

加权 BA 网络负荷重分配建模及级联抗毁性

李朝阳, 杨任农, 韩海艳, 冯超

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

摘要 增强复杂网络在级联故障下的抗毁性具有重要的实际应用意义。在考虑了网络中边之间的差异性, 基于 BA 无标度网络模型构建了加权 BA 无标度网络模型, 对负荷重分配策略进行建模, 分析了分配过程中局部规模大小对网络抗毁性的影响, 确定出了最佳负荷重分配策略, 并研究了蓄意攻击条件下采取不同负荷重分配策略时重要网络参数对网络抗毁性的影响。仿真结果表明, 局部规模越小、权重系数越小、平均度越大, 网络的抗毁性越强, 且采用就近局部负荷重分配策略时网络抗毁性始终高于采用就近全局负荷重分配策略时网络的抗毁性。研究结果可为提高复杂系统的级联抗毁性提供理论参考。

关键词 加权无标度网络; 负荷重分配; 级联失效; 抗毁性

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.03.011

中图分类号 TP393; N945.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)03-0060-06

A Load Reallocation Model for Weighted Scale-Free Network and Cascading Invulnerability Research

LI Zhaoyang, YANG Rennong, HAN Haiyan, FENG Chao

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: On consideration of the difference between edges in the network, this paper constructs a weighted scale-free network model based on the BA scale-free network model, builds a load reallocation strategy model analyzes the efforts of local distribution size of network on survivability determines the optimal load reallocation strategy, and analyzes the influence of network parameters on the network invulnerability under deliberate attack condition and different load reallocation strategies. The simulation results show that the smaller the network weight coefficient and the greater the average degree, the stronger the network survivability, namely the network's cascading invulnerability becomes stronger while the network is more homogenous and denser and the network's invulnerability is always superior to the handy full load reallocation when the handy local load reallocation strategy is adopted. This research can provide a theoretical reference for improving the network invulnerability.

Key words: weighted scale-free network; load reallocation; cascading failure; invulnerability

现实世界中存在着各种各样的复杂系统, 如 Internet、通信网络、城市交通网络、航空网络等^[1-4], 均

可以看作复杂网络。维持这些系统的正常运行, 提高其抗毁性具有重要的现实意义。网络的抗毁性可

收稿日期: 2016-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(71501184); 航空科学基金(20155196022)

作者简介: 李朝阳(1993—), 男, 河南漯河人, 硕士生, 主要从事复杂网络理论及应用研究。E-mail: lzy_shine@163.com

引用格式: 李朝阳, 杨任农, 韩海艳, 等. 加权 BA 网络负荷重分配建模及级联抗毁性[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(3): 60-65. LI Zhaoyang, YANG Rennong, HAN Haiyan, et al. A Load Reallocation Model for Weighted Scale-Free Network and Cascading Invulnerability Research[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3): 60-65.

分为静态抗毁性和动态抗毁性,动态抗毁性又称为级联抗毁性,近年来受到持续的研究^[5-6]。在动态抗毁性中考虑了网络的动力学行为,网络中的节点(边)均承担相应的负荷,节点(边)出现故障会导致其它节点(边)发生故障,进而引发负荷的重新分配,导致更大规模的网络故障,引发级联故障。

在复杂网络的抗毁性分析中,如何对网络的级联失效进行建模分析是研究的重点。文献[7]中,Barabási 和 Albert 提出了 BA 无标度网络的概念,揭示了复杂网络的无标度特性以及无标度网络在蓄意攻击下的脆弱性;文献[8]中,Motter 和 Lai 提出了一种典型的“负荷-容量”模型,即 ML 模型,将节点的容量定义为初始负荷的线性函数,初始负荷是介数的相关函数,但计算介数时需要考虑全局信息,耗时长,不适用于大规模网络研究;文献[9]用节点度来描述初始负荷,只需知道节点度便可求出节点初始负荷,而求解节点度只需了解局部信息,较为方便。在现实生活中众多实例^[10-11]表明采用加权网络来描述复杂系统更加贴合实际,近年来学者更加关注加权网络的研究。在研究加权网络时,普遍引入边权和点权的概念^[12-14]。文献[15]中,将节点强度定义为节点的所有邻边的权值之和,这既考虑了节点的邻边数目,又考虑了边之间的差异性。节点负荷重分配是一个复杂的系统工程,文献[16]中,每个节点对应着3种状态:正常,过载和失效,当节点上的负载减少后,还能够恢复到正常状态;文献[17]结合网络节点负载实时动态信息,提出了一种负载动态重分配策略,根据节点的度与节点实时处理效率计算节点的权重,按节点权重从高到低的排序进行负载分配;文献[14~15]指出节点失效后负荷按比例转移至失效节点的邻居节点。

