DOI:10. 19431/j. cnki. 1673-0062. 2018. 06. 015

边定向方法对随机网络抵制级联故障鲁棒性的影响

丁 琳,杨 泉,Ishimwe Bahati Parfait Thierry

(南华大学 计算机学院,湖南 衡阳 421001)

 摘 要:针对复杂网络抵制级联故障的鲁棒性问题,考虑节点权重和边的方向,通过 扩展经典的全局介数方法定义节点负载,提出了新的随机网络级联故障模型.应用三种边方向确定策略,在具有单向边和双向边的随机网络上探讨了级联故障行为,分析 了全局负载分布机制下定向边对网络抵制级联攻击鲁棒性的影响.仿真结果表明,对 于随机网络,所使用的边定向方法均可以使得网络更加鲁棒.但是,不同的边方向确 定策略和单向边比例对随机网络抵制级联故障鲁棒性的优化效果影响不大.
 关键词:边定向;级联故障;鲁棒性;随机网络
 中图分类号:TP393 文献标志码:A 文章编号:1673-0062(2018)06-0091-06

Effects of Link-orientation Methods on Robustness Against Cascading Failures in Random Networks

DING Lin, YANG Quan, Ishimwe Bahati Parfait THIERRY

(School of Computer, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to discuss the robustness of complex networks against cascading failures, by extending a classical global betweenness method to define the loads of nodes, a new cascading model for random networks is proposed, taking into account the weights of nodes and the directions of links. Applying three link direction-determining strategies, cascading failures behaviors are investigated in random networks with both unidirectional and bidirectional links. Then, the effects of unidirectional links on the network robustness against cascaded attack are analyzed under the global load-based distribution mechanism. The simulation results show that for random networks, the network robustness can be improved by these link-directed methods. But different edge direction-determination strategies and fractions of unidirectional links have little effect on optimizing robustness of random

收稿日期:2018-06-01

基金项目:国家自然科学基金项目(61403183);湖南省哲学社会科学基金项目(14YBA340);南华大学高层次引进人 才科研启动基金项目(2017XQD26)

作者简介:丁 琳(1981-),女,副教授,博士,主要从事复杂网络、信息安全等方面的研究.E-mail:linding1981@ 163.com

networks against cascading faults.

key words: link orientation; cascading failures; robustness; random networks

0 引 言

大多数自然和人造系统都能描述为网络,其 中实体通过物理或者抽象边连接,这迅速增加了 人们对网络理论及其应用领域的研究兴趣^[1-3].基 础设施系统,如电力网、因特网、车辆运输系统、航 空网等都是网络实例,这些网络给人们的生活提 供了极大的便利.然而,在这些网络中,非常局部 的攻击或随机故障就能引发整个网络的级联崩 溃,造成严重经济损失和社会混乱.典型的例子 如,发生在美国、加拿大、意大利、印度、中国等国 家的数次大规模停电^[4],因特网崩溃以及一些大 城市频繁的交通瘫痪^[5].在此背景下,网络应对攻 击和随机故障引发的级联故障的鲁棒性和安全性 一直是网络科学领域的研究热点.

根据现实网络级联故障的动态演化机制,为 了避免或至少减轻级联传播,研究者们已从许多 方面探讨了级联现象.众所周知,以流为形式的负 载,比如数据包或电流是许多基础设施网络的典 型特征.在早期研究中,节点或边的负载一般由全 局介数来估计.应用介数,A.E.Motter 等人^[6]的开 创性工作讨论了不同复杂网络,即无标度网络和 随机网络上基于级联的攻击.跟随该开创性工作, 复杂网络在不同负载分布和攻击策略下的鲁棒性 受到了许多关注[7-9].现有对网络负载的建模方法 主要分为两类:一类是基于节点或边的全局介数 的建模方法,称之为基于全局负载的建模方法;另 一类是基于节点局部度的建模方法,称之为基于 局部负载的建模方法.其中,在建模中也考虑了一 些网络加权方案.这些工作进一步表明,通过调整 负载分布,能够对网络抵制不同级联攻击的鲁棒 性产生影响.另一方面,不同的结构性质,如调节 局部边^[10]、度分布^[11]、聚类^[12]、同配性^[13]、相依 网络^[14]和空间嵌入式网络^[15],对网络鲁棒性的 影响也得到了广泛研究.这些工作有助于从潜在 网络结构的角度更好地理解级联现象,进而给出 对网络更合理有效的保护措施和方法.

