

非线性负载容量模型的小世界网络级联抗毁性研究

吴晓平, 王甲生, 秦艳琳, 叶清

(海军工程大学 信息安全系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 通过引入一种负载容量非线性模型, 对小世界网络的级联抗毁性进行了深入研究。在局部加权的负载重分配准则下, 仿真分析了权重系数、容量参数以及网络密度等对小世界网络级联抗毁性的影响, 并对网络成本和抗毁性能约束下小世界网络的级联抗毁性进行了优化分析。研究表明小世界网络的级联抗毁性随权重系数的增大而减弱, 不同密度的网络在权重系数较小时级联失效传播较慢, 且级联抗毁性对网络密度的敏感程度相差较大。另外, 存在最优容量参数组合使得小世界网络具有最强的级联抗毁性。研究成果能够为现实网络系统的抗毁性设计提供有益的参考和借鉴。

关键词: 小世界网络; 抗毁性; 级联失效; 非线性负载容量模型; 权重系数

中图分类号: N949

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)06-0001-07

Invulnerability of small-world network against cascading failure based on nonlinear load-capacity model

WU Xiao-ping, WANG Jia-sheng, QIN Yan-lin, YE Qing

(Department of Information Security, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To investigate the invulnerability of small-world networks against cascading failure, an improved nonlinear load-capacity model was introduced. Under the rule of local weighted load redistribution, the influence of weight coefficient, capacity parameters and density of the network on invulnerability of small-world networks against cascading failure was studied by numerical simulation. Then, qualitative analysis of invulnerability of small-world networks under the restrictions of cost and performance was presented. The results demonstrate that, invulnerability of small-world networks weakens with the increasing of the weight coefficient. In addition, the spreading of cascading failure of small-world networks with different density slows down when the weight coefficient is smaller, and that of the sensitiveness to network density is different. Moreover, there exists an optimal combination of capacity parameters which ensures that small-world networks reach the strongest invulnerability level. Research findings will provide useful guidance and reference in the optimization design of invulnerability for real complex networks.

Key words: small-world networks; invulnerability; cascading failure; nonlinear load-capacity model; weight coefficient

1 引言

复杂网络研究作为复杂性科学的一个重要分支, 近年来受到各学科领域研究人员的广泛关注^[1]。“顽健又脆弱”是复杂网络最基本和最重要的特征之一^[2], 复杂网络的抗毁性、顽健性、易损性、脆

弱性研究等具有重要的现实意义, 成为一个极其重要且富有挑战性的前沿课题。特别地, 随着信息和网络技术的迅猛发展, 现代社会对各类网络系统的依赖日益加深, 电力网络、金融网络、电信网络、交通网络等国家关键基础设施, 这些网络系统的安全性、稳定性等一系列严峻问题的出现, 其抗毁性

收稿日期: 2013-07-01; 修回日期: 2013-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71171198); 国家自然科学基金青年基金资助项目(61100042); 湖北省自然科学基金资助项目(2011CDB052)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (71171198); The National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (61100042); The Natural Science Foundation of Hubei Province (2011CDB052)

问题亟待研究和解决^[3]。级联失效是针对负载网络而言的,当负载网络中的节点(或边)发生随机故障或遭受蓄意攻击时,由于网络容量的有限性,其节点(边)上的负载要进行重分配,使得相连节点(边)上的负载超过其容量进而失效,这一级联过程可能导致整个网络系统的崩溃。在现实世界中,很多网络灾难都可以归结为这类级联崩溃问题,比如 2003 年的北美大停电事故、2011 年我国的银联网络故障以及印度大停电事故等,同样的问题也存在于电信、交通、互联网络等。

