果见图 1.

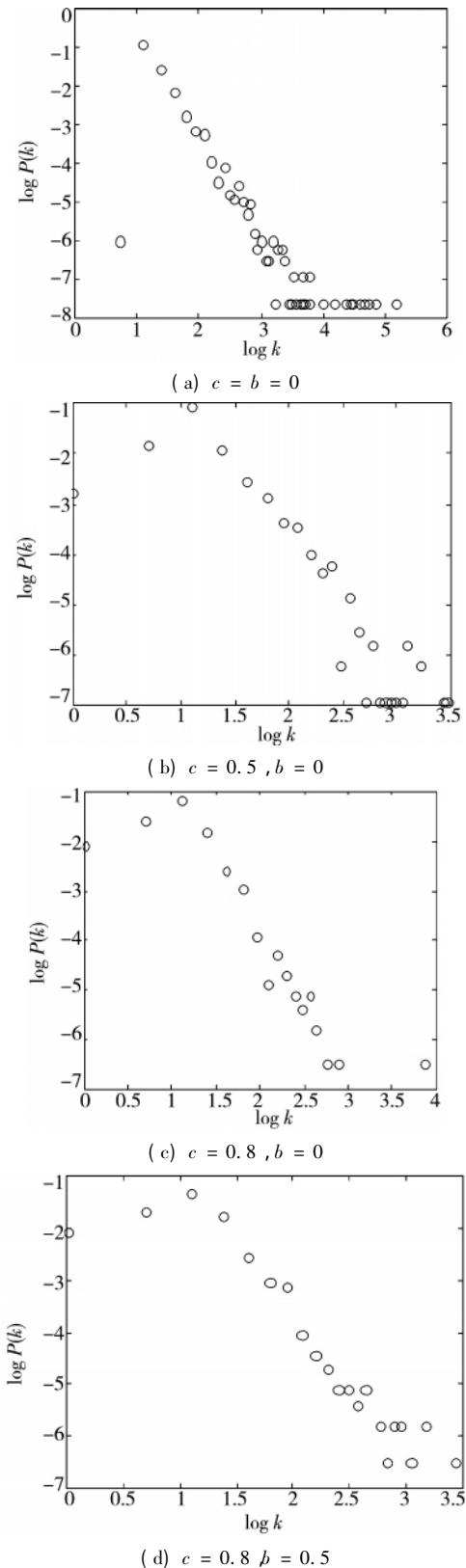


图1 节点适应度相同的网络度分布仿真示意图
 $P(k)$ —一节点度为 k 的概率; k —一节点的度

Fig. 1 The simulation chart of the degree distribution

其中 (a) 为 $c = b = 0$ 的情况,即不存在删除与 DPA 机制,此时的模型为经典 BA 网,而仿真结果也验证了,其幂率指数大约为 3; (b) 为 $c = 0.5, b = 0$ 的情况,即删除率为 0.5,而没有 DPA 机制,这时可发现,网络的无标度特性开始被破坏,幂尾开始变得不清楚,网络度分布正逐渐变为指数分布; (c) 中 $c = 0.8, b = 0$,删除机制进一步加强,可以发现网络的幂尾已经基本被破坏,网络度分布迅速演变为指数分布; (d) 中 $c = 0.8, b = 0.5$ 在 (c) 的情况下加入了 DPA 机制,可以发现 DPA 机制确实保护了网络无标度特性的消失,网络的幂尾重新出现.可见,仿真分析验证了解析推导的结果.

4.2 节点适应度服从(0,1)均匀分布

某些现实网络中节点的适应度大致呈现均匀分布,即每一个适应度等级上的节点数大致相同.本节讨论当节点服从(0,1)均匀分布时模型的网络度分布的情况.

