

利用节点效率评估复杂网络功能鲁棒性

周漩^{1)2)†} 张凤鸣¹⁾ 周卫平²⁾ 邹伟²⁾ 杨帆³⁾

1) (空军工程大学工程学院, 西安 710038)

2) (海军装备研究院, 北京 100161)

3) (西藏大学师范学院, 拉萨 850000)

(2011年10月23日收到; 2012年3月20日收到修改稿)

为了克服现有复杂网络鲁棒性研究模型只考虑节点失效的局部影响性和网络拓扑鲁棒性的缺陷, 提出了一种利用节点效率来评估复杂网络功能鲁棒性的方法. 该方法综合考虑节点失效的全局影响性, 利用网络中节点的效率来定义各节点的负载、极限负载和失效模型, 通过打击后网络中最终失效节点的比例来衡量网络的功能鲁棒性, 并给出了其评估优化算法. 实验分析表明该方法对考虑节点负载的复杂网络功能鲁棒性的评定可行有效, 对于大型复杂网络可以获得理想的计算能力.

关键词: 功能鲁棒性, 节点效率, 节点负载, 复杂网络

PACS: 02.10.Ox

1 引言

复杂网络是复杂系统的抽象, 几乎所有的复杂系统都可以抽象成网络模型, 这些网络往往具有大量的节点, 节点之间有着复杂的连接关系^[1]. 复杂网络不仅仅指无标度网络, 它还包括介于随机网络与无标度网络间的其他类型网络, 我们把它们统称为复杂网络. 随着复杂网络特性研究的深入, 复杂网络抗毁性研究的重大理论意义和应用价值也日益凸显出来. 由于网络的抗毁性与系统的可靠性密切相关, 人们往往关注什么样的网络结构具有较高的抗毁性? 采用什么方法来对复杂网络的抗毁性进行评估? 目前基于图论的复杂网络抗毁性研究方法吸引了许多学者的注意力. 在一定攻击策略(随机攻击或蓄意攻击)下, 文献[2]和文献[3]采用网络中连通节点所占的比例和节点对之间最短路径的分布来衡量网络的可靠性, 认为连通节点的比例值越大、节点之间最短路径越短, 该网络的可靠性越强; 文献[4]提出了一种基于熵的无标度

网络抗毁性优化方法来应对随机攻击, 认为网络度分布熵越大, 网络抗毁性越强; 文献[5]通过网络的连通性来衡量网络的鲁棒性, 认为网络的连通性不仅受其拓扑结构的影响, 还受节点信息传输能力的影响, 一旦网络信息传输发生堵塞就有可能导致整个网络的崩溃; 文献[6—8]针对网络中节点或边的移除, 提出了度量网络级联失效的模型, 认为失效的节点会将其负载分配给邻接节点并导致邻接节点的失效. 但是它们都存在有待改进的地方: 文献[2—4]只考虑了网络的拓扑结构对网络鲁棒性的影响; 文献[6—8]虽然综合考虑了网络的功能鲁棒性和拓扑结构鲁棒性, 但是它只考虑了失效节点负载对相邻节点的影响, 而忽略了其全局影响性. 为此, 本文考虑网络中失效节点的全局影响性, 提出了一种利用节点效率来衡量网络功能鲁棒性的方法. 本文首先利用原始网络节点的效率来定义各节点的负载和极限负载, 根据网络打击前后节点负载的变化来确定节点功能失效模型; 然后给出网络功能鲁棒性评定算法, 并对其进行了优化; 最后通过实验分析来验证其有效性和可行性.

