

# 一种基于局域世界的网络模型研究

王学光

(华东政法大学信息科学与技术系 上海 201620)

**摘要** 自组织机制是可以解释许多系统形成的原因之一。为了模拟现实世界中的网络形成,在自组织网络模型的基础上引入局域世界的概念,提出了一种网络演化模型。讨论了该模型的聚簇系数、介数、效率、可达性、最大簇规模和簇直径等6种拓扑属性。实验结果表明,该网络模型对随机故障和蓄意攻击表现出双重容忍特性。

**关键词** 网络模型,局域世界,拓扑属性,故障容忍

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Network Model Based on Local World

WANG Xue-guang

(Department of Computer Science, East China University of Political Science and Law, Shanghai 201620, China)

**Abstract** Self-organized mechanism is one of many reasons which can explain system building. For simulating the network formation in the real world, this paper proposed a network evolution model based on local world and self-organized mechanism. It discussed the model's topological properties, including clustering coefficient, betweenness centrality, efficiency, reachability, biggest cluster size and cluster diameter. The results show that the model can tolerate random failures and intentional attacks very well.

**Keywords** Network model, Local world, Topological property, Fault tolerance

## 1 引言

近年来,学界对复杂网络给予了极大的关注。自然界中存在的多种复杂系统都可以用它作为工具来研究,这些系统包括了 Internet 网络<sup>[1]</sup>、社会关系网络<sup>[2]</sup>、新陈代谢网络<sup>[3]</sup>、食物链网络<sup>[4]</sup>、论文引用网络<sup>[5]</sup>等。研究表明,大量复杂网络都表现出“无标度”特性,也就是说它们的度分布函数具有幂律形式,即  $P(k) \sim k^{-\gamma}$ 。最为著名的构造无标度复杂网络的模型由 Barabási 和 Albert 于 1999 年提出(BA 模型)<sup>[6]</sup>,他们把真实系统通过自组织生成无标度的网络归结为两个主要因素:生长(Growth)和优先连接(Preferential attachment)。随后,人们对该模型进行了改进<sup>[7-9]</sup>,也提出了其他反映描述真实世界的网络模型,包括局域世界演化模型<sup>[10]</sup>、权重演化模型<sup>[11]</sup>等。

从本质上看,BA 模型及上述其他模型都是通过研究节点和边如何形成拓扑来反映现实世界的特性。然而,这在某些领域,尤其是下一代通信和计算机网络的研究中还是远远不够的,还必须考虑计算和存储资源、流量和带宽等重要因素。Diego Garlaschelli 等人提出了一个自组织的网络进化模型(Self-organized Network Model, SON)<sup>[12]</sup>,通过附加于节点的动态变量的自组织过程来形成网络,并涌现出拓扑的幂律行为。考虑到 Internet 的层次性以及诸如无线传感器网络、移动自组织网络、车载网络等多种网络的特殊性,本文在他们工作的基础上引入局域世界(Local World)<sup>[10]</sup>的概念并研究了该局域世界网络模型(Self-organized Network Model with

Local World, SON-LW)的统计属性。模拟结果显示,局域世界范围对网络有着重要的影响并表现出了一些新颖的特性。局域世界网络模型的节点适应度在临界值之上存在均匀分布和幂律尾特征,其节点度在局域世界范围之上也具有与适应度分布相似的幂律行为。

此外,作为复杂网络研究内容之一的鲁棒性问题已引起许多学者的关注。它是指当网络在随机失效或者蓄意攻击的情况下仍能够提供关键服务的能力。对于网络鲁棒性的研究可以分为两类<sup>[13]</sup>:静态鲁棒性和动态鲁棒性。两者主要不同之处在于当研究网络鲁棒性时是否考虑网络负载的重分布问题。静态鲁棒性根据网络拓扑属性的仿真或解析结果来评估网络维护其功能的能力;而动态鲁棒性则主要考虑由一些节点失效引起的级联反应。这里,研究基于局域世界自组织网络模型的静态特性。