利用 Mathematica7.0 软件模拟,求解综合幂率指数由 η_{max} 决定的结论,得到

$$\gamma = 1 + \frac{1.232 + 1.81b}{1 + 2b - 0.232c + 0.19bc} \quad (14)$$

首先研究特殊情况 $b = 0$ 时,得

$$\gamma = 1 + \frac{1.232}{1 - 0.232c} \quad (15)$$

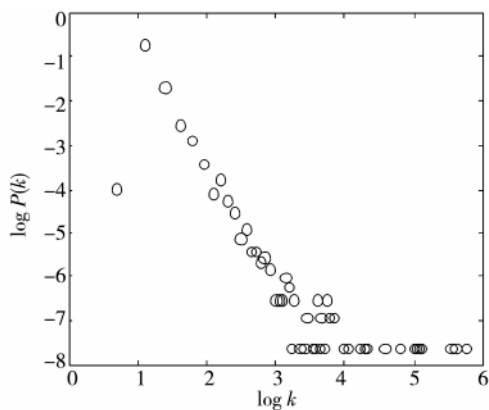
即度分布始终符合幂率特性.

随着 c 从 0 增加到 1,其值由 2.232 逐渐增大至 2.604.而当 c 为一固定值时,由式(14)可以得到

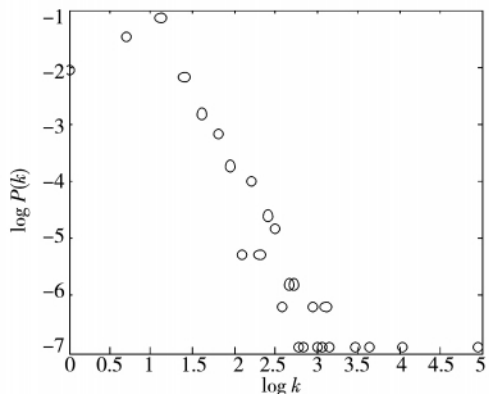
$$\begin{aligned} \gamma &= 1 + \frac{1.81b + 1.232}{(2 + 0.19c)b + 1 - 0.232c} \\ &= 1 + \frac{1.81}{2 + 0.19c} + \frac{1.232 - \frac{1.81(1 - 0.232c)}{2 + 0.19c}}{(2 + 0.19c)b + 1 - 0.232c} \end{aligned} \quad (16)$$

可以发现随着 b 的增加,会使得幂率指数 γ 减小,但网络的度分布无标度特性不会显著改变.

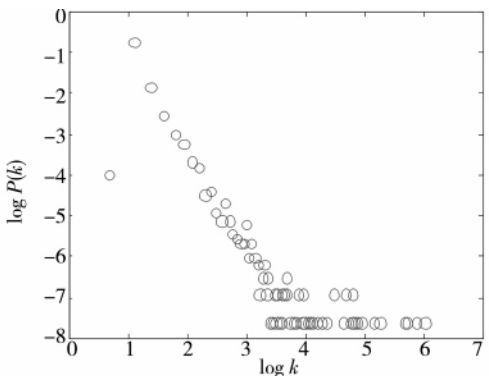
对节点适应度服从(0,1)均匀分布时的网络演化度分布进行仿真分析,得到结果如图 2.可以见到,网络的度分布始终保持为幂率分布,保持着其无标度特性.而随着 c 的提高,网络的幂率指数增高,随着 b 的提高,网络的幂率指数下降,但是变动的幅度并不大,其幂率指数始终在 2.4 左右,验证了解析推导的结果.



(a) $c = b = 0$



(b) $c = 0.7 \quad b = 0$



(c) $c = 0 \quad b = 0.7$

图 2 节点适应度服从(0,1)均匀分布下的网络度分布仿真示意图

$P(k)$ 一节点度为 k 的概率; k 一节点的度

Fig.2 The simulation chart of the degree distribution when the fitnesses follows the (0,1) uniform distribution

4.3 节点适应度服从指数分布

在不少的现实网络中,节点的适应度呈现指数分布的特征,即少数的节点拥有非常高的适应度,而大多数节点的适应度比较低.例如,财富总集中在少数人的手中.在这里,将这种现象大致用指数分布来表示.但是,需要说明的是,基于现实意义的考量,节点的适应度不可能有无穷大,应该

有其最大值 η_{\max} ,其适应度服从带有截断点的指数分布,即

$$\rho(\eta) = \frac{\lambda e^{-\lambda\eta}}{1 - e^{-\lambda\eta_{\max}}} \quad (17)$$

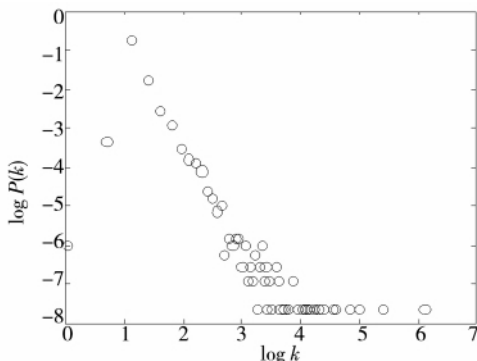
这样,保证节点的适应度在(0, η_{\max}) 服从指数分布.