在无标度网络抗毁性的研究中,重点在于探索影响网络抗毁性的因素以及如何提高网络的抗毁性。结合前人研究,为了进一步提高无标度网络的抗毁性,本文在 BA 无标度网络模型的基础上,构建了加权 BA 无标度网络模型,并基于文献[18]提出的“负荷-容量”模型,对负荷重分配策略进行建模,得到最佳分配策略,最后研究了蓄意攻击方式下,关键网络参数对网络级联抗毁性的影响。

1 加权 BA 无标度网络模型

在现实复杂网络中,连边具有差异性,在研究网络抗毁性时,需要考虑该特点,基于此在 BA 无标度网络模型中对节点间的连边进行加权处理,构建出加权 BA 无标度网络模型。加权 BA 无标度网络按

照如下2个步骤生成:

1)按照增长机制和优先连接机制生成 BA 无标度网络;①增长机制:从一个具有 m_0 个孤立节点的小规模网络开始,每次引入一个新的节点,与 m ($m \leq m_0$) 个已存在的节点相连;②优先连接机制:在引入新节点的过程中,新节点与已存在节点 i 相连的概率 p_i 与节点 i 的度 k_i 成正比,即:

$$p_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (1)$$

t 步后,就生成了一个具有 $N=t+m_0$ 个节点和 $E=mt$ 条边的网络。

2)引入边权和节点强度的概念,通过改变权重系数对 BA 无标度网络进行加权。

将边的权值 w_{ij} 定义为与该边相连的两个节点 i 与 j 的度 k_i 和 k_j 的函数^[18]:

$$w_{ij} = w_{ji} = (k_i k_j)^\theta \quad (2)$$

节点强度 S_i 定义为与该节点相连的所有边的权值之和:

$$S_i = \sum_{j \in \Gamma} w_{ij} \quad (3)$$

权重系数 θ 决定了网络中边的差异性,同时也决定了网络的加权性, θ 越大则各边之间的差异越大, $\theta=0$ 时,所有边的权值均为 $w_{ij} = w_{ji} = 1$,此时边之间没有任何差异,网络属于无权网络;边权函数 w_{ij} 可以看作关于 θ 的指数函数,当 $\theta \neq 0$ 且 θ 变化时, w_{ij} 会随之出现指数变化,且 θ 越大,边的差异性越大,即通过改变系数 θ 来改变边之间的差异性,通过系数的改变来实现边的加权^[16-18]。

按照以上步骤即可生成加权 BA 无标度网络。

2 级联失效模型

2.1 “负荷-容量”模型

本文采用 Motter 和 Lai 提出的“负荷-容量”模型——ML 模型^[8]。该模型适用于定量的网络,即网络中的总负荷是一定的,不会改变,负荷只会在节点之间转移,不会消失。ML 模型中将节点的容量 C_i 定义为初始负荷 $L_i(0)$ 的线性函数:

$$C_i = (1 + \beta)L_i(0) \quad (4)$$

式中: β 为容忍系数, β 越大,网络的容量越大,节点承受额外负荷的能力越强,但是由于成本等因素的限制, β 不可能无限大,原则上在满足要求的情况下, β 越小越好。