2 相关工作

复杂网络上的级联失效近年来得到了众多学者的极大关注,研究主要集中在 2 个方面:级联失效模型和级联失效分析。Watts 首先给出了一个级联失效过程的简单模型来解释现实世界中微小初始扰动触发罕见重大事件的现象^[4]。Crucitti 等提出了一种兼顾节点和边相继故障的混合模型^[5],其采用平均加权效率来衡量级联失效的严重程度。Zhao 等研究了复杂网络级联失效中的临界现象^[6],并给出了临界点的理论估计值。Wang 等提出了一种参数可调的无标度网络级联失效模型^[7],仿真分析了最优抗毁性网络的参数值以及抗毁性与网络密度之间的关系。Dou 等提出了一种负载容量模型^[8],并对常见的网络模型进行了仿真模拟。李勇等给出了网络负载局部扩展的级联抗毁性分析模型^[9],并采用多维分支的方法求解级联失效的临界值。任俊亮等提出了一种基于剩余容量的负载分配策略,并在此基础上建立了一个无标度网络的级联失效模型^[10],该模型网络资源利用率较高,抗毁性能较好。对于网络的级联抗毁性,Motter 等研究了不同类型网络的级联失效,结果表明异构网络的级联失效对蓄意攻击较为敏感^[11]。Wang 等研究了节点度乘积赋权策略下加权网络的顽健性,发现在局部加权的负载重分配准则下,网络存在最优权重分布使其具有最强顽健性,且该分布对不同网络结构是普适的^[12]。Mirzasoleiman 等研究了电力网、AS 级因特网的级联抗毁性,发现在端节点介数乘积赋权模型下,网络均具有最强顽健性^[13]。Li 等研究了在基于负载的蓄意攻击和随机攻击 2 种方式下加权网络的级联抗毁性^[14]。Babaei 等的工作表明模块化网络中内部连接对于网络顽健性具有重要影响^[15]。朱涛等研究了指挥控制网络的级联失效模型^[16],并对

指挥控制网络在不同条件下的抗毁性变化进行了定量分析。

在现实负载网络的设计与构建中,一个关键问题是网络容量的设定,如何根据实际情况设计出符合抗毁性需求的容量模型是非常重要的。文献[17]的工作表明大规模基础设施网络的负载与容量间呈现出非线性关系,这与以往工作^[6,7,10~16]中假定的负载容量关系是截然不同的。本文通过引入一种负载容量非线性模型,给出了小世界网络的赋权模型、网络参数等与级联抗毁性的定性关系,构建了小世界网络的抗毁性优化分析模型,并进行了定量分析研究。

3 复杂网络级联失效分析

3.1 级联失效基础理论

复杂网络的早期研究对象多为无权网络,即布尔网络。然而,实际网络表现出丰富的多样性使得用无权网络来描述实际网络时存在诸多不足^[18]。加权网络的出现为描述实际网络节点之间的相互作用提供了更好的手段,同时网络权重及其分布率也会对复杂网络结构和功能产生重要影响。

在实际工作中,将网络系统抽象为加权网络的过程已经有了很多研究成果^[19~21]。本文考虑的权重模型与节点的度相关^[22],赋权方式如下: $w_{ij} = w_{ji} = (k_i k_j)^\theta$, $\theta(\theta > 0)$ 用来描述权重与节点度之间的相互关系;边 ij 的 2 个节点的度值分别为 k_i 和 k_j 。这种加权网络模型的合理性已经为实证研究证实^[23~25],且得到了广泛应用。在该模型中,权重系数 θ 决定了网络中边权的异质性,当 $\theta = 0$ 时,边权都为 1,加权网络即退化为无权网络;当 $\theta > 0$ 时, θ 越大则网络中边的权重差异越大。

加权网络的级联失效可以假定为一个微小的初始攻击触发,比如切断网络中的一条边。级联失效发生时,这条边上的负载进行重分配,各条邻边上接收的负载与其自身权重成正比。如图 1 所示,当边 ij 失效时,其上的负载被重分配给了其邻边,且边 ik 接收到的流量 ΔI_{ik} 正比于其权重 w_{ik} ,表示为

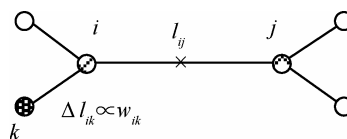


图 1 局部加权的负载重分配准则示意

$$\Delta l_{ik} = l_{ij} \frac{w_{ik}}{\sum_{a \in \Gamma_i} w_{ia} + \sum_{b \in \Gamma_j} w_{ib}}$$

其中, Γ_i 和 Γ_j 分别表示节点 i 和 j 邻居节点的集合。

级联失效发生后, 随着超载边的失效而不断传播, 直至网络中各边的负载都在其能处理的范围内为止。关于加权网络的初始负载, 研究人员通常将边的负载定义为该边的介数。Holme 等研究表明, 网络中边的介数正比于其端节点度的乘积^[26], 因而可以认为, 在级联失效发生之前, 边上的负载与其权重相等。