Albert 等人的研究表明无标度网络在随机失效情况下的稳定性和对蓄意攻击的脆弱性<sup>[14]</sup>。此外,许多学者的研究也都显示出了相似的结果。通常,网络的攻击者往往不能获得关于网络拓扑的全局信息,因此不同的攻击策略会对网络造成不同的影响。本文研究了上述情形下的局域世界网络模型的统计属性。模拟结果显示随着局域世界范围的增大网络对随机失效和蓄意攻击表现出双重容忍特性。

本文第 2 节、3 节给出基于局域世界的自组织网络模型,并研究了该模型的统计性质;第 4 节讨论了该模型在随机失效和蓄意攻击情形下的鲁棒特征;最后给出本文的结论。

本文受国家社会科学基金项目(11BFX125),2010 年度华东政法大学科学研究项目(10HZK013)资助。

王学光(1975-),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机网络、信息安全、电子证据, E-mail: wangxueguang@ecupl.edu.cn.

## 2 SON-LW

### 2.1 模型

SON<sup>[12]</sup>指定网络具有  $N$  个节点,为每一个节点赋予均匀分布适应度值。在网络进化过程中,具有最小适应度值的节点及它的所有邻居节点更新其适应度。一旦节点的适应度发生变化,它将要和网络中的所有其他节点重连。

该模型中要求适应度发生变化的节点需要和网络中所有其他节点依概率相连,然而在实际网络中并不一定如此。Internet 网络是基于域的结构来进行管理的,无线传感网络中每一节点在有限的通信覆盖范围内进行操作,人们的社交范围也局限在自己的圈子里等。因此,本文将局域世界的概念引入上述模型,网络构建方法描述如下:

(1) 在  $N$  个节点的网络中给每个节点赋以  $[0, 1]$  区间上具有均匀分布的适应度值; $K_N$  表示具有  $N$  个节点的集合。

(2) 找到具有最小适应度值  $x_i$  的节点  $i$  以及它的所有邻居节点,按照下面的规则在第  $t$  步更新它们的适应度值:

$$x_i(t+1) = \eta$$

式中,  $\eta \in U[0, 1]$ 。

(3) 一旦节点  $i$  的适应度值更新,它将要与从  $K_N$  中随机选择的  $M$  个节点以  $f(x_i, x_j)$  进行概率连接。令  $K_M$  表示具有  $M$  个节点的集合,  $K_M \subset K_N$ 。此处有:

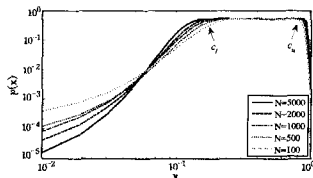
$$f(x_i, x_j) = \frac{x_i x_j}{1 + x_i x_j}$$

式中,  $j \in K_M$ 。

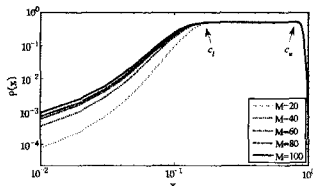
需要说明的是,与 BA 无标度等模型不同,节点数目在网络形成过程中不变;概率连接规则不考虑度关联;所有适应度发生变化的节点应与网络重新连接;节点在任意时间步骤内额外的连接更新并不影响网络最终的形成结果。

### 2.2 适应度分布与度分布

SON-LW 中网络拓扑结构的形成由节点适应度的自组织过程来驱动。而局域世界的引入带来了与 SON 所不同的适应度分布特性,它表现出了临界值之上的均匀分布和幂律尾特征。从图 1 中可以看到节点适应度分布存在明显的临界现象,适应度值达到  $c_l$  后,其均匀分布于  $c_l$  和  $c_u$  之间 ( $c_l \leq c_u$ ),在  $c_u$  之上则出现幂律分布特征。另外,网络节点数  $N$  对临界值有决定性的影响,而局域世界范围  $M$  对其影响则相对较小。图 1(a) 中,在  $M$  不变的情况下  $N$  增大时,  $c_l$  和  $c_u$  变化较大;图 1(b) 中,在  $N$  不变的情形下对于不同的  $M$ ,  $c_l$  和  $c_u$  几乎没有变化。如何获得  $c_l$  和  $c_u$  的解析值仍旧是一个开放性的问题。因此,图 1 中它们的位置并不是完全确定的。