† E-mail: zhouxuan_333@126.com

2 复杂网络功能鲁棒性评定

2.1 问题提出

当前研究复杂网络鲁棒性的方法,有基于节点最短路径的、基于网络最大连通子网规模的以及网络连通性的等等,但是他们都是基于对网络拓扑结构的研究而提出的,却忽略了网络的功能鲁棒性,因为实际网络系统的运行不仅受其拓扑结构的影响,还受节点自身容量的制约.例如,通信网络中的信息传输需要考虑各节点的信息传输负载;交通网络中的交通拥堵情况需要考虑各交通枢纽的交通疏散能力.一旦通信网络中节点信息传输过载或是交通网络中交通流超过交通枢纽的疏散能力,同样会导致整个网络的崩溃.针对图 1 所示的简单通信网络(相邻节点边权均为 1),如果节点 v_1 发生失效,就会使得连接子网 A 和 B 的通信负载全部叠加在 v_4 上,一旦 v_4 过载,整个通信网络的连通性就会遭到破坏.

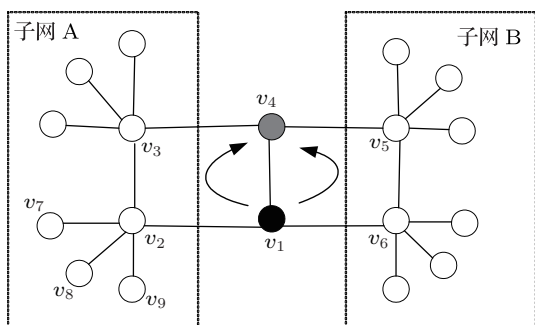


图 1 简单通信网络信息流分配示意图

可见,在实际复杂网络鲁棒性研究过程中,单纯考虑网络的拓扑结构是不够的,因为节点或边的移除会导致整个网络信息流通的重新分配和节点在信息传输过程中所承受负载的变化.对实际网络系统而言,节点失效对网络的影响是全局性的,而不是只对邻居节点产生影响,例如图 1 中节点 v_1 的失效会影响 v_4 .网络的连通不仅仅是物理上边的连通,在实际系统中还应考虑节点负载的可承受范围和节点容量限制.即使是物理上的边遭受了打击,只要节点具有足够的资源,它就会通过其他方式维持它现有的功能.但是,如果节点过载,同样会导致网络的崩溃,如图 1 所示.因此,在复杂网络鲁棒性研究过程中,考虑节点负载的全局影响性和节点功能鲁棒性是十分必要的.

2.2 理论基础

设图 $G = (V, L)$ 是一个无自环的无向连通网络,其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是网络中所有节点的集合; $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ 且 $L \subseteq V \times V$ 是节点间边的集合. ω_{ij} 表示连接节点 v_i 和 v_j 的边 l_{ij} 的权值.

定义 1 对于图 $G = (V, L)$,用 a_{ij} 表示 G 中节点 v_i 和 v_j 之间边的权值,当 v_i 与 v_j 直接相邻时, $a_{ij} = \omega_{ij}$, 否则 $a_{ij} = \infty$, 则 n 阶方阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 称为 G 的边权矩阵.

边权矩阵 A 用来表示网络各节点一步可达的距离.当 $a_{ij} = \infty$ 时,说明节点 v_i 与 v_j 不能一步可达,它们不相邻.网络中的边权用来表示节点之间信息流通的难易程度,数值越大,消耗的资源越多.

定义 2 节点距离是指两节点之间所有路径边权之和的最小值,用 d 表示.如果 v_i 和 v_j 之间不存在路径,则 $d_{ij} \rightarrow \infty$.网络中节点之间距离的最大值为网络的直径 R .当网络为无权网络时, d 表示两节点之间最短路径上的边数,

$$d_{ij} = \min \left\{ \sum_{pq} \omega_{pq} \right\}, \quad v_p, v_q \in r_{ij} \in Rt, \quad (1)$$

d_{ij} 表示节点 v_i 和 v_j 之间的距离, r_{ij} 表示连接节点 v_i 和 v_j 的某一条路径, Rt 表示连接节点 v_i, v_j 的路径集合.

定义 3 网络效率 E 是指网络中所有节点对之间距离倒数之和的平均值.

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}, \quad (2)$$

式中, n 为网络中节点数目, d_{ij} 为节点 i 和 j 之间的距离.