在 ML 模型中,用节点的介数定义其负载,介数是指节点 i 到节点 j 经过节点 k 的最短路径条数与节点 i 到节点 j 的所有最短路径条数的比值^[19]。

获取网络的介数需要了解网络的全局信息,运算量大,不易进行;而节点强度作为对节点度的拓展,计算时只需要了解网络的局部信息,运算简单。现对ML模型进行改进,将节点的初始负荷表示为节点强度 S_i 的函数:

$$L_i(0) = rS_i^\alpha \quad (5)$$

式中: $r > 0, \alpha > 0$ 为可调参数,用于控制节点的初始负荷。

2.2 基于级联失效的负荷重分配策略建模

当网络中的一个或多个节点失效时,这部分失效节点的负荷就转移到其它节点,在节点失效后负荷的重新分配过程中采取不同的分配方式对网络的级联失效过程有着不同程度的影响。

在众多针对复杂网络级联故障的研究中,节点负荷重新分配过程一般采用就近全局负荷重分配策略^[7,11]:将失效节点的负荷按其邻居节点的容量比重分配至该节点的所有邻居节点——与该节点直接相连的节点。如果节点 i 出现故障,则节点 i 的负荷按照式(6)完全被其邻居节点分担,它的一个邻居节点 j 接收的负荷的比例为:

$$\lambda_j = C_j / \sum_{n \in \Gamma_i} C_n \quad (6)$$

式中: λ_j 表示节点 j 接收负荷的比例, Γ_i 表示节点 i 的邻居节点的集合。

节点 i 故障后分配给节点 j 的负荷 ΔL_{ij} 为:

$$\Delta L_{ij} = \lambda_j L_i = \frac{C_j}{\sum_{j \in \Gamma_i} C_j} L_i \quad (7)$$

该公式需要限制节点就近,接受负荷的节点 j 限定为节点 i 的邻居节点。其中, L_i 表示节点 i 失效时所承担的负荷。

为了提高网络的抗毁性,对就近全局负荷重分配策略进行建模得到就近局部负荷重分配策略:该策略在节点出现故障时的节点转移对象仍然是该节点的邻居节点,但只是部分邻居节点,所以称之为就近局部,就近级只有一级。在就近局部负荷重分配策略中,节点失效后负荷按照2个步骤进行分配,见图1。

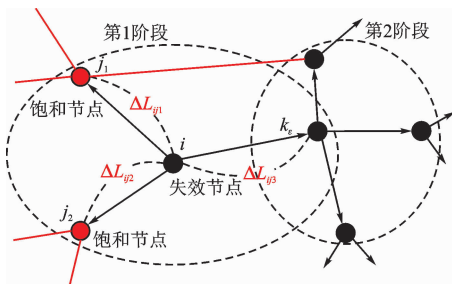


图1 节点失效后负荷重分配示意图

Fig. 1 Schematic diagram of load redistribution after node failure

1)将被攻击节点负荷 L_i 就近分配。

定义节点 i 的每个邻居节点接受负荷后达到节点 i 饱和容量的百分比为 u ,如果节点 i 的负荷 L_i 小于其邻居节点的总空闲容量的特定额度,即:

$$L_i \leq \sum_{j \in \Gamma_i} (uC_j - L_j) \quad (8)$$

则将 L_i 按照就近全局负荷重分配策略分配至其邻居节点,跳过步骤2,负荷重分配过程结束;否则先使节点 i 的所有邻居节点接近其饱和容量,在此设定 u 为99%,即接受负荷的节点 j 接受负荷最多为 uC_j ,为接受负荷的节点保留部分冗余容量防止其它故障,实际应用中 u 可以根据网络状况来选择。然后在节点 i 的邻居节点中选择 n ($n \geq 1$) 个容量最小的节点 k_ϵ ($k_\epsilon \in \Gamma_i, \epsilon \in [1, n]$),将节点 i 的剩余负荷按比重全部加载至该部分节点。如图1所示,首先节点 k_ϵ, j_1, j_2 均处于接近饱和状态,然后选择 n 个容量最小的节点 k_ϵ 接收所有剩余负荷,此时其中一个节点 k_i ($k_i \in k_\epsilon$) 上的负荷 L_{k_i} 满足:

$$L_{k_i} = uC_{k_i} + \frac{L_{k_i}}{\sum_{k_i \in k_\epsilon} L_{k_i}} \phi_i \quad (9)$$