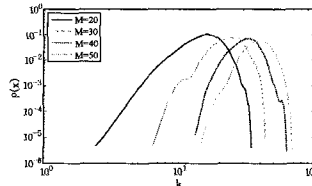
(a) 考虑  $M=20$  时不同  $N$  情形下的实验结果



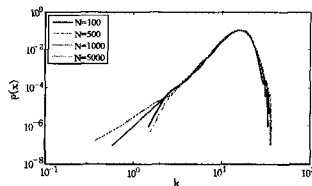
(b) 考虑  $N=1000$  时不同  $M$  情形下的实验结果

图 1 节点适应度分布

节点适应度的变化是网络拓扑结构形成的外部动力,而局域世界范围则限制了节点度分布的特征。从图 2(a) 中可以看到,一方面,不同  $M$  所对应的节点度分布具有相似的形状,随着  $M$  的增大整个分布在横坐标轴上右移;另一方面,当  $k \geq M$  时,呈现出相似的幂律分布。图 2(b) 描画了网络节点度的概率分布。当  $M$  取固定值时,由该模型所形成的具有不同节点  $N$  的网络中节点的概率分布几乎是一致的。



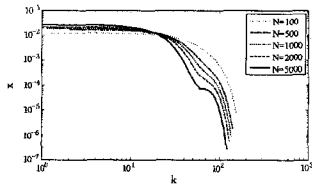
(a) 考虑  $N=1000$  时不同  $M$  情形下的实验结果



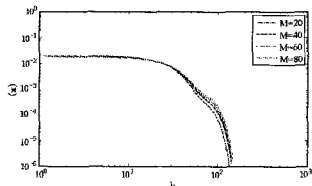
(b) 考虑  $M=20$  时不同  $N$  情形下的实验结果

图 2 节点度分布

分别研究了网络节点数目  $N$  不同时以及局域世界规模  $M$  不同时节点度与适应度的关系,如图 3 所示。当  $k$  相对较小时具有不同度的节点有均匀的适应度值;然而当  $k$  较大时适应度值则显示出幂律行为。由图 2(a) 以及 3(b) 可以发现节点的度和适应度分布的主要特征都取决于  $M$ ,而  $N$  对其影响甚小。



(a) 考虑当  $M=20$  时不同  $N$  情形下的实验结果



(b) 考虑  $N=1000$  时不同  $M$  情形下的实验结果

图 3 节点度与适应度间的关系

## 3 SON-LW 的统计属性

### 3.1 测量尺度

一个网络的拓扑通常用图来表示,其统计属性反映了该网络的特征。这里的图是指无向、单边、无权重、无自环的图,也就是说,边有相同的长度且是双向的,在每一节点对之间仅有一条边,没有节点与其自身连接。本文中采用能够反映网络通信能力和衡量网络鲁棒性的测量尺度,包括聚簇系数、介数、效率、可达性、最大簇规模和聚簇直径<sup>[15]</sup>。

首先,给出一些必要的定义。图  $G=(V, E)$  中  $V$  表示节点的集合  $\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ ,  $E \subset V \times V$  表示边的集合  $\{e_1, e_2, \dots, e_M\}$ 。通常使用邻接矩阵来表示图,如果两个节点间有边则矩阵中相应的位置为 1,否则为 0。节点  $v$  和  $w$  之间的路径  $P$

$(v, w) = \{e_1, e_2, \dots, e_k\} \subseteq E$ , 其中  $e_1 = (v, v_1), e_k = (v_{k-1}, w)$ , 且对所有其他边有  $e_i = (v_{i-1}, v_i)$ 。路径长度  $|P(v, w)|$  表示该路径上边的数目。节点  $v$  和  $w$  之间的距离  $d_{vw}$  表示为它们之间所有路径的最小长度; 如果它们之间没有任何路径, 则  $d_{vw} = \infty$ 。图  $G$  的子图  $G' = (V', E'), V' \subseteq V$  且  $E' \subseteq E$ 。