从网络效率 E 的定义中可以看出,网络效率 E 表达了网络中所有节点对之间的平均接近程度.网络中节点对之间越接近、距离越短,网络效率值越大.为了衡量网络中某一个节点与其他节点的平均接近程度,依据网络效率的定义,我们提出节点效率 I 的概念.

定义 4 节点效率 I_k 是指节点 k 与网络中其他节点之间距离倒数之和的平均值.

由 (2) 式可知

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq k}^n \frac{1}{d_{kj}} \right). \quad (3)$$

因此本文将 I_k 定义如下:

$$I_k = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{1}{d_{ki}}. \quad (4)$$

从 I_k 的定义中可以看出, 所有节点效率的平均值即为网络效率 E , 一个节点的效率表达了该节点到网络中其他节点的平均难易程度. 网络中节点效率越高, 表明该节点向其他节点传输信息越容易、所消耗的资源越少.

2.3 功能鲁棒性评定模型

我们所研究的网络鲁棒性是指网络在外界蓄意打击或自身随机故障情况下, 复杂网络系统还能维持其功能的能力. 本文所研究的复杂网络功能鲁棒性评定模型是综合考虑网络拓扑连通性和节点可承受负载而提出的, 通过节点负载的变化来确定节点失效概率从而达到网络功能鲁棒性评定的目的. 本文节点负载的概念是针对实际网络中资源流通过程而提出的, 它是对节点自身容量的抽象表述, 它表征节点维持现有功能的能力. 节点负载越大, 表明节点资源消耗越严重, 维持现有功能的能力越弱.

对于网络中传输的信息而言, 如果节点对之间距离很大, 但是要保持信息传输的完整性, 那么该节点对之间信息传输所消耗的资源就很多; 如果该节点信息处理的资源有限, 那么它承受的负载就会很大. 由于网络效率表征了网络中节点的平均接近程度, 因此网络效率在一定程度上反映了整个网络的负载. 网络效率越高, 表明节点对之间距离越短、网络信息流通越容易、网络信息传输负载越小.

由于网络中所有节点效率的平均值即为网络效率 E , 因此节点效率在一定程度上也反映了节点所承受的负载. 对于信息处理资源固定的节点, 如果它的效率越高, 说明它与网络中其他节点越接近、信息流通越容易, 信息传输所消耗的资源越少, 节点所承受的负载越小. 为此, 本文用节点效率来表征节点负载 LD , 并将节点 k 的负载定义如下:

$$LD_k = \exp(-I_k). \quad (5)$$

对于图 1 所示的通信网络, 节点 v_2 和 v_6 之间存在四条通信路径. 当 v_1 失效时, 如果 v_2 和 v_6 具有足够的资源能够使它们按照 $v_2-v_3-v_4-v_5-v_6$ 的路径进行通信, 那么 v_2 和 v_6 就不会失效, 并且整个网络也能维持它现有的功能. 因此, 对节点而言, 只要它拥有一定的资源能够维持它现有的功能, 它就能承受一定的负载. 本文将网络中节点能够承受的负载定义为节点容忍负载 C .

对于一般的实际通信网络而言, 由于网络组建过程中各节点信息处理的资源固定、信息传输过程中各节点所能利用的资源相同, 导致他们所能承受的负载也是相同的, 均为 C . 因此, 本文用相同的 α 来表征网络节点的容忍负载, 并将其定义为

$$C = \alpha \times \max(LD_k, k = 1, \dots, n), \quad (6)$$

式中, $\alpha \geq 1$ 为节点负载容忍系数.

在实际系统中, 某些过载的节点并不会立即失效, 因为人们会采取一定措施去提高节点的容量^[5,7]、缓解节点所承受的负载, 来提高网络整体可靠性, 例如通信网络中的动态路由策略. 因此, 网络中任何节点的失效都有一个阈值. 由于网络节点信息处理资源固定, 导致各节点失效阈值相同, 本文将其定义为节点极限负载

$$C_\infty = \beta \times C, \quad (7)$$

式中, $\beta \geq 1$ 为节点负载极限系数.