利用 Mathematica7.0 软件进行模拟,求解综合度分布幂率指数 γ 由 η_{\max} 决定的结论,可以得到

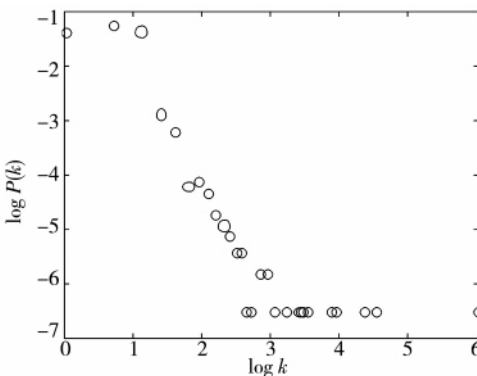
$$\gamma = 1 + \frac{(2b+1)\eta_{\max}}{(1+c)(2b+1)\eta_{\max} - c(2b+1)\eta_{\max}} = 2 \quad (18)$$

即不管删除率 c 和 DPA 概率 b 如何,网络的度分布都大致遵从指数为 2 的无标度幂率分布.

对节点适应度服从指数分布下的网络度分布进行仿真分析,得到结果如图 3(a) ~ 图 3(d). 可以发现,不管 c 与 b 如何大幅度的变动,网络度分布的幂率指数几乎保持着一个恒定值,说明节点适应度服从指数分布的网络面对删除与 DPA 等机制具有较强的调整与适应能力,能够保持其稳定的无标度特性.



(a) $c = b = 0$

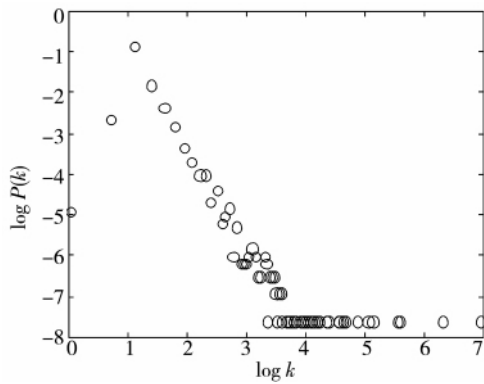


(b) $c = 0.7 \quad b = 0$

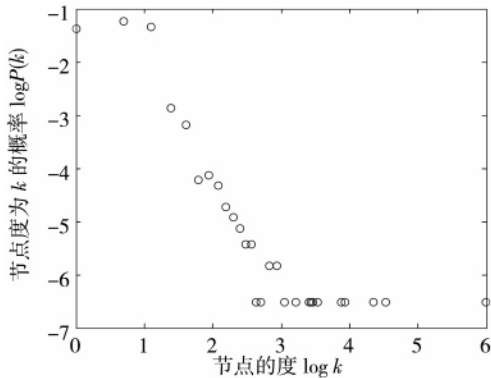
$P(k)$ 一节点度为 k 的概率; k 一节点的度

图 3(a),(b) 节点适应度服从指数分布下的网络度分布仿真示意图

Fig.3 (a),(b) The simulation chart of the degree distribution when the fitnesses follows the exponential distribution



(c) $c = 0, b = 0.7$



(d) $c = 0.8, b = 0.5$

图3 (c),(d) 节点适应度服从指数分布下的网络度分布仿真示意图

$P(k)$ — 一节点度为 k 的概率; k — 一节点的度

Fig.3 (c) (d) The simulation chart of the degree distribution when the fitnesses follows the exponential distribution