(1) 聚簇系数 (Clustering Coefficient)

定义“三角形”由 3 个节点构成且每个节点对之间都有边; 定义“三元组”由 3 个节点构成且每个节点可以到达其他节点。令  $N_\Delta$  表示网络中三角形的数目,  $N_3$  为三元组的数目, 则定义网络的聚簇系数为:

$$C = \frac{3N_\Delta}{N_3}, 0 \leq C \leq 1$$

式中,  $N_\Delta = \sum_{i>j>r} a_{i,j} a_{i,r} a_{j,r}$ ;  $N_3 = \sum_{i>j>r} (a_{i,j} a_{i,r} + a_{j,i} a_{j,r} + a_{r,i} a_{r,j})$ ;  $a_{i,j}$  为邻接矩阵中的元素。聚簇系数描述了网络中局部连接特征。

(2) 介数 (Betweenness Centrality)

令  $\sigma_{ij}$  表示节点  $i$  与节点  $j$  之间的最短路径数目, 令  $\sigma_{ij}(r)$  表示节点  $i$  与节点  $j$  之间经过节点  $r$  的最短路径数目。节点  $r$  的介数为:

$$B_r = \frac{\sum_{i \neq j \in V} \sigma_{ij}(r)}{\sigma_{ij}}$$

因此, 图  $G$  的介数可以表示为:

$$B = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{r \in V} B_r$$

利用介数可以估计固定拓扑中通过某个节点或链路以及整个网络的负载和拥塞情况。

(3) 效率 (Efficiency)

令  $d_{ij}$  和  $\varepsilon_{ij} = 1/d_{ij}$  分别表示节点  $i$  与节点  $j$  之间的最短路径长度和效率, 一个图  $G$  的效率表示为:

$$EF(G) = \frac{\sum_{i \neq j \in V} \varepsilon_{ij}}{N(N-1)} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in V} \frac{1}{d_{ij}}$$

如果两个节点之间没有路由, 则令  $d_{ij} = \infty, \varepsilon_{ij} = 0$ 。平均最短路径与网络通信效率成反比。

(4) 可达性 (Reachability)

令  $R_{ij}$  表示两个节点间是否有路径存在, 有:

$$R_{ij} = \begin{cases} 0, & d_{ij} = \infty \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

则图  $G$  的可达性定义为:

$$R = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in V} R_{ij}$$

如果图中任何节点对间都存在路径, 则有  $R = 1$ 。当  $R$  接近 0 时, 网络功能将会完全崩溃。

(5) 最大簇规模 (Biggest Cluster Size)

令  $G_i'$  为图  $G$  的第  $i$  个连通子图,  $S_i$  表示子图  $G_i'$  中节点的数目, 则最大簇规模为:

$$S = \frac{1}{N} \max_i S_i$$

最大簇规模在一定程度上反映了网络受损的程度。

(6) 簇直径 (Cluster Diameter)

令  $G'$  为图  $G$  的最大连通子图,  $N'$  为图  $G'$  的节点数目, 则聚簇直径表示为:

$$D(G') = \frac{1}{N'(N'-1)} \sum_{i \neq j \in V'} d'_{ij}$$

式中,  $d'_{ij}$  表示节点  $i$  与节点  $j$  之间的最短路径长度。聚簇直径体现了网络局部范围内的通信能力。

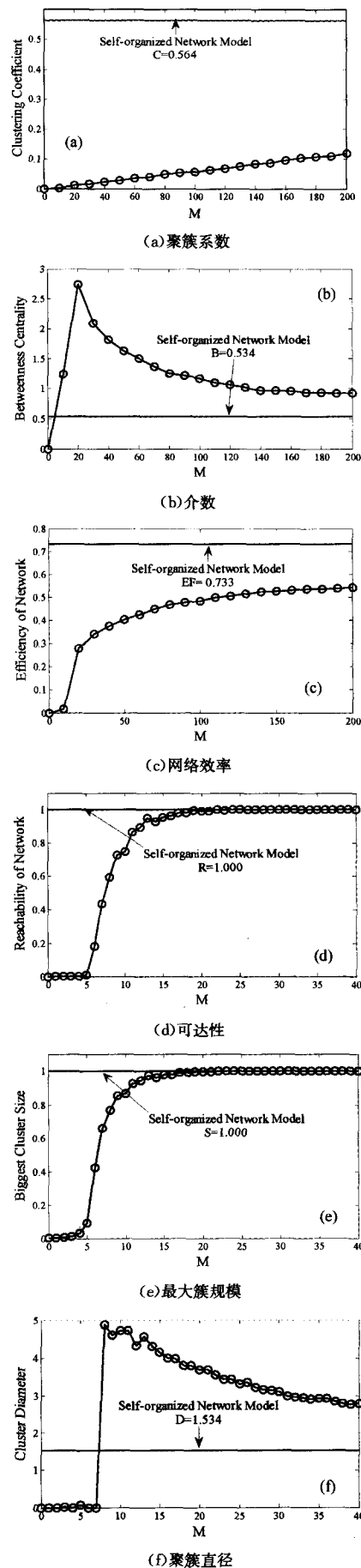


图 4 局域世界网络模型的统计属性

图 4 所示的是在网络节点数  $N=1000$  时,通过取不同  $M$  值得到局域世界模型的统计属性,它是多次独立运行的平均结果。其中红色直线为具有 1000 个节点的 SON 相应值的表示,它与  $M$  无关;蓝色带圈线是 SON-LW 在不同的局域世界范围上的变化曲线。同时也考虑了  $N$  取不同值时的情况,得到了相似的结果。

图 4(a)中 SON-LW 的聚簇系数随着  $M$  线性增加,它的斜率为 0.0006。由于在 SON-LW 模型中,具有最小适应度值的节点和它的所有邻居重新连接到其他  $M$  个节点,因此当 SON-LW 模型达到稳态时,簇的形成和密度不可避免地受  $M$  值的影响。这导致聚簇系数随  $M$  值连续增加。然而,对于其他统计属性而言,当  $5 < M \leq 15$  时有临界现象发生,也就是说网络的这些性质会突然涌现。当  $M > 15$  时 SON-LW 模型相对稳定并趋向于 SON 所具有的统计值。

在图 4(b)中,网络介数的变化趋势主要受到网络平均路径长度影响。当网络平均路径长度减小时,从整体上来说通过节点的最短路径的平均数目减少,进而使得网络介数有  $B_{M < N}^{SON-LW} \propto M^{-7}$ ,但这并不排除网络中有少数较大度节点的存在。从图 4(c)可以看到 SON-LW 模型的网络效率由  $EF_{M=10}^{SON-LW} = 0.0166$  迅速变化到  $EF_{M=20}^{SON-LW} = 0.2801$ ,而后  $EF^{SON-LW}$  随着  $M$  增加平稳单调上升趋于  $EF^{SON}$ ,这说明整个网络的平均路径长度也经历了一个突变期,并且越来越短,与之相应的是节点之间的通信能力增强。

在某种程度上,网络的最大簇规模与网络可达性是一致的。即网络可达性越好,最大簇规模越大。可以看到图 4(d)与图 4(e)中有着相似的形状。当  $M=20$  时,有  $R_{M=20}^{SON-LW} = 1.000$ ,也就是说网络中从任一节点可以到达其他所有节点;  $S_{M=20}^{SON-LW} = 1.000$  意味着网络中的所有节点都包括在最大簇中。但是此时网络平均路径较大,网络的平均负载程度较重。