然而,上述所有级联研究都是基于假设:网络中所有边都是无向或双向的.对于许多真实网络系统,如城市交通网络,一些边仅限于单向,一些边则是双向.也就是说,单向和双向边可在一个网络系统中共存.最近文献[16-17]将这两类边引入

级联模型,发现了在局部负载分配机制下边定向 方法增加了度分布同质的小世界网络和随机网 络,以及异质的无标度网络的脆弱性,但在全局负 载分配机制下,边定向方法可显著增强无标度网 络的鲁棒性.

为了深入的捕获级联故障和边定向下网络特 性之间的耦合,本文跟随文献[17]的研究,考虑 实际网络中负载分布、节点权值和边方向的典型 特征,引入一种基于介数的方法来分配节点负载, 构建了一个具有单向边和双向边的随机网络级联 故障模型,其中,单向边的方向由三种不同策略确 定.在该基于全局负载的级联模型下,探讨了边定 向策略对由单一最高负载节点攻击而引发的级联 故障的影响.仿真结果表明,边定向方法能够提高 Erdös-Rényi(ER)随机网络的鲁棒性.但是,不同 的边方向确定策略和单向边比例对随机网络抵制 级联故障鲁棒性的影响不大.本研究能为给网络 制定合理有效的保护策略提供依据.

1 模 型

1.1 边定向方法

为了建模一个具有双向和单向边的随机网络,首先考虑一个含有 N 个节点和 E 条边的 ER 随机网络^[6].令节点 i 的度为 k_i .假设单向边的比例被预定义为 f,即 $f = \frac{E_r}{E}$,其中 E_r 是单向边的数量.许多实证研究已表明,边 l_{ij} 上的负载与其端节点的度乘积成正比,即 $k_i \times k_j$.此外,对于真实网络,如城市交通网络,由于政府决策或研究人员建议,一部分高负载边(即具有高连接端节点的边)容易被选为定向以引导负载整体重新分布,进而降低中心节点传输拥塞的风险.因此,基于原始无向网络,边定向方法根据乘积值($k_i \times k_j$)降序排列所有边.然后, E_r 条边被依次选择为定向,以限定负载只沿一个方向流动.对于网络中其余的未定向边,它们可看作是具有两个相反方向的双向边.

本文根据边的端节点度值,考虑三种不同的 方向确定(direction-determining,DD)策略来决定 单向边的方向,包括由高到低方向确定(high-tolow direction-determining,HTLDD),由低到高方向 确定(low-to-high direction-determining,LTHDD)和 随机方向确定(random direction-determining, RDD)策略.在 HTLDD 中,单向边的方向由度高的 端节点指向另一个度低的端节点(如果单向边的 两端节点度值相同,则方向随机选择).在 LTHDD 中,单向边的方向由度低的端节点指向另一个度 高的端节点(如果单向边两端节点度值相同,则 方向随机选择).而对于 RDD,顾名思义,单向边 的方向是随机确定的.在真实网络结构中,如图 1(a)所示的存在没有出度的节点1和如图1(b) 所示的存在没有入度的节点1会导致该节点在一 定程度上被孤立,应该是不允许的.因此,在边定 向过程中,如果确定一条边的方向会导致它的两 个端节点中至少有一个没有入度或出度,则该边 不会被定向,进而选择下一条边.最终网络的边如 图1(c)所示,有部分是单向的,其余边是双向的.