5 结束语

将现实网络中显著存在的3种机制——基于

节点适应度的择优连接,节点的删除以及DPA——结合起来进行讨论,本文构建了基于 fitness 模型的带有节点随机删除以及DPA的无向网络演化模型,并对其进行了数理推导分析,研究这3个机制的交互作用对网络演化中度分布的影响,为分析实际中特定网络的演化特性奠定了理论基础.研究发现:1)当节点的适应度同质时,如果删除和DPA都不存在,则网络为经典BA网;当删除率从0逐渐增大到1,网络度分布从幂率分布逐渐变化为指数分布,而DPA机制的存在将保护网络的无标度特性;2)当节点的适应度服从(0,1)均匀分布时,网络的度分布仍为幂率分布,且其幂率指数随着删除机制的变强而提高,随着DPA机制的变强而降低;3)当节点的适应度服从指数分布时,网络的度分布将保持稳定的幂率分布,其幂率指数固定为2,与网络的删除率及DPA机制的强弱无关,节点适应度服从指数分布的网络其度分布具有良好的稳定性.

今后可对以下几点进一步深入研究:1)本文的模型为了考虑一般情况,假设节点的删除是等概率的,然而在现实中,择优删除是一种显然存在的删除方式,而基于择优删除的网络演化综合模型其解析结果尚需要进一步的推导分析;2)本文研究的角度主要从宏观出发去构建网络的演化模型,而企业都是具有主观能动性的个体,具有自我选择并追求利益最大化的能力,因此,策略博弈模型将是有趣的研究方向.

参考文献:

[1]成思危. 复杂科学与系统工程[J]. 管理科学学报,1999,2(2): 1-7.
Cheng Si-wei. Complex scientific and systematic engineering[J]. Journal of Management Sciences in China,1999,2(2): 1-7. (in Chinese)

[2]Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks: Structure and dynamics[J]. Physics Reports,2006,424(4/5): 175-308.

[3]Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science,1999,286(5439): 509-512.

[4]车宏安,顾基发. 无标度网络及其系统科学意义[J]. 系统工程理论与实践,2004,24(4): 11-16.
Che Hong-an, Gu Ji-fa. Scale-free network and system scientific significance[J]. The System Engineering-Theory & Practice, 2004,24(4): 11-16. (in Chinese)

[5]Bianconi G, Barabási A L. Competition and multiscaling in evolving networks[J]. Europhysics Letters,2001,54(4): 436

- [6] Sarshar N, Roychowdhury V. Scale-free and stable structures in complex ad hoc networks [J]. *Physical Review E*, 2004, 69(2): 357–368.
- [7] Chung F, Lu L. Coupling online and offline analyses for random power law graphs [J]. *Internet Mathematics*, 2003–2004, 1(4): 409–461.
- [8] Cooper C, Frieze A, Vera J. Random deletion in a scale-free random graph process [J]. *Internet Mathematics*, 2003–2004, 1(4): 463–483.
- [9] Moore C, Ghoshal G, Newman M E J. Exact solutions for models of evolving networks with addition and deletion of nodes [J]. *Physical Review E*, 2006, 74(3): 557–568.
- [10] Deng K, Zhao H, Li D. Effect of node deleting on network structure [J]. *Physica A*, 2007, 379(2): 714–726.
- [11] Dorogovtsev S N, Mendes J F F. Scaling behaviour of developing and decaying networks [J]. *Europhysics Letters*, 2000, 52(1): 33–39.
- [12] Perotti J I, Billoni O V, Tamarit F A, et al. Emergent Self-Organized complex network topology out of stability constraints [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(10): 108701.
- [13] Yu W W, Cao J D, Chen G R, et al. Local synchronization of a complex network model [J]. *IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2009, 39(1): 230–241.
- [14] Qi X G, Yue G, Zhang L, et al. A complex network model based on the Gnutella protocol [J]. *Physica A*, 2009, 388(18): 3955–3960.
- [15] 陶少华, 赵会洋, 平 源, 等. 基于吸引因子的无尺度网络演化模型研究 [J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2008, 5(2): 88–92.
Tao Shao-hua, Zhao Hui-yang, Ping Yuan, et al. Attractive factors-based scale-free networks evolving model [J]. *Complex System and Complexity Science*, 2008, 5(2): 88–92. (in Chinese)
- [16] 覃 森, 戴冠中, 王 林. 具有边连接增长速度的演化网络度分布研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2007, 27(11): 159–163.
Qin Sen, Dai Guan-zhong, Wang Lin. Degree distribution of evolution networks with the acceleration of edge attachment [J]. *The System Engineering Theory and Practice*, 2007, 27(11): 159–163. (in Chinese)
- [17] 李增扬, 韩秀萍, 陆君安, 等. 内部演化的 BA 无标度网络模型 [J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2005, 2(2): 1–6.
Li Zeng-yang, Han Xiu-ping, Lu Jun-an, et al. A BA scale free network model with inner evolving [J]. *Complex System and Complexity Science*, 2005, 2(2): 1–6. (in Chinese)
- [18] 谭劲松, 何 铮. 集群自组织的复杂网络仿真研究 [J]. *管理科学学报*, 2009, 12(4): 1–14.
Tan Jinsong, He Zheng. Self-organization of industrial cluster: A computer simulation from complex network perspective [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2009, 12(4): 1–14. (in Chinese)
- [19] 李鹏翔, 张萌物, 席酉民, 等. 组织网络中的无标度行为: 极端情形的结果 [J]. *管理科学学报*, 2009, 12(4): 42–50.
Li Peng-xiang, Zhang Meng-wu, Xi You-min, et al. Scale-free behavior in organizational networks: Consequences in extreme situations [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2009, 12(4): 42–50. (in Chinese)
- [20] Newman M E J. The structure of scientific collaboration networks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, 98(2): 404–409.
- [21] Dorogovtsev S N, Mendes J F F, Samukhin A N. Structure of growing networks with preferential linking [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(21): 4633–4636.
- [22] Krapivsky P L, Redner S, Leyvraz F. Connectivity of growing random networks [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(21): 4629–4632.
- [23] Dorogovtsev S N, Mendes J F F. Scaling properties of scale-free evolving networks: Continuous approach [J]. *Physics Review E*, 2001, 63(5): 732–739.