从图 4(f)可以看到,当  $D_{M=7}^{SON-LW} = 0.0026$  时说明网络中存在多个互不连通的小簇,而当  $D_{M=8}^{SON-LW} = 4.8795$  时说明网络的连通特性突现,在网络中存在几个较大的簇和少量规模较小的簇。当  $8 < M \leq 15$  时聚簇直径有相对较大的波动,这

可以解释为尽管  $M$  在增加但 SON-LW 不能完全连通,概率连接机制使得最大簇规模具有不确定性。在  $M \geq 20$  以后 SON-LW 的聚簇直径变化趋于稳定。

## 4 SON-LW 的鲁棒特性

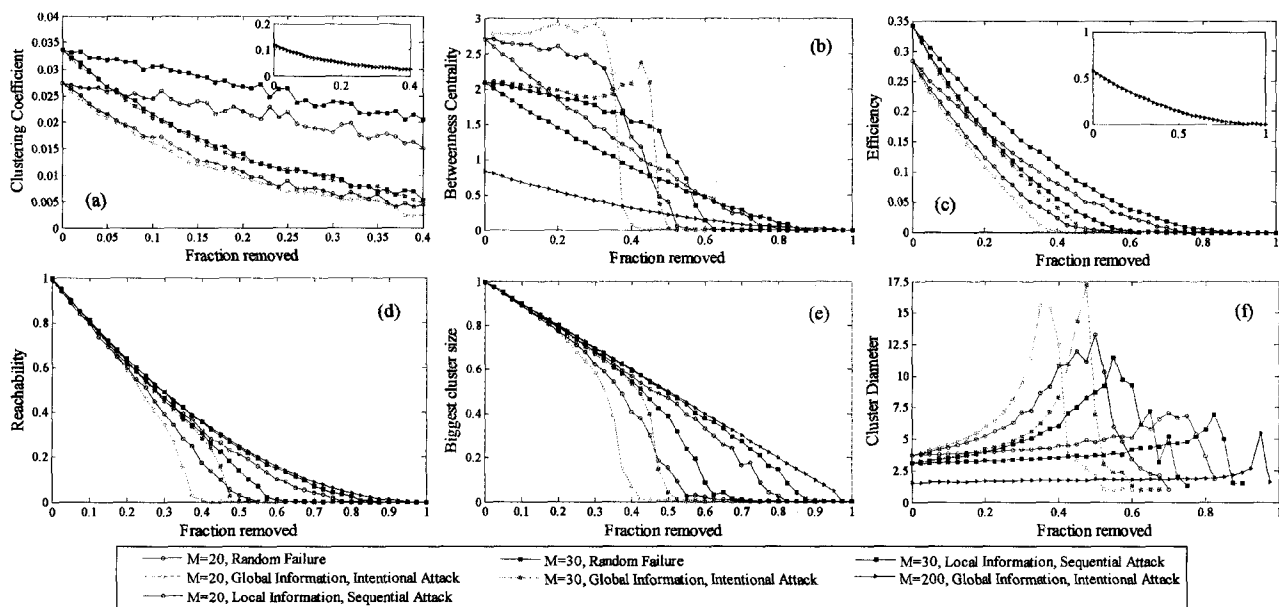
### 4.1 实验方法

这部分主要考察局域世界自组织网络模型的鲁棒特性,包括对错误和攻击的容忍能力。这里,错误指的是随机地移除被选择节点,攻击是指蓄意地移除网络中重要的节点。需要说明的是,像 Internet 这样大规模的网络,攻击者不可能获得精确的网络拓扑信息。因此,对于攻击本文中考虑两种情形,一种是全局信息可见时,逐步移除网络中度最大的节点;另外一种是基于局部信息的分布式方法<sup>[16]</sup>,采用贪婪顺序攻击,也就是说攻击者将具有最大度的邻居节点作为下一个目标,如果这样的节点不存在则随机选择其他节点。衡量网络拓扑的鲁棒特性采用 3.1 节中提到的 6 种统计统计特征。对于错误和攻击研究的根本目的是保护已有系统和指导新系统的设计,以提高网络系统的可生存性。