3.2 一种非线性负载容量模型

在实际网络系统中, 边的容量受网络成本和可用资源的约束。因此, 以往研究中假定节点(边)的容量正比于权重, 形如 $C = \lambda L$, 其中常数 $\lambda (\lambda > 1)$ 为容量参数, L 为负载。 $\lambda - 1$ 表示节点或边上的冗余容量, 反映其承受额外负担的能力。典型的例子是 Motter 等提出的 ML 模型^[11], 假设节点容量 C_i 正比于其负载 L_i , 函数形式如下

$$C_i = (1 + \alpha)L_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中, α 是容忍系数, 控制冗余资源比例。另外, Wang 等也提出了一个负载容量 WK 模型^[27], 容量 C_i 定义如下

$$C_i = (1 + \alpha \theta (\frac{L_i}{L_{\max}} - \beta))L_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中, $\alpha \in [0, \infty)$ 和 $\beta \in [0, 1)$ 是 2 个控制参数, $\theta(x)$ 是 Heaviside 阶梯函数, $L_{\max} = \max_i(L_i)$ 。当 $\beta = 0$ 时, 该模型就退化为 ML 模型。MK 模型的形式过于简单, 因而汪秉宏等^[28]引入有限资源的分配机制, 提出了一个新的负载容量模型

$$C_i = (1 + \alpha \frac{k_i^\gamma}{\langle k^\gamma \rangle})L_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中, $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$ 是自由参数, γ 是控制资源分配异质性的参数。在该模型中, 额外资源与拓扑结构是相互耦合的。额外资源的分配不仅依赖于节点的负载, 而且依赖于节点度。在相同的额外资源下, 该模型优于 ML 模型, 且加权网络的抗毁性随着参数 α 单调增加, 趋势较为稳定。上述模型中都倾向于保护网络中负载高的节点, 这仅仅是从网络防御的角度来讲的。然而, Kim 等对航空网、交通网、电力网等的研究发现, 网络中容量较小的节点(边)

反而具有较大的空闲容量^[17], 即表明负载与容量之间的非线性特征。本文引入 2 个容量参数, 给出了一种负载容量非线性模型, 其中加权网络边的容量为初始负载与额外负载的和

$$C_i = L + \beta L_i^\alpha \quad (4)$$

其中, $\alpha > 0$, $\beta > 0$ 。该模型中含有 2 个可变参数, 可以通过调节系数 α 和 β 来对不同网络的负载容量非线性模型进行调整, 且当 $\alpha = 1$ 时该模型即退化为 ML 模型。图 2 给出了 2 种模型在对数坐标系中的比较, 黑色线为参考线。

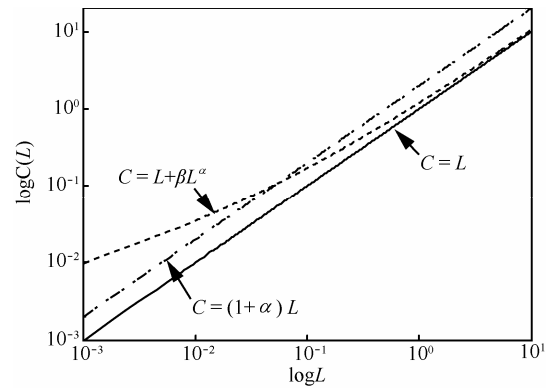


图2 非线性和线性负载容量模型

由图 2 可知, 非线性负载容量模型的曲线特征与实证研究的结论是一致的。

4 小世界网络级联抗毁性仿真分析

拓扑结构在网络动力学方面扮演着重要角色, 典型的拓扑结构网络有助于更好地理解与控制因子相继故障导致的灾难。实际网络大都是小世界网络, 为了更好地理解典型网络模型中特征参数与级联抗毁性之间的关系, 本文重点研究了小世界网络的级联抗毁性。首先, 构建小世界网络, 常见的小世界网络主要有 WS 小世界网络和 NW 小世界网络。由于 WS 小世界网络模型构造算法中的随机化重连可能破坏网络的连通性, 因此 Newman 和 Watts 提出了 NW 小世界网络。NW 小世界网络的构建采用在规则图上随机化加边的方式, 网络节点总数 $N=5\ 000$, $m_0=2$, p 在 $[0.1\ 1.0]$ 之间取值。然后, 对小世界网络进行赋权, 其中, θ 在 $[0\ 2]$ 之间取值。