式中: ϕ_i 表示节点 i 的所有邻居节点达到其额定容量 uC_j 后节点 i 上仍然剩余的负荷,即:

$$\phi_i = L_i - \sum_{j \in \Gamma_i} (uC_j - L_j) \quad (10)$$

2)步骤1)结束后,节点 k_ϵ 必然处于失效状态,这部分节点所承担的负荷按照就近全局负荷重分配策略分配至其它节点,继续完成级联失效过程。

下文为了简便表述,用策略1代指就近局部负荷重分配策略;用策略2代指就近全局负荷重分配策略。

2.3 级联失效评价指标

在衡量级联失效后网络的抗毁性时,采用剩余节点的总强度与级联失效前网络节点的总强度的比值 G 来表示:

$$G = \sum_{i \in R} S_i / \sum_j S_j - S_{\max} \quad (11)$$

式中: R 表示级联失效过程结束后剩余节点, S_{\max} 表示遭受蓄意攻击节点的节点强度。 $0 \leq G \leq 1$, G 越大,网络的抗毁性越强。

3 仿真分析

在对网络的抗毁性进行研究时,由于级联抗毁性过程具有动态性,很难进行解析分析,现有对级联抗毁性的研究大都采用仿真分析的方法^[14]。本文同样采用仿真分析的方法对无标度网络在节点遭受蓄意攻击时的级联抗毁性进行研究。

按照加权 BA 无标度网络的生成方法,首先生成 BA 无标度网络,然后对网络进行加权得到加权 BA 无标度网络。在蓄意攻击时,选取网络中节点强度最大的节点作为目标节点,其中,网络参数 $r=1, \alpha=1, N=1\ 000$ 。

图 2 是本部分的建模探索流程,该过程按照“层层递进,逐步探索,寻找最优”科学研究方法,在研究过程中不断放缩局部规模的范围,最终确定最优。先固定平均度和权重系数,通过改变容忍系数探索出策略 2 中的最优局部规模,而后再改变平均度和权重系数,从而验证了策略 2 的合理性。

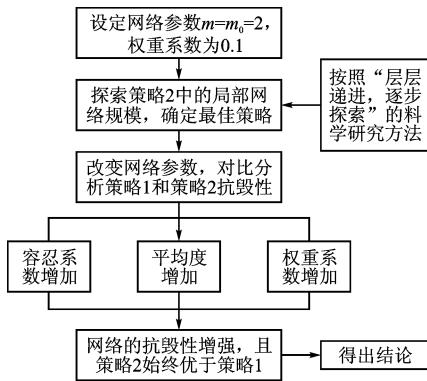


图 2 仿真探索流程

Fig. 2 Simulation exploration process

3.1 确定就近局部重分配策略中的 n 值

设定网络参数 $m=m_0=2$, 权重系数 $\theta=0.1$, 按步骤生成加权 BA 无标度网络。由于网络总体规模 $N=1\ 000$ 时, n 值的范围较大, 不便于直接确定其大小。首先对策略 2 中 n 值的规模进行分析。分别选取 n/N 为 0.1、0.2、0.5 和 1.0 时, 分析网络的抗毁性变化关系。

图 3 显示了加权 BA 无标度网络遭受蓄意攻击时, 抗毁性随局部分配规模大小的变化关系。可以看出, 攻击网络中负荷最大的节点, 局部分配规模 $n/N=0.1$ 时抗毁性曲线位于最上端, 此时网络的抗毁性最强。

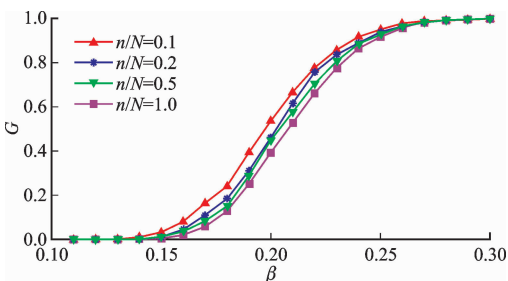


图 3 不同局部规模时网络的抗毁性

Fig. 3 Invulnerability of network of different local scale

为了进一步确定 n 值的大小, 在 $n/N=0.1$ 的基础上继续减小 n/N 的值, n 分别选取 1、2、3, 观察

网络的抗毁性变化关系, 见图 4。

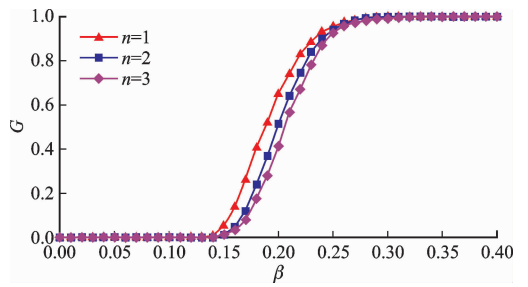


图 4 不同 n 值网络的抗毁性

Fig. 4 Invulnerability of network when n change

从图 4 可以看出随着 n 值的减小, 即 n/N 减小, 网络的抗毁性不断增强, 当 $n=1$ 时网络的抗毁性达到最强。在策略 2 中, 保持网络的其它参数不变, 局部网络规模为 $n=1$ 时加权 BA 无标度网络的抗毁性最强。