### 4.2 实验结果分析

图 5 中我们得到了 SON-LW 在不同局域世界范围情况下的网络拓扑统计属性,图中曲线为多次独立运行的平均结果。

与无标度复杂网络不同,随着  $M$  的增加 SON-LW 表现出了对随机故障和蓄意攻击的双重容忍特性。这说明网络中少数度较大节点的“集线器”作用被淡化,也就是说大部分节点的度趋于  $M$  附近。总体来说,SON-LW 对随机故障有良好的适应性,当  $M$  较小时它对蓄意攻击表现出一定的脆弱性,但这种脆弱性在  $M=200$  时已经很不明显了。同时,也发现利用全局信息攻击的方法相对于贪婪顺序攻击具有更好的效果,因此保护好一些关键的节点以及关于节点的重要信息是极其必要的。另外,SON-LW 对随机故障和蓄意攻击都表现出了相变特征,可以用节点从网络中移除的关键部分  $p_c$  来表示。当  $M \rightarrow N$  时有  $p_c \rightarrow 1$ ,而且在相同条件下,除聚簇系数外所有其他的网络拓扑特征具有一致的临界点。



分别考虑  $N=1000, M=20, 30, 200$  时采用不同策略情况下的网络聚簇系数、介数、效率、可达性、最大簇规模和聚簇直径等统计属性

图 5 局域世界网络模型的鲁棒特征

首先考虑基于不同局域世界范围  $M$  并在不同攻击策略下由 SON-LW 模型所建立的网络拓扑的聚簇系数变化情况,如图 5(a)所示。当从网络中移除的节点逐渐增加时,它的聚簇系数则缓慢下降。对于蓄意攻击而言,随机失效对聚簇系数的影响更小。例如,当  $M=20$  时,网络初始聚簇系数为 0.027。采用随机失效策略移除网络中 40% 的节点后的聚簇系数为 0.0151;移除相同数量的节点,基于局部信息蓄意攻击后导致网络的聚簇系数为 0.0046,而基于全局信息蓄意攻击的结果为 0.0021。图 5(a)中聚簇系数没有像其他统计属性一样产生临界现象,其原因在于移除某一节点后并不影响其邻居节点的连接性。因此,并不存在移除多少节点的特定值使得聚簇系数产生戏剧性的变动。

接下来,就  $M=20$  采用全局信息蓄意攻击时 SON-LW 模型的网络拓扑特征进行讨论(在其他情况下可以得到相似的结论)。此时,  $p_c=0.4 \pm 0.05$ 。图 5(b)中,网络介数当移除节点率  $p < p_c$  时有增加的趋势,这可以解释为网络中度最大节点的失效从整体上造成了经过其他节点的最短路径数目的增加,因而会出现这种情况。当达到临界点  $p_c$  后,网络介数急剧下降为 0,此时网络中几乎不会有流量存在。图 5(c)中,由于网络中节点的移除造成网络平均路径增加而导致效率降低。当节点移除率超过  $p_c$  时,网络中的大部分节点之间不存在任何路由而导致效率接近于 0。图中右上部分是  $M=200$  时,全局信息蓄意攻击对网络效率的影响,此时  $p_c=0.975$ 。图 5(d)中,当  $p > 0.425$  时有网络可达性  $R < 0.001$ ,即网络中从任一节点到其他节点间几乎都没有路径存在。如果从图 5(e)中对应来看的话,节点移除率  $p > 0.6$  时网络中每一节点单独构成簇,这时网络的最大簇规模  $S=0.001$ 。因此,我们也可以理解图 5(f)中  $M=20$  的聚簇直径曲线在  $p=0.6$  时停止。此外,图 5(f)中显示当  $p < 0.35$  时聚簇直径增加,说明存在可以绕过被移除节点的路径来构成簇。

从图 5 中可以看到全局信息蓄意攻击相比其他情况最具破坏性,即使这样它对于  $M=200$  时 SON-LW 所形成的网络影响甚小,使得网络有了优良的抗攻击能力。