小世界网络的级联抗毁性是与权重、容量参数等是密切相关的, 抗毁性解析分析较为复杂, 不易给出准确的解析模型, 本文主要采用数值模拟的方

法对其级联抗毁性进行分析。采用的仿真工具为 MATLAB 7.0 和 VC++6.0 工具软件,前者用来生成网络,后者用来对攻击过程进行模拟计算,仿真结果均为数次计算的平均值。在级联失效的仿真过程中,失效边的寻找采取了广度优先算法,级联失效的停止条件为各条边上的负载均不超过其容量,也就是当某条边被恶意攻击后,其上的负载被重新分配,然后判断负载重新分配后是否有邻边的负载超过其容量,如果有就将其断开,断边上的流量则继续重新分配,这个过程一直持续到网络中没有断边为止。另外,为了衡量整个网络的抗毁性,采用标准化崩塌规模^[18]来刻画级联失效对于网络的平均破坏程度。

4.1 容量参数固定的情况

小世界网络中边的容量是由容量参数决定的,通过实证研究获得容量参数的近似值。此处,设定容量参数 $\alpha = 0.45$, $\beta = 0.20$, NW 小世界网络的抗毁性变化曲线如图 3 所示。

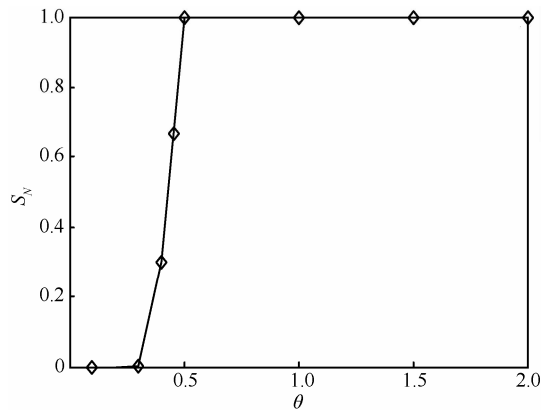


图 3 小世界网络抗毁性随 θ 的变化曲线

由图 3 可知,在 α , β 确定的情况下, NW 小世界网络的抗毁性随 θ 的增大而降低。当 $\theta \leq 0.3$ 时网络表现出较强的抗毁性,然而当 $\theta > 0.3$ 时, S_N 迅速增大,且当 $\theta > 0.4$ 时, NW 小世界网络全盘崩溃。这一结论与文献[7]进一步的研究结论完全不同。在负载容量线性模型中, NW 小世界网络的抗毁性变化曲线如图 4 所示。

文献[12]等采用线性负载容量模型研究了 NW 小世界网络的抗毁性,对其进行进一步的研究,可以发现随着失效范围的不断扩大,标准化崩塌规模与阈值 T 的关系遵循非线性规律。然而对于不同的阈值 T ,抗毁性与权重系数间没有显见的规律可循,这与本文上述得出的结论是截然不同的。

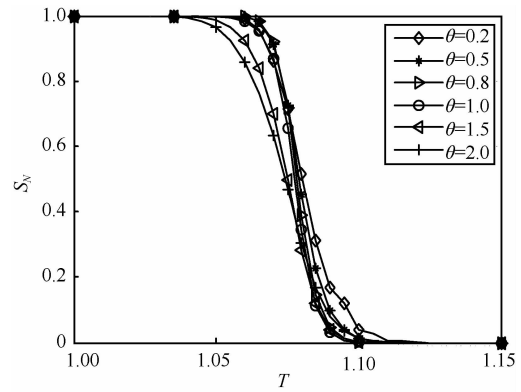
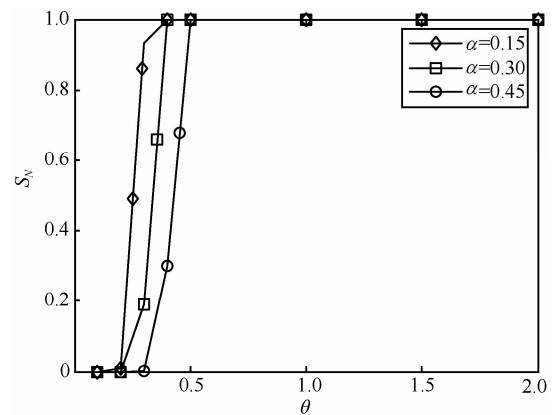