上述结果表明: 网络在蓄意攻击下, 局部分配规模越小, 网络的抗毁性越好。这是由于网络局部分配规模较小时, 网络在初次负荷重分配过程中更多的大负荷节点得以保留, 可以正常工作, 这部分节点的负荷不用参与到下一阶段的负荷分配, 使得后续分配过程中需要分配的总负荷减小, 大大减轻了剩余节点的压力, 更多的节点保留下来, 最终使得网络的抗毁性增强。该结果仅限于在对单目标进行攻击方式下, 策略 2 相比策略 1 具有优越性。

3.2 权重系数对网络抗毁性的影响

对于加权网络, 在确定负荷就近局部重分配策略中 n 值的大小之后, 继续分析权重系数 θ 对网络抗毁性的影响。图 5 为 2 种策略下不同权重系数网络的抗毁性曲线。

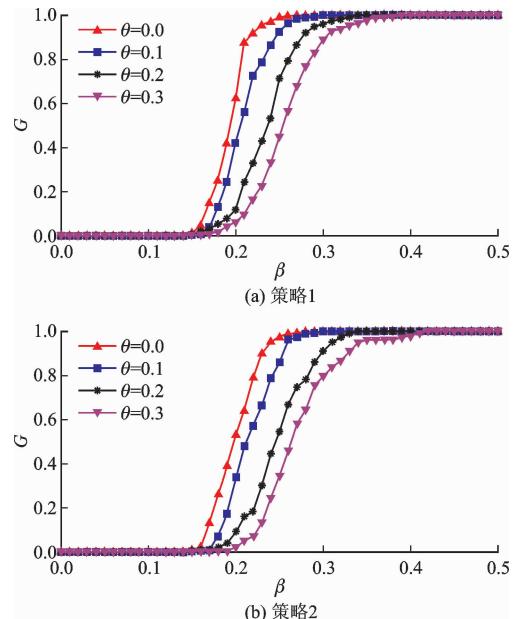


图 5 2 种策略下网络的 $G \sim \beta$ 曲线

Fig. 5 $G \sim \beta$ curve of network under two kinds of strategies

由图5可知,对于策略1和策略2,当权重系数 $\theta=0$ 时网络的抗毁性均达到最强,此时加权网络退化为无权网络,网络中的边没有差异性。随着权重系数的增大,网络的边之间的差异性随之增大,节点强度的差异性也在不断增大,网络的抗毁性则不断减小。为了判断当权重系数变化时,策略1是否始终优于策略2,现分析权重系数变化时网络在不同策略下的抗毁性,结果见图6。

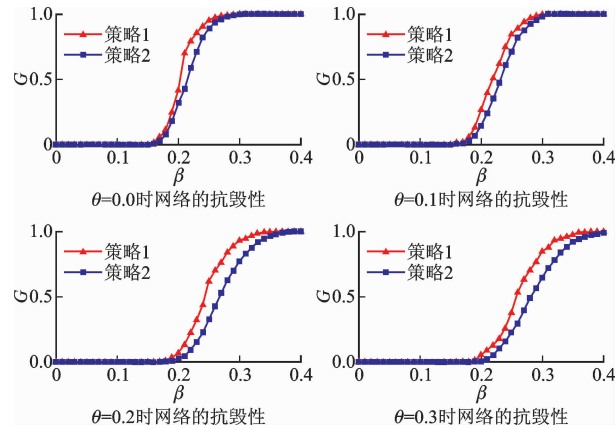


图6 不同权重系数网络的 $G\sim\beta$ 曲线

Fig. 6 $G\sim\beta$ curve of network under different weight coefficient

综合分析图6可以看出,无论网络的权重系数如何变化,采用策略1时网络的抗毁性始终优于采用策略2时网络的抗毁性,不同的是随着权重系数的增大,网络的 $G\sim\beta$ 曲线整体右移,网络的抗毁性随权重系数的增大而降低,这与图5结果一致。