- Yan Ni-na , Huang Xiao-yuan. Models of closed-loop supply chain with third-party reverse logistics and their applications [J]. Journal of Management Sciences in China , 2008 , 11(4) : 83 - 93. (in Chinese)
- [16] Fruchter G E , Kalish S. Closed-loop advertising strategies in a duopoly [J]. Management Science , 1997 , 43(1) : 54 - 63.
- [17] Zhao Z. Raising awareness and signaling quality to uninformed consumers: A price-advertising model [J]. Marketing Science , 2000 , 19(4) : 390 - 396.
- [18] Laffont J J , Tirole J. A Theory of Incentives in Procurement and Regulation [M]. Cambridge , MA: MIT Press , 1993.

Analysis of outsourcing decision-making on used products collection for green remanufacturing

FAN Ti-jun¹ , LOU Gao-xiang¹ , WANG Chen-lan¹ , CHEN Rong-qiu²

1. School of Business , East China University of Science and Technology , Shanghai 200237 , China;
2. College of Management , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China

Abstract: Outsourcing will be helpful for manufacturers to reduce collecting cost of used products and to improve the flexibility of remanufacturing. This paper presents outsourcing decision-making models of used products collection with and without incentive contracts based on game theory. Critical outsourcing cost is derived to make outsourcing decisions of collecting waste products. The effects of the unit cost savings of remanufacturing products on the wholesale price , retail price , returns rate , manufacturer's profit and critical outsourcing costs are compared with examples applied to the two models , and we find that outsourcing collection of waste products with incentive contracts is useful to increase the returns rate and improve the manufacturers' benefit.

Key words: remanufacturing; products returns; outsourcing decision; game theory

(上接第 7 页)

Evolving network model of integrating three mechanisms: Node otherness , uniform node deletion and double preferential attachment

HU Ping , WANG Wen , LIU Zhi-hua

School of Management , Xi'an Jiaotong University , Xi'an 710049 , China

Abstract: The researches on the complex evolving network models have been researched separately based on the mechanisms of node otherness , uniform node deletion or double preferential attachment (DPA) . Nevertheless , these three mechanisms of evolving network exist simultaneously in the real network. This paper established an evolving network model by integrating the three mechanisms. The article performed analytic deductions , calculated the degree distribution , and generalized the scale-free model. Finally , the results show that the comprehensive model has the scale-free feature , and the three evolving mechanisms have different influences on the degree distribution of networks , which were also validated by simulations.

Key words: node otherness; uniform node deletion; DPA; evolving networks