图 4 线性模型中小世界网络抗毁性的变化曲线

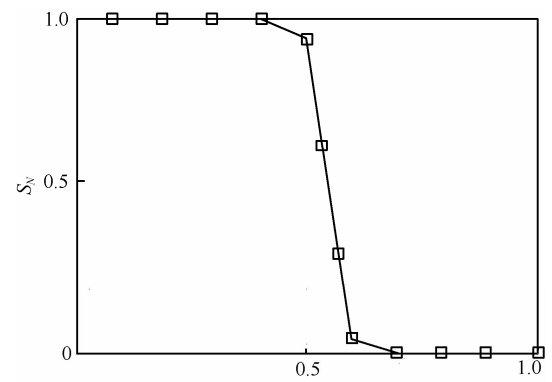
4.2 不同容量参数的情况

实证研究的结论表明,不同网络中负载容量的关系曲线不尽相同^[17]。图 5 和图 6 为 NW 小世界网络级联抗毁性与容量参数的关系曲线。

由图 5(a)可知, NW 小世界网络的级联抗毁性随 θ 的增大而降低,而随着 α 的不断增大,网络的抗毁性不断增强,图 5(b)为 $\theta = 0.5$ 的情形,权限存在一个临界点 α ($\alpha = 0.5$), α 继续增大时, NW 小世界网络抗毁性达到最强。在图 6 中,参数 β 对 NW 小世界网络级联抗毁性的影响与 α 类似。