结合图6结果,进一步分析无权网络在策略2下的抗毁性相较于策略1下的提高率与权重系数的关系,现将网络的抗毁性提高率表征为:网络的容忍系数处于一定范围内时其抗毁性提升幅度的平均值。统计意义下的计算结果见表1。

通过表1可以看出,随着权重系数的增加,网络的抗毁性提升幅度也逐渐增大,这与文献[14]的结果一致。在网络规模 $N=1000$,权重系数 $\theta=0.3$,网络抗毁性的提高率接近10%,明显提升网络的抗毁性。

表1 不同权重系数时网络的抗毁性提高率

Tab. 1 Increase rate of invulnerability of network under different weight coefficient

权重系数	0	0.1	0.2	0.3
提高率/%	7.11	7.26	8.39	9.23

3.3 平均度对网络抗毁性的影响

网络的平均度表示网络中与一个节点相连的边的数目的平均值,前面的分析研究均是在 $m=m_0=2$ 的条件下完成的,为进一步衡量网络负荷重分配

模型的适应性和通用性,需要对不同平均度下网络的抗毁性进行分析。

网络的平均度 $\langle k \rangle = 2m$,通过控制 m 可以改变网络的平均度,选取网络的权重系数 $\theta=0.1, m_0=4, m$ 分别取1、2、3,对加权BA无标度网络在2种负荷重分配策略下的抗毁性进行仿真,仿真结果见图7。

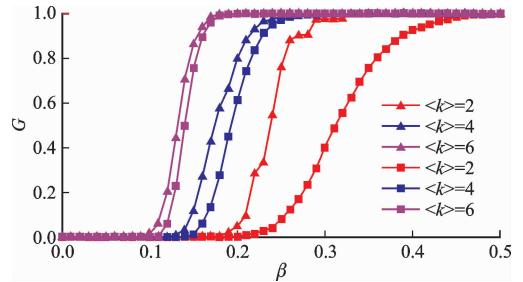


图7 不同平均度时网络的抗毁性

Fig. 7 Invulnerability of network of different average degree

由图7可知,当采取相同的负荷重分配策略时,随着网络平均度的增大,网络的抗毁性不断增强,这与文献[14~15]关于BA无标度网络的抗毁性分析是一致的;当网络的平均度保持不变时,采取策略1时网络的抗毁性曲线均处于采用策略2时抗毁性曲线的上方。结果表明:在加权BA无标度网络中,当网络的平均度改变时,采用负荷局部重分配策略具有优越性。但不论采取哪种负荷分配策略,随着平均度的增大,网络节点间联系的紧密性必然增强,网络化程度增强,使得初始节点失效后有更多的负荷转移途径,从而增强了网络的抗毁性。

4 结语

级联故障普遍存在于现实复杂系统中,且众多复杂系统具有无标度特性,提高无标度网络的抗毁性意义十分重大。本文考虑了网络中边之间的差异性,在BA无标度网络模型的基础上改进得到加权BA无标度网络模型,利用基于节点强度的“负荷一容量”模型,进行负荷重分配过程建模,逐步探索得出最优负荷重分配局部规模,最终得出了最佳分配策略。通过仿真对比分析了重要网络参数下无标度网络采用2种负荷重分配策略的抗毁性,验证了改进策略的合理性。结果表明,在蓄意攻击方式下,采用负荷就近局部重分配策略可以明显提高无标度网络的抗毁性。该研究对于增强无标度网络的级联抗毁性、预防大规模级联故障具有重要的理论价值和现实意义。不足之处在于只对单目标节点的打击进行了分析,尚未考虑多目标节点攻击以及节点负荷重分配过程中的时间序列问题,下一步的工作将针

对多个目标节点遭受攻击情况下的时序负荷重分配进行研究。

参考文献(References):