根据节点的容忍负载和极限负载, 我们可以将节点 k 的失效概率 p_k 定义如下:

$$p_k = \begin{cases} 0, & LD_k < C, \\ \frac{LD_k - C}{C_\infty - C}, & C < LD_k < C_\infty, \\ 1, & LD_k > C_\infty. \end{cases} \quad (8)$$

从式 (8) 可以看出: 当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, $C \rightarrow \infty$, 说明各节点具有足够的资源来维持现有功能, 而不受网络拓扑结构变化的影响, 相当于只研究网络的拓扑鲁棒性; 当 α 固定、 $\beta \rightarrow \infty$ 时, 说明各节点所能承受的极限负载无穷大, 过载节点的失效并不完全依赖于节点的负载, 而是以一定概率维持现有功能.

当网络遭受一定方式的打击时, 失效节点会引发信息传输格局和其他节点负载的变化, 一旦节点负载超过极限负载, 就会导致该节点失效, 并依次影响其他节点的负载. 如果网络遭受打击后, 失效节点越少, 说明该网络维持正常工作的能力越强.

因此, 本文通过失效节点的数目来度量网络的功能鲁棒性, 并给出其归一化表达式

$$f = \frac{\sum_{i=1}^{\text{Num}} f_i}{\text{Num} \times n}, \quad (9)$$

式中, n 为网络中节点数目, Num 表示网络遭受打击的次数, f_i 表示第 i 次打击所导致的失效节点的数目. 每一次打击不仅限于一个节点发生失效, 它可以包含多种失效模式.

2.4 功能鲁棒性评定算法

为了对网络中失效节点进行统计, 下面我们给出其简单算法步骤:

输入: 网络边权矩阵 $A = (\alpha_{ij})_{n \times n}$, α, β

输出: 网络的功能鲁棒性 f

Begin

1) 根据 A 计算所有节点对之间的最短距离矩阵 $\text{Dis} = [d_{ij}]$ //Floyd 算法;

2) 确定网络节点的效率和负载

For $i = 1$ to n

{根据 $\text{Dis} = [d_{ij}]$, 确定节点 v_i 的 I_i, LD_i };

3) 根据原始网络各节点负载, 确定网络节点容忍负载 C 和极限负载 C_∞ ;

4) 确定网络的功能鲁棒性 f

根据打击的方式, 确定失效的节点及其数目 k_{sx} ;

While ($k_{sx} > 0$)

{根据失效的节点, 对 A 进行修正;

重复步骤 1), 2) 确定节点负载;

根据 (8) 式确定功能失效的节点及其数目 k_{sx} };

根据 (9) 式确定网络的功能鲁棒性, 输出 f ;

End

从上述算法步骤可以看出, 整个算法的时

间复杂度取决于所有节点对之间最短距离矩阵 $\text{Dis} = [d_{ij}]$ 的计算. 由于 Floyd 算法的时间复杂度为 $O(n^3)$, 所以该算法在最坏情况下的时间复杂度为 $O(n^4)$. 针对 Floyd 算法计算节点对之间最短距离的特点, 本文为了降低其时间复杂度, 可以对其进行优化. 由于 Floyd 算法在计算最短距离矩阵 $\text{Dis} = [d_{ij}]$ 过程中, 需要对边权矩阵进行 n 次循环, 但是当网络中所有节点对之间的最短距离都已经找到时, 我们就会发现 $\text{Dis} = [d_{ij}]$ 在后续循环过程中保持不变. 因此, 在求解 $\text{Dis} = [d_{ij}]$ 过程中, 如果盲目地进行 n 次循环, 势必会造成计算资源的浪费、提高算法的时间复杂度. 基于此, 本文在运用 Floyd 算法计算 $\text{Dis} = [d_{ij}]$ 过程中, 通过设置标识矩阵来判断节点对之间的最短距离是否已经找到, 一旦找到便跳出循环, 从而减少程序运行的时间, 提高算法的效率. 根据随机矩阵理论, 我们可以知道任意节点对之间的最短距离都可以通过边权矩阵 $A = (\alpha_{ij})_{n \times n}$ 来求得. 若节点对之间的最短距离都已经确定, 意味着网络中节点对之间距离的最大值 (网络的直径 R) 也已经确定. 由此可知, 经过优化后本文算法的时间复杂度变为 $O(Mn^3)$, M 表示确定网络直径 R 所需的循环次数. 当网络具有小世界特性, 且 $M \ll n$ 时, 算法的时间复杂度可以达到 $O(n^3)$, 对大规模小世界网络功能鲁棒性的评价可以获得理想的计算能力.