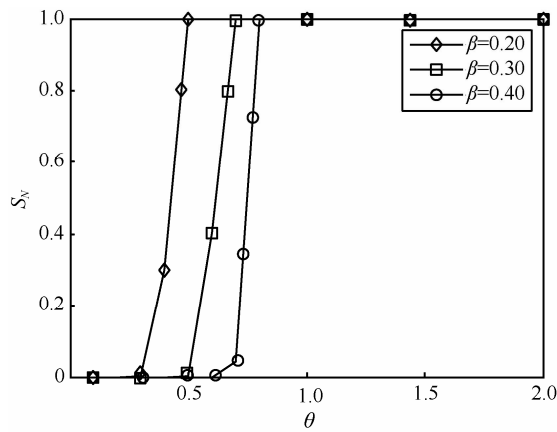


(a) $\beta = 0.20$, α 分别取 0.15, 0.30, 0.45 时的情形

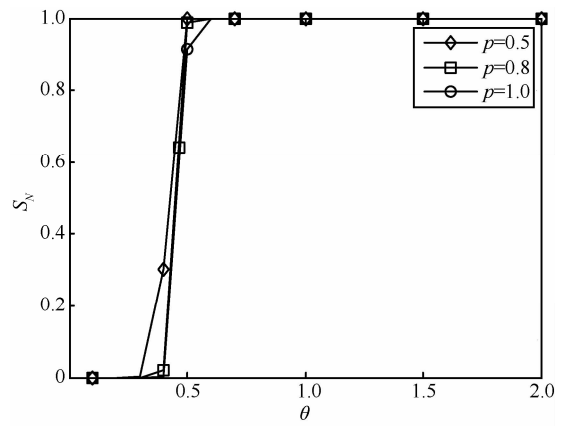


(b) $\beta = 0.20$, $\theta = 0.5$ 时的情形

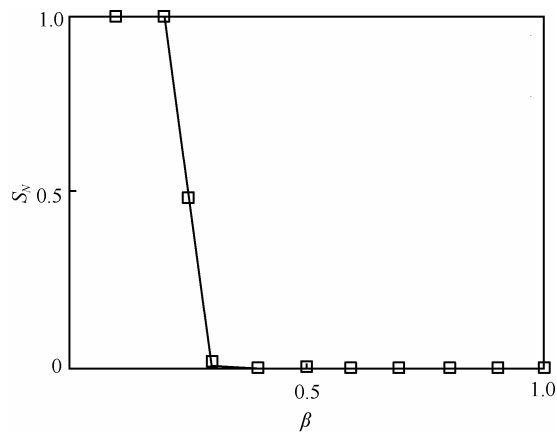
图 5 小世界网络抗毁性随参数 α 的变化曲线



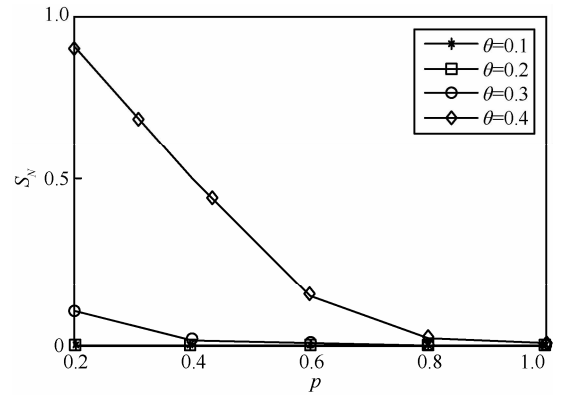
(a) $\alpha=0.45$, β 分别取 0.20, 0.30, 0.40 时的情形



(a) $\alpha=0.45, \beta=0.20$, p 分别取 0.5, 0.8, 1.0 的情形



(b) $\alpha=0.45, \theta=0.5$ 时的情形



(b) $\alpha=0.45, \beta=0.20$, θ 分别取 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 的情形

图 6 小世界网络抗毁性随参数 β 的变化曲线

由图 5 和图 6 可知，不同容量参数的 NW 小世界网络在权重系数较小时，表现出较强的抗毁性。随着容量参数的增大，网络中的冗余容量 ΔC 也不断增大，网络成本随即增加。在对网络抗毁性进行优化时，要协调权重系数与容量参数的关系以达到抗毁性最优。

4.3 网络密度对抗毁性的影响

网络密度对 NW 小世界网络级联抗毁性的影响与参数 p 相关，小世界网络级联抗毁性与参数 p 的关系曲线如图 7 所示。

由图 7(a)可知，随着权重系数 θ 的不断增大，NW 小世界网络的抗毁性不断减弱，且在 $\theta < 0.4$ 时抗毁性较强，当 $\theta > 0.5$ 时抗毁性较弱。NW 小世界网络的级联抗毁性与 p 的关系如图 7(b)所示，可以看出在 $\theta = 0.4$ 的情况下，NW 小世界网络的级联抗毁性随 p 的增大而不断增强，且不同 θ 值小世界网络的抗毁性对参数 p 的敏感程度相差较大， θ 值越小，网络密度越小，则小世界网络对 p 值的敏感度越小。

图 7 不同网络密度时小世界网络的抗毁性变化曲线

4.4 考虑成本与性能的抗毁性优化分析

现实网络的抗毁性优化设计需要考虑的另一个实际问题是：在成本给定的情况下，如何使得网络的抗毁性最优^[29]。前面主要研究了小世界网络的级联抗毁性与网络特征参数的定性关系，下面给出小世界网络级联抗毁性的定量分析模型。

在该模型中，NW 小世界网络的抗毁性可表示为顽健性与成本的函数

$$F = R - ((1 - \gamma) S(\langle k \rangle) + \gamma S(C)) \quad (5)$$

其中， F 为抗毁性目标函数， γ 为加权系数，表示边容量决定成本的重要性。网络成本和抗毁性约束下，NW 小世界网络的级联抗毁性与网络特征参数的关系如图 8 所示。

由图 8(a)可知，小世界网络在权重系数较小时，表现出较强的级联抗毁性，而随着权重系数的增大又迅速降低，到 $\theta \geq 0.5$ 时网络几乎全盘崩溃。由图 8(b)和图 8(c)可知，小世界网络的级联抗毁性随容量参数的增大表现出先强后减的趋势，表明 NW 小世界网络存在最优抗毁性，以 $\theta=0.5$ 为例，网络在 $\alpha=0.45, \beta=0.30$ 时抗毁性最强，函数值达到 0.89。