- [1] VÁZQUEZ A, PASTPR-SATORRAS R, VESPIG-NANI A. Large-scale topological and Dynamical Properties of the Internet [J]. *Phys Rev E*, 2002, 65(6): 066130.
- [2] LI W Y, ZHANG X, JIA S C, et al. A Novel Dynamic Adjusting Algorithm for Load Balancing and Handover Co-Optimization in LTE SON [J]. *Journal of Computer Science & Technology*, 2013, 28(3): 437-444.
- [3] 王国华, 赵春燕. 基于复杂网络的长沙市道路交通网络鲁棒性研究 [J]. *计算机仿真*, 2014, 31(6): 178-182.
WANG G H, ZHAO C Y. Study on Robustness of ChangSha Road Traffic Network Based on Complex Network [J]. *Computer Simulation*, 2014, 31(6): 178-182. (in Chinese)
- [4] LI S M, XU X H, WANG F, et al. Topological Structure of US Flight Network Based on Complex Network Theory [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 32(5): 555-559.
- [5] REN T, WANG Y F, LIU M M, et al. Analysis of Robustness of Urban Bus Network [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(2): 020101.
- [6] ZHAO Z, ZHANG P, YANG H J. Cascading Failures in Interconnected Networks with Dynamical Redistribution of Loads [J]. *Physica A*, 2015, 433: 204-210.
- [7] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [8] MOTTER A E, LAI Y C. Cascade-Based Attacks on Complex Networks [J]. *Phys Rev E*, 2002, 66(6): 065102.
- [9] WANG J W, RONG L L, ZHANG L, et al. Attach Vulnerability of Scale-Free Networks Due to Cascading Failure [J]. *Physica A: Statistical and Its Applications*, 2008, 387(26): 6671-6678.
- [10] 王杰, 李雪. 基于改进 BA 模型的海运复杂网络演化研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2013, 37(3): 497-500.
WANG J, LI X. Analysis of Shipping Complex Network Evolving Based on Improved BA Model [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 37(3): 497-500. (in Chinese)
- [11] 张瑜, 营利荣, 张永升. 基于加权无标度网络的产学研合作网络演化 [J]. *系统工程*, 2015, 33(1): 69-73.
ZHANG Y, JIAN L R, ZHANG Y S. University-industry Cooperation Network Evaluation Based on Weighted Scale-free Network [J]. *System Engineering*, 2015, 33(1): 69-73. (in Chinese)
- [12] 张琨, 李配配, 朱保平, 等. 基于 PageRank 的有向加权复杂网络节点重要性评估方法 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(3): 429-434.
ZHANG K, LI P P, ZHU B P, et al. Evaluation Method for Node Importance in Directed-Weighted Complex Networks Based on Page Rank [J]. *Journal of Nanjing university of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(3): 429-434. (in Chinese)
- [13] 姜志鹏, 张多林, 马婧, 等. 权重演化的加权网络节点重要性评估方法 [J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2015, 16(2): 19-23.
JIANG Z P, ZHANG D L, MA J, et al. Research on Evaluation Method for Node Importance Based on Weight-evolving Network Model [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2015, 16(2): 19-23. (in Chinese)
- [14] 彭兴钊, 姚宏, 张志浩. 基于节点蓄意攻击的无标度网络级联抗毁性研究 [J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(9): 1974-1978.
PENG X Z, YAO H, ZHANG Z H. Research on Cascading Invulnerability of Scale-Free Networks Under Node-Based-Attack [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(9): 1974-1978. (in Chinese)
- [15] 彭兴钊, 姚宏, 肖明清. 加权网络的级联故障建模及其抗毁性分析 [J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(6): 1096-1102.
PENG X Z, YAO H, XIAO M Q. Cascading Failure Model for Weighted Networks and Invulnerability Analysis [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(6): 1096-1102. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [17] 李从东, 邓原, 原智峰, 等. 基于动态信息的级联失效负载重分配策略 [J]. *华南理工大学学报*, 2016, 44(5): 22-28.
LI C D, DENG Y, YUAN Z F, et al. Dynamic Information-Based Load Reallocation strategy for Cascading Failure Network [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2016, 44(5): 22-28. (in Chinese)
- [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, CHENG Y Q. Invulnerability of Weighted Scale-free Networks against Cascading Failure [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2013, 10(2): 13-19. (in Chinese)
- [19] 汪小凡, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
WANG X F, LI X, CHEN G R. *Complex Network and Its Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)