**结束语** 许多已有的研究成果主要集中于建立静态拓扑模型和研究复杂网络上的动力学。这些模型中节点间的交互依赖于静态连接机制,比如 BA 模型使用“增长”和“优先连接”来反映真实系统的特征。但是,这仍存在许多问题。真实的网络有较大的聚簇系数和度关联性,而且在网络进化过程中任何细微的变化都将影响拓扑结构的形成。此外,网络拓扑的形成遵循着一定的进化规则,并由内外部因素共同驱动。这是在静态模型中所不能体现的。自组织临界是能够解释上述情形的理论之一。

本文提出了一个局域世界自组织网络模型,它依靠节点适应度变异的外部动力规则来推动网络拓扑结构的形成。我们发现当网络达到稳定状态时,节点适应度表现出了临界值之上的均匀分布和幂律尾特征,而节点度在局域世界范围之上时也出现与适应度相似的幂律性。进而,发现该网络模型

随着局域世界范围的扩大而表现出了对随机故障和蓄意攻击的双重容忍特性。本文中对局域世界的选取采用随机方法,这与实际情况并不相符,因此如何选取局域世界将是进一步要做的工作。另外,为了提高网络的故障和攻击容忍能力,该模型与 BA 模型等方法一样并没有人为设计因素的存在,但在工程实践中到处都有设计的痕迹。因此,考虑保障网络可生存性作为网络演化的设计目标来构建模型将是我们考虑的重点。

## 参考文献

- [1] Vázquez A, Pastor-Satorras R, Vespignani A. Large-scale topological and dynamical properties of the Internet[J]. Physical Review E, 2002, 65(6)
- [2] Wasserman S, Faust K. Social network analysis: methods and applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994
- [3] Jeong H, Tombor B, Albert R, et al. The large-scale organization of metabolic networks[J]. Nature, 2000, 407(6804): 651-654
- [4] Williams R J, Martinez N D. Simple rules yield complex food webs[J]. Nature, 2000, 404(6774): 180-183
- [5] Redner S. How popular is your paper? An empirical study of the citation distribution [J]. The European Physical Journal B, 1998, 4(2): 131-134
- [6] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512
- [7] Dorogovtsev S N, Mendes J F F. Scaling properties of scale-free evolving networks[J]. Continuous approach. Physical Review E, 2001, 63(5)
- [8] Albert R, Barabási A L. Topology of evolving networks: local events and universality [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(24): 5234-5237
- [9] Bianconi G, Barabási A L. Competition and multiscaling in evolving networks[J]. Europhysics Letters, 2001, 54: 436-442
- [10] Li X, Chen G. A local world evolving network model[J]. Physica A, 2003, 328: 274-286
- [11] Yook S H, Jeong H, Barabási A L, et al. Weighted evolving networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 86(25): 5835-5838
- [12] Garlaschelli D, Capocci A, Caldarelli G. Self-organized network evolution coupled to extremal dynamics [J]. Nature Physics, 2007, 3: 813-817
- [13] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks: Structure and dynamics [J]. Physics Reports, 2006, 424(4): 175-308
- [14] Albert R, Jeong H, Barabási A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. Nature, 2000, 406(6794): 378-382
- [15] Costa L F, Rodrigues F A, Travieso G, et al. Characterization of complex networks: A survey of measurements [J]. Advances in Physics, 2007, 56(1): 167-242
- [16] Xiao S, Xiao G, Cheng T H. Tolerance of intentional attacks in complex communication networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(1): 146-152

(上接第 108 页)

- [13] 王卓, 王晓晔. 基于故障树的空管维修人为差错分析[J]. 天津理工大学学报, 2010, 26(5): 81-85
- [14] 董海鹏, 高延滨. 基于故障树与案例相结合的故障诊断方法[J].

应用科技, 2010, 37(11): 60-64

- [15] 张竞凯, 章卫国. 一种基于故障树的自动驾驶仪故障诊断专家系统设计[J]. 测控技术, 2010, 29(10): 88-92