link-directed mechanism

1.2 级联故障过程

基于一个具有单向边和双向边的随机网络, 本文考虑了负载动态.在许多真实网络中,不同形 式的负载从一个节点发送到另一个节点.一般来 说,当负载在两个不同节点之间传输时,沿着连接 这两个节点的全局最短路径路由最高效.因此,全 局介数被广泛使用以量化负载分布.节点负载(或 介数)被定义为通过该节点的最短路径总数.然 而,在被广泛使用的介数方法中,任意两个节点之 间只有一个单位的物理量沿最短路径传输.这里 的最短路径是针对无向网络设计的.并且,在这个 方法中节点间传输的物理量没有考虑网络权重, 忽视了真实网络中与网络拓扑强相关的权重具有 大的异质性.例如,在因特网中,每个路由器节点 生成的数据包可能不同,且一个拥有连接更多的 节点往往会产生更多的数据包.因此,考虑基于度 的节点权重和有向最短路径,本文引入文献[17] 的方法来分配节点负载,这比以前的方法能更实 际地定义负载物理量.

具体而言,首先定义节点 *i* 的权值为 $w_i = k_i^{\alpha}$, 其中 α 是一个控制着节点权重强度的可调参数, k. 是节点 i 在初始无向网络中的度.简单来说. 在 每个时间步,假设从节点 i 传输到节点 $i(i \neq i)$ 的 负载 $L_{i \rightarrow i} = w_i w_i$, 即 $L_{i \rightarrow i} = k_i^{\alpha} k_i^{\alpha}$.这些负载沿着连接 它们的有向最短路径传输.需要注意的是,节点负 载不能沿着从其最近邻居指向该节点的单向边传 输到其最近邻居.比如,在图1(c)中,节点1上负 载不能直接传输到节点2,但可以通过节点3和4 来实现,这意味着,不是直接到达,通过节点3和4 的路径成为了从节点1到节点2的最短路径.如 果两个给定节点间存在多条最短路径,就假设包 传输到每个分支点时被平均拆分.基于此,定义 $L_{a}^{(i,j)}$ 表示一个包在有序节点对 i 和 i 之间传输时 对节点 v 上负载的贡献.因此,从节点 i 到 i 传输 的负载 $L_{i\to i}$ 对节点 v 上负载所做的贡献为 $F_{v}^{(i,j)}$ = $L_{i_{-}}L_{s_{-}}^{(i,j)}$.这样,在t时刻节点v上负载 $L_{s}(t)$ 就等 于网络所有节点的每个有序对对节点 v 所做的贡 献之和.即

$$L_{v}(t) = \sum_{i,j} F_{v}^{(i,j)} = \sum_{i,j} L_{i \to j} L_{v}^{(i,j)}, v = 1, 2, \cdots, N.$$
(1)

特别地,当α=0,即每个节点的权值为1,和 f=0,即网络为无向时,节点上的负载就等于文献 [6,8,14]中被广泛使用的介数.

跟随以前的模型^[6],每个节点 v 都有一个容量 C_v,这是节点在每个时间步中可以处理的最大负载量.在人造网络中,容量受到成本的限制.因此,很自然地假定节点 v 的容量 C_v 正比于其初始负载 L_v(0),即

$$C_{v} = (1 + \beta)L_{v}(0)$$
 (2)

其中常数 β≥0 是容忍参数.应用这样一个容量定 义,在 t=0 的初始阶段,连通网络无疑保持着它 正常而有效的功能,因为每个节点的负载都不会 大于它们的容量.

本文聚焦于由移除最高负载节点而引发的级

联传播.之所以选择最高负载节点作为攻击或者 故障的对象,是因为这类节点在以前大多数级联 故障研究中起着重要作用.假设在 *t*=1 时执行攻 击,即从网络中移除一个具有最高负载的中心节 点.这个移除一般会改变全局最短路径的分布,导 致网络其余节点上负载的全局重新分配.对于某 些节点,更新的负载可能会增加而超过其容量.这 些节点发生故障并从网络中移除.这又将导致新 一轮的负载重新分配,结果可能会发生后续故障. 当所有剩余节点负载不超过其容量时,级联故障 传播才会停止.

级联所产生的破坏由级联故障结束后,最大 连通子图相对大小 $G = \frac{N'}{N}$ 和归一化雪崩规模 $S = S_i/(N-1)$ 来定量.这里 $N' 和 S_i$ 分别是最大连通子 图所包含的节点数和由移除节点 i 所导致的故障 节点数.这里, G 和 S 是描述网络鲁棒性的两个重 要序参量.显然, G 值越大且 S 值越小, 网络抵制 级联故障的鲁棒性就越强.