3 实验与分析

3.1 模型有效性分析

针对图 1 所示简单通信网络, 本文以网络连通性和最大连通子网规模为指标, 当网络在 v_1, v_1 和 v_2 同时失效两种情况下的网络拓扑鲁棒性和功能鲁棒性进行评定, 评估结果如表 1 所示 (多次仿真平均值).

表 1 简单通信网络鲁棒性评估结果

评估指标	失效节点	v_1	v_1, v_2
	拓扑鲁棒性	网络连通性	连通
	最大连通子网规模	17	13
功能鲁棒性 ($\alpha = 1, \beta = 1.5$)	网络连通性	不连通	不连通
	最大连通子网规模	14	0
功能鲁棒性 ($\alpha = \infty$)	网络连通性	连通	不连通
	最大连通子网规模	17	13

从表 1 可以看出, 当 $\alpha = \infty$ 时, 网络功能鲁棒性评估结果与拓扑鲁棒性评估结果一致; 当 $\alpha = 1, \beta = 1.5$ 时, 网络功能鲁棒性评估结果展现出了与拓扑鲁棒性不一样的结论. 究其原因, 是由于网络功能鲁棒性的评定考虑了通信网络节点的可承受负载. 一旦节点过载, 同样会导致网络连通性的破坏和最大连通子网规模的减少, 例如边缘节点 v_7, v_8, v_9 的过载. 由此可知, 单纯运用拓扑鲁棒性对实际网络鲁棒性的评定是片面的, 只有综合考虑网络的拓扑结构、节点的容量和可承受负载才能使网络鲁棒性的评定更加准确.

针对复杂网络鲁棒性的研究, 普遍认为在随机攻击下无标度网络比随机网络具有更强的容错性; 但在蓄意攻击下, 无标度网络却又显得异常脆弱. 为了与现有结论进行比较分析, 本文考虑节点的功能鲁棒性, 通过构造节点数目均为 500、边数目均为 1500 的无标度通信网络^[9]与随机通信网络, 运用本文所提方法对其鲁棒性进行评定. 通过仿真(多次取样平均值), 可以得到随机通信网络与无标度通信网络的功能鲁棒性评定结果如图 2 和图 3 所示.

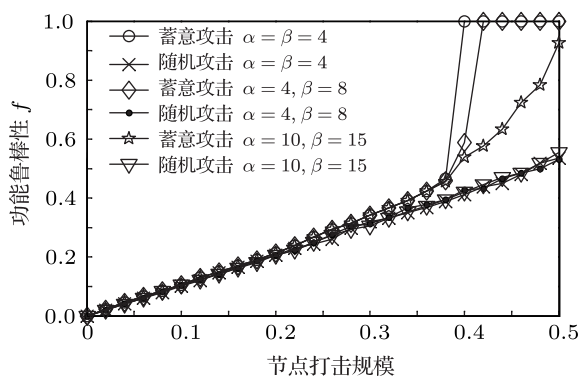


图 2 随机通信网络功能鲁棒性示意图

从图 2 和图 3 中可以看出, 随着网络节点负载容忍系数 α 和负载极限系数 β 的增大, 通信网络的功能鲁棒性逐渐增强. 当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, 通信网络功能鲁棒性曲线为一条斜率为 1 的直线, 说明通信网络中没有因为过载而导致的功能失效节点, 除了被打击节点, 其他节点都能维持它现有通信功能, 此时通信网络的功能鲁棒性最强. 由此可知, 对于不同拓扑结构的实际网络系统, 要提高其可靠性、减少因过载而导致的功能失效节点的数目, 我们可以通过增加节点信息处理的资源来提高节点的容量, 从

而降低节点功能失效的概率, 使网络具有较强的功能鲁棒性.