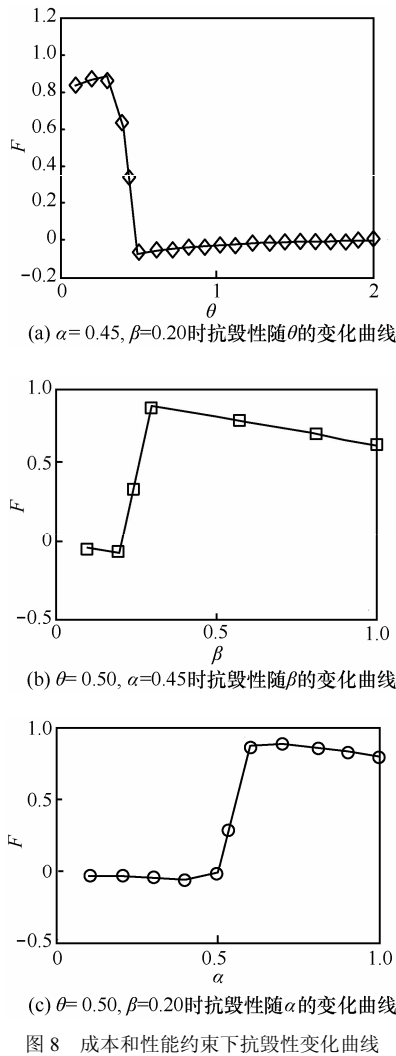


图 8 成本和性能约束下抗毁性变化曲线

此处仅考虑了 $\gamma = 1$ 的情况，这是因为容量成本对于小世界网络级联抗毁性的影响更大，且通过改变容量来优化复杂网络的级联抗毁性较改变网络密度的方法更具可操作性。

本文的研究成果能够从整体上把握小世界网络对于级联失效的顽健性，且能灵活调节网络特征参数使得网络的级联抗毁性取得最优。

5 结束语

本文对小世界网络在非线性负载容量模型条件下的级联抗毁性进行了深入研究。结果表明，对于不同参数特征的小世界网络，其抗毁性随权重系数的增大而降低，随容量参数的增大而增强，且存在最优网络参数使得网络的级联抗毁性达到最优，这与之前的研究成果是不同的。下一步研究将重点考虑加权网络在蓄意攻击下的级联抗毁性问题。

参考文献:

- [1] 陈关荣, 陈增强, 吕金虎. 复杂网络科学与工程的研究进展[J]. 系统工程学报, 2010, 25(6): 723-724.
CHEN G R, CHEN Z Q, LV J H. Advances on complex networks science and engineering[J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(6): 723-724.
- [2] ZHANG Z Z, SHAN T, CHEN G R. Random walks on weighted networks[J]. Phys Rev E, 2013, 87: 012112.
- [3] 王甲生, 吴晓平, 陈永强. 不同信息条件下加权复杂网络抗毁性仿真研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(5): 1888-1894.
WANG J S, WU X P, CHEN Y Q. Invulnerability simulation of weighted complex networks with different information[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(5): 1888-1894.
- [4] WATTS D J. A simple model of global cascades on random networks[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2002, 99(9): 5766-5771.
- [5] CRUCITTI P, LATORA V, MARCHIORI M. Model for cascading failures in complex networks[J]. Phys Rev E, 2004, 69(4): 045104.
- [6] ZHAO L, KWANGHO P, LAI Y C. Attack vulnerability of scale-free networks due to cascading breakdown[J]. Phys Rev E, 2004, 70(3): 035101.
- [7] WANG J W, RONG L L, ZHANG L. A new cascading model on scale-free network with tunable parameter[A]. Proceedings of the first international conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems[C]. 2008.321-324.
- [8] DOU B L, WANG X G, ZHANG S Y. Robustness of networks against cascading failures[J]. Physica A, 2010, 389(11): 2310-2317.
- [9] 李勇, 吴俊, 谭跃进. 物流保障网络级联失效临界抗毁性[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(5): 1030-1034.
LI Y, WU J, TAN Y J. Critical invulnerability study for cascading failure of tactical logistics networks[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(5): 1030-1034.
- [10] 任俊亮, 申卯兴, 全蕊等. 无尺度网络中降低相继故障规模的策略研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(33): 82-84.
REN J L, SHEN M X, TONG R, et al. Study of reducing size of cascading failures in scale-free network[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(33): 82-84.
- [11] MOTTER A E, LAI Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Phys Rev E, 2002, 66(6): 065102.
- [12] WANG W X, CHEN G R. Universal robustness characteristic of weighted networks against cascading failure[J]. Phys Rev E, 2008, 77: 026101.
- [13] MIRZASOLEIMAN B, BABAEI M, JALILI M, et al. Cascaded failures in weighted networks[J]. Phys Rev E, 2011, 84(4): 046114.
- [14] LI S D, LI L X, YANG Y X, et al. Revealing the process of edge-based-attack cascading failures[J]. Nonlinear Dyn, 2012, 69(3): 837-845.
- [15] BABAEI, M GHASSEMIEH H, JALILI M. Cascading failure tolerance of modular small-world networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2011, 58(8): 527-531.
- [16] 朱涛, 常国岑, 张水平等. 基于复杂网络的指挥控制级联失效模型研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(8): 1817-1820.
ZHU T, CHANG G C, ZHANG S P, et al. Research on model of cascading failure in command and control based on complex networks[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(8): 1817-1820.
- [17] KIM D H, MOTTER A E. Resource allocation pattern in infrastructure