2 仿 真

在本节中,根据上述级联模型,探讨 ER 随机 网络的级联故障,其中网络边通过不同 DD 策略 定向.目的是为了分析,对于一个给定随机网络, 边定向方法对网络抵制级联故障鲁棒性的影响. 在基于 MATLAB 的数值仿真中,网络规模 *N* = 1 000,平均度 <*k*>=10.文献[17]已表明,权重参 数不会对边定向方法的有效性产生影响,因此本 文在给定 α=0 情况下进行仿真.考虑到模型所生 成的网络拓扑的差异对仿真结果的影响,如没有 特殊说明,每个结果都是通过对在 20 个独立网络 上的实验结果求均值而获得.

图 2 显示了当单向边比例 *f* 为不同值时, ER 网络在三种不同的边定向方法,即 HTLDD, LTHDD 和 RDD 方法下,最大连通子图相对值 *G* 和归一化雪崩规模 *S* 随 *β* 的演化.



图 2 ER 网络中,不同 f 时三种边定向方法下 G 和 $S 与 \beta$ 之间的关系 Fig.2 For ER networks, evolutions of G and S as functions of β for three link-directed methods with different f

显然,f=0对应于没有单向边的原始网络.如 前所述,更大的测度指标 G和更小的测度指标 S表明网络抵制级联故障更强的鲁棒性.根据 G和 S两种测度,随着 β 的增加,也就意味着每一个节 点增加了额外容量来接收从其它节点重新分布的 负载,从图 2 可以看出,在给定 f的每种 DD 策略 下,网络鲁棒性如所期望的一样增加.此外,图 2 表明,当 $f\neq0$ 时,带有任意 DD 策略的网络比没有 单向边(即f=0)的原始网络(Original)具有相对 较好的鲁棒性 *G* 和 *S*, 但随着 *f* 的增加, 网络鲁棒 性的变化不明显.这不同于文献[16]的研究结果, 即边定向方法会降低 ER 网络抵制级联故障的鲁 棒性, 这源自于所采用的不同的负载分配机制.

在图 3 中,固定 f=0.2,可以清楚看到,ER 网络在 HTLDD、LTHDD 和 RDD 策略下具有相似的 鲁棒性,表明不同的边定向策略对 ER 网络抵制 级联故障的鲁棒性影响不大.



Fig.3 For ER networks, comparison of the effects of three link-directed methods on the network robustness with f=0.2

在本级联模型中,对于给定的 α,基于度的边 定向策略能调整初始负载分布.在攻击使得具有 最高负载节点失效之后,它的负载将被全局重新 分配给其他节点,这又可能会导致新的节点故障 和新一轮的全局故障传播.因此,如果故障节点的 负载量较少,它的负载能更容易的被剩余节点吸 收,诱发大规模级联故障的可能性将会降低.从这 方面来说,初始负载的分布在不同边定向方法对 级联故障的影响中起到了主导作用.

使用一个 ER 网络,图 4 显示了三种边定向 方法下网络初始负载 L(0)的分布.可以看到,当 限制比例为 f = 0.2的边为单向边时,对于 HTLDD、LTHDD 和 RDD 策略,具有较高度节点上 的高负载能被转移到那些具有较低度的节点上, 因此高负载节点的负载量能够得到缓解.在这种 情况下,攻击最高负载节点对网络产生的破坏程 度也就降低.因此,边定向方法能够改进 ER 网络 的鲁棒性.此外,由于 ER 网络具有相对同质的度 分布,使得本文基于度的不同边方向确定策略对 网络抵制级联故障的鲁棒性影响不大,且边定向 策略抵制级联故障的鲁棒性对f的变化不敏感.