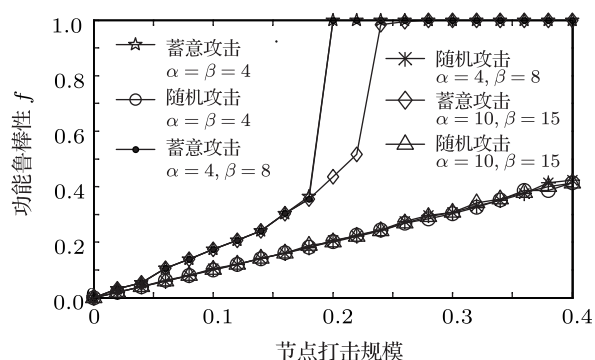


图 3 无标度通信网络功能鲁棒性示意图

当 α 和 β 取值一定时, 从整体上看: 无标度通信网络在应对蓄意攻击时其功能鲁棒性很低, 但对随机攻击具有较强的容错性; 而不同方式的攻击对随机通信网络的影响不大, 这与网络鲁棒性评定的经典结论^[10,11]是一致的, 说明了本文方法的有效性. 但是, 对考虑节点可承受负载的复杂通信网络功能鲁棒性的评定, 应该用实际通信系统在应对不同方式攻击下维持正常功能的条件加以约束. 例如: 如果通信网络 10% 的节点失效就会使得网络崩溃, 那么当节点打击规模超过 10% 时, 复杂网络鲁棒性评定的经典结论是不成立的, 因为在这种情况下随机攻击和蓄意攻击对通信网络的影响是一样的. 因此, 在实际网络系统维持正常功能的条件下, 无标度网络在应对蓄意攻击时很脆弱, 但对随机攻击具有较强的容错性, 如图 3 所示; 当节点打击规模较小时, 不同方式的攻击对随机网络的影响不大, 而当节点打击规模超过一定阈值(40%)时, 随机网络对蓄意攻击也很脆弱, 如图 2 所示.

3.2 算法效率分析

当前对复杂网络鲁棒性研究中, 学者们之所以只考虑节点失效的局部影响性而忽略其全局影响性, 是由于考虑网络全局信息鲁棒性评定算法时间复杂度高, 对大规模网络并不适用, 为此本文提出了复杂网络功能鲁棒性评定优化算法. 为了对该算法效率进行分析, 运用该优化算法在 Intel Core 2 Duad 2.83 GHz 微机上运行 MATLAB 程序对边权为 1 的不同规模小世界网络^[12](每个节点与相邻 6 个节点相连, 边重连的概率为 0.2)的功能鲁棒性进

行评定, 取 $\alpha = 4, \beta = 8$, 运行时间 (多次取样平均值) 如图 4 所示.

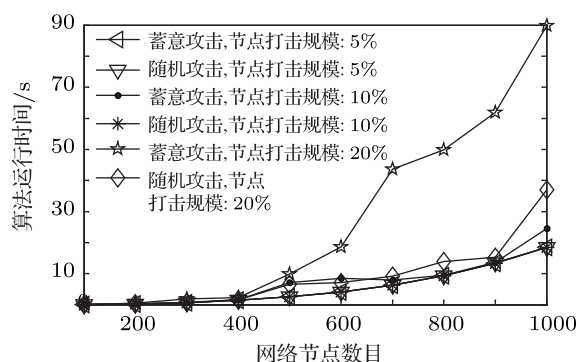


图 4 不同规模小世界网络算法执行效率图

从图 4 中可以看出, 通过优化后的本文算法, 对节点数目为 1000、蓄意攻击规模为 20% 的小世界网络功能鲁棒性的评定不超过 100 s, 且随着节点打击规模的减小, 其计算能力更优, 说明本文所提算法是有效的. 由于实际系统大多具有小世界特性, 因此运用该方法对大规模小世界网络功能鲁棒性的评定可以获得理想的计算能力.