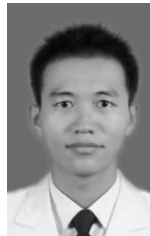
networks[J]. *J Phys A: Math Theor*, 2008, 41(22): 224019.

- [18] 王甲生, 吴晓平, 陈永强. 加权无标度网络级联抗毁性研究[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2013, 10(2): 13-19.
WANG J S, WU X P, CHEN Y Q. Invulnerability of weighted scale-free networks against cascading failure[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2013, 10(2): 13-19.
- [19] YOON S H, JEONG H, BARABASI A L, *et al.* Weighted evolving networks[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(25): 5835-5838.
- [20] ANTAL T, KRAPIVSKY P L. Weight-driven growing networks[J]. *Phys Rev E*, 2005, 71(2): 026103.
- [21] BARRAT A, BARTHELEMY M, VESPIGNANI A. Weighted evolving networks: coupling topology and weight dynamics[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(22):228701.
- [22] ZHANG Y C, ZHOU S, ZHANG Z Z, *et al.* Traffic fluctuation on weighted networks[J]. *IEEE Circuits and Systems*, 2012, 12(1):33-44.
- [23] BARRAT A, BARTHELEMY M, PASTOR-SATORRAS R, *et al.* The architecture of complex weighted networks[J]. *Proc Natl Acad Sci, USA*, 2004, 101:3747-3752.
- [24] ALMAAS E, Kovacs B, OLTVAL Z N, *et al.* Global organization of metabolic fluxes in the bacterium *Escherichia coli*[J]. *Nature*, 2004, 427:839-843.
- [25] WANG W X, WANG B H, HU B, *et al.* General dynamics of topology and traffic on weighted technological networks[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94:188702.
- [26] HOLME P, KIM B J, YOON C N, *et al.* Attack vulnerability of complex networks[J]. *Phys Rev E*, 2002, 65(5):056109.
- [27] WANG B, KIM B J. A high robustness and low cost model for cascading failures[J]. *Europhys Lett*, 2007, 78(4):48001.
- [28] 汪秉宏. 交通流研究最新进展综述[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2010, 7(4):65-73.
WANG B H. The recent advancements for traffic flow research at USTC[J]. *Complex systems and complexity science*, 2010, 7(4): 65-73.
- [29] LI P, WANG B H, SUN H, *et al.* A limited resource model of fault-tolerant capability against cascading failure of complex network[J]. *Eur Phys J B*, 2008, 62:101-104.

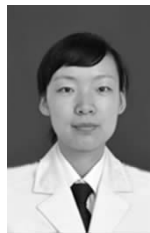
作者简介:



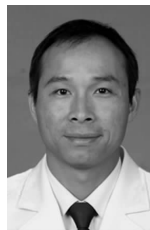
吴晓平 (1961-), 男, 山西新绛人, 博士, 海军工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信息系统安全、装备优化设计、系统分析与决策等。



王甲生 (1984-), 男, 陕西合阳人, 博士, 海军工程大学讲师, 主要研究方向为复杂系统分析、建模与仿真。



秦艳琳 (1980-), 女, 河南安阳人, 博士, 海军工程大学讲师, 主要研究方向为动态信任管理理论及网络安全。



叶清 (1978-), 男, 湖北蕲春人, 博士, 海军工程大学副教授, 主要研究方向为无线传感器网络脆弱性分析。