3 结 论

本文探讨了具有单向边和双向(或无向)边 的随机网络抵制级联故障的鲁棒性.考虑不同的 边方向确定策略,构建了一个随机网络级联模型. 通过分析高负载节点遭受攻击或故障而引发的级 联动力学行为,聚焦于全局负载分配机制下边定 向方法对网络鲁棒性的影响,其中鲁棒性由最大 连通子图相对大小和归一化雪崩规模来量化.在 以前的研究中,边定向方法会降低同质网络,包括 随机网络和小世界网络抵制级联故障的鲁棒性. 但本研究表明,边定向方法能够使得同质的随机 网络更加鲁棒,进一步揭示了必须同时考虑网络 的负载分布和拓扑结构来确定边定向方法的可用 性.此外,不同的边方向确定策略和单向边比例对 随机网络抵制级联故障鲁棒性的影响不大,因此, 很难通过调整边定向策略和增加单向边数量来优 化随机网络抵制级联故障的鲁棒性.在现实中,如 何用低成本设计灵活的保护策略以抵制级联故障 尤为重要.本研究进一步表明了,这个目的可以通 过考虑对少量的关键边限制方向来达到,其中边 的定向和恢复能很容易地通过预先设计好的软件 实现.

参考文献:

- [1] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Attack and error tolerance of complex networks [J]. Nature, 2000, 406 (6794): 378-382.
- [2] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks
 [J].Nature, 2010, 464(7291):1025-1028.
- [3] YANG Y, NISHIKAWA T, MOTTER A E.Small vulnerable sets determine large network cascades in power grids [J]. Science, 2017, 358(6365):3184.
- [4] DEY P, MEHRA R, KAZI F, et al. Impact of topology on the propagation of cascading failure in power grid [J].
 IEEE transactions on smart grid, 2016, 7(4): 1970-1978.
- [5] LHAKSMANA K M, MURAKAMI Y, ISHIDA T. Analysis of large-Scale service network tolerance to cascading failure [J]. IEEE internet of things journal, 2016, 3 (6): 1159-1170.
- $\left[\,6\,\right]$ MOTTER A E,LAI Y C.Cascade-based attacks on com-

plex networks[J].Physical review E,2002,66:65102.

- [7] MIZUTAKA S, YAKUBO K.Robustness of scale-free networks to cascading failures induced by fluctuating loads
 [J].Physical review E,2015,92(1):12814.
- [8] PENG X Z, YAO H, DU J, et al. Invulnerability of scalefree network against critical node failures based on a renewed cascading failure model[J].Physica A,2015,421: 69-77.
- [9] WANG J W, XU B, WU Y D.Ability paradox of cascading model based on betweenness [J]. Scientific reports, 2015, 5:13939.
- [10] CAO X B, HONG C, DU W B, et al. Improving the network robustness against cascading failures by adding links [J]. Chaos solitons & fractals, 2013, 57 (4): 35-40.
- [11] ESLAMI A, HUANG C, ZHANG J S, et al. Cascading failures in load-dependent finite-size random geometric networks[J].IEEE transactions on network science and engineering, 2016, 3(4):183-196.
- [12] ZHANG X J, GU B, GUAN X M, et al. Cascading failure in scale-free networks with tunable clustering[J].International journal of modern physics C, 2016, 27 (8): 56-65.
- [13] CHEN Z, DU W B, CAO X B, et al. Cascading failure of interdependent networks with different coupling preference under targeted attack[J].Chaos soliton & fractals, 2015,80:7-12.
- [14] DI MURO M, BULDYREV S V, STANLEY H E, et al. Cascading failures in interdependent networks with finite functional components [J]. Physical review E, 2016,94:42304.
- [15] ZHAO J C, LI D P, SANHEDRAI H, et al. Spatio-temporal propagation of cascading overload failures in spatially embedded networks [J]. Nature communications, 2016,7:10094.
- [16] JIANG Z Y, MA J F, SHEN Y L, et al. Effects of link-orientation methods on robustness against cascading failures in complex networks[J].Physica A, 2016, 457:1-7.
- [17] DING L, LEUNG C M V, TAN M S.Robustness of complex networks with both unidirectional and bidirectional links against cascading failures [J].Modern physics letters B,2017,31(27):1750252.

(责任编辑:扶文静)