4 结论

针对当前复杂网络鲁棒性评定模型只考虑网络拓扑结构鲁棒性和失效节点局部影响性的缺陷, 提出了一种考虑网络全局信息的利用节点效率来评估复杂网络鲁棒性的方法, 并给出了其优化算法. 实验分析结果表明, 单纯运用拓扑鲁棒性对实际网络鲁棒性的评定是不够的, 还应考虑节点的可承受负载, 我们可以通过增加节点信息处理的资源来提高实际网络系统的可靠性; 对于实际网络系统功能鲁棒性的衡量, 应该用系统维持正常功能的条件加以约束. 在实际系统维持正常功能的条件下, 无标度网络在应对蓄意攻击时很脆弱, 但对随机攻击具有较强的容错性; 当节点打击规模较小时, 不同方式的攻击对随机网络的影响不大, 与复杂网络鲁棒性研究的经典结论一致, 说明了该方法的有效性. 但是, 当节点打击规模超过一定阈值时, 随机网络对蓄意攻击也很脆弱. 算法效率分析表明, 优化后的本文算法适用于大规模小世界网络功能鲁棒性的评定, 其算法时间复杂度为 $O(n^3)$.

- [1] Deng H Z, Wu J, Li Y, Lü X, Tan Y J 2008 *Systems Engineering and Electronics* **30** 2425 (in Chinese) [邓宏钟, 吴俊, 李勇, 吕欣, 谭跃进 2008 系统工程与电子技术 **30** 2425]
- [2] Morohosi H 2010 *Mathematics and Computers in Simulation* **81** 551
- [3] Nair A, Vidal J M 2011 *International Journal of Production Research* **49** 1391
- [4] Wang B, Tang H W, Guo C H, Xiu Z L 2006 *Physica A* **363** 591
- [5] He S, Li S, Ma H R 2009 *Physica A* **388** 2243
- [6] Wang J W, Rong L L 2009 *Physica A* **388** 1289
- [7] Wang J W, Rong L L, Zhang L, Zhang Z Z 2008 *Physica A* **387** 6671
- [8] Wang J W, Rong L L 2009 *Physica A* **388** 1731
- [9] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [10] Paul H, Seth B 2008 *Proc. of the 41st Annual Hawaii International Conference on System Sciences Hawaii*, January 7—10, 2008 p1
- [11] Albert R, Jeong H, Barabási A L 2000 *Nature* **406** 378
- [12] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440

Evaluating complex network functional robustness by node efficiency

Zhou Xuan^{1)2)†} Zhang Feng-Ming¹⁾ Zhou Wei-Ping²⁾ Zou Wei²⁾ Yang Fan³⁾

1) (*Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China*)

2) (*Navy Academy of Armament, Beijing 100161, China*)

3) (*Normal College, Tibet Univeristy, Lasa 850000, China*)

(Received 23 October 2011; revised manuscript received 20 March 2012)

Abstract

In order to overcome the disadvantages of existing complex network robustness research models in which only the local influences of disabled nodes and topological robustness are considered, the node load, utmost load and disabled model are defined by node efficiency and a new method to evaluate complex network functional robustness is proposed in which the whole influence of disabled nodes is considered. The complex network functional robustness is evaluated by the final disabled node proportion after beat and the optimized evaluation arithmetic is given. Experiments show that this method is effective and feasible in evaluation of complex network functional robustness in which the node load is considered, and it is applicable for large scale complex networks.

Keywords: functional robustness, node efficiency, node load, complex network

PACS: 02.10.Ox

† E-mail: zhouxuan_333@126.com