

物流基础设施网络级联失效下的抗毁性分析

黄英艺, 金 淳

(大连理工大学 系统工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 根据节点负载能力制定失效负载的重分配规则, 结合物流基础设施网络结构特征构建网络级联失效模型, 并分别从参数 α 、失效节点类型以及网络结构等角度对网络级联失效抗毁性展开分析. 仿真结果表明: 中转型节点的失效所带来的破坏性较一般类型节点大; 增大 α 值以及增加网络结构的复杂程度均可加强网络的抗毁性.

关键词: 物流基础设施网络; 级联失效; 抗毁性; 突发事件

中图分类号: N945.12

文献标志码: A

Invulnerability analysis of logistics infrastructure network based on cascading failure

HUANG Ying-yi, JIN Chun

(Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China. Correspondent: HUANG Ying-yi, E-mail: huangyingyi31@163.com)

Abstract: A redistribution rule of failed load based on this capacity of nodes is given. And a cascading failure of model is built based on the rule and the structure features of network. Then the invulnerability of network from different perspectives such as parameter α , the types of nodes and the network structure are analyzed and researched. The simulation results show that the failure of relaying nodes will cause more serious damage to the invulnerability of network, and it can enhance the invulnerability of network by increasing the value of parameter α and the network complexity.

Key words: logistics infrastructure network; cascading failure; invulnerability; emergency

0 引 言

复杂网络系统中的微小扰动或故障均可在网络中形成传递效应, 甚至引发整个系统的网络级联失效现象, 造成严重后果. 级联失效是指当网络中的节点因故失效后, 其上负载依据节点间耦合关系向邻接节点进行重新分配, 继而导致新的节点超载失效的连锁反应过程. 例如2003年北美大停电事件和2008年的中国南方冰灾所造成的铁路供电服务中断事件. 可见, 基础服务设施系统的安全有效运行有助于社会经济的稳定发展, 因而针对关键基础设施网络的级联失效抗毁性研究具有重要的意义. 近年来, 针对该方面的研究正逐渐展开^[1-2], 如交通网络上的拥塞^[3]及其控制问题^[4]等.

物流基础设施网络是根据物流系统中各功能要素在参与物流活动过程中所利用到的各种公用设施而抽象出的一种特殊物流网络, 其作为物流运营的基础

支撑, 在突发事件级联失效下的抗毁性对于系统的安全运作具有重要影响. 然而目前针对该问题的相关研究并不多见, 仅有少部分研究分别从物流网络^[5]和供应链网络^[6]角度展开对级联失效问题的研究, 并且物流基础设施网络与这些网络在结构特征上有所不同, 将对级联失效的传播具有一定的影响^[7-8]. 为此, 本文基于物流基础设施网络的特征制定设施节点失效后的负载重分配规则, 建立了相应的级联失效模型, 并通过数值仿真获得了该网络级联失效下的整体抗毁临界值. 通过理论推导验证了该模型的准确性和合理性.

1 物流基础设施网络

物流基础设施网络主要包括节点设施和线路设施两部分. 节点设施主要包括物流园区、物流中心、配送中心、仓库等用于实现包装、装卸、流通加工及信息处理等功能; 而线路设施指用于服务物流作业

收稿日期: 2013-05-14; 修回日期: 2013-07-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71271041); 教育部博士点基金项目(20100041110024).

作者简介: 黄英艺(1982—), 男, 博士生, 从事物流管理及系统优化的研究; 金淳(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理、系统仿真等研究.

活动所需的交通道路、运输管道及通信线路等设施,主要是实现货物运输及信息传递等功能。

在物流基础网络中,以物流中心为代表的一类设施节点在系统中所占有的各类资源较其他节点要多,并且随着系统网络的演化呈现出“富者愈富”的趋势。为便于研究,本文将该类设施节点定义为中转型节点,剩余其他设施节点归结为一般性节点。同时,采用一个有向无权图 $G(V, E, \phi)$ 来表示该网络。假设节点规模为 N , 非空有限节点集合 $V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 表示物流节点集合, $E = \{e_{ij} | i, j = 1, 2, \dots, N\}$ 为边集合, $\phi = \{\psi_{ij} | i, j = 1, 2, \dots, N\}$ 为节点间的方向关系映射集合。另外,根据图 G 建立邻接矩阵 $D_{N \times N} = [d_{ij}]_{N \times N}$ 以量化该物流基础设施网络,其中矩阵 D 中的元素 d_{ij} 表示物流节点间的链接关系(如业务关系等)及其指向。 d_{ij} 具体定义如下:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & v_i \rightarrow v_j; \\ 0, & \text{无链接关系}; \\ -1, & v_i \leftarrow v_j. \end{cases} \quad (1)$$

“ \rightarrow ”为节点间关系指向。

2 级联失效模型构建

级联失效模型构建过程中所要解决的两个关键问题是传播机制以及失效负载重分配规则的制定。

2.1 传播机制

现有研究对于失效负载的分流转移大多依据节点间的链接关系进行^[8-10]。然而实际物流运作中,节点间的链接具有方向性。因此在已有研究的基础上,本文提出一个考虑物流方向的失效传播机制。如图1所示,假设任意物流节点 v_i 的初始负载为 L_i , 负载能力为 C_i 。当 v_i 失效后,其上的负载结合链接方向向关联邻接节点 (v_{b1} 和 v_{b3}) 进行转移。而当邻接节点超过自身负载能力时,即

$$\Delta L_{i \rightarrow j} + L_j(t) > C_j, \quad (2)$$

其中 $\Delta L_{i \rightarrow j}$ 为邻接节点 v_j 所分配得到的失效负载量,则将造成新的失效节点(如 v_{b3}),形成新的失效传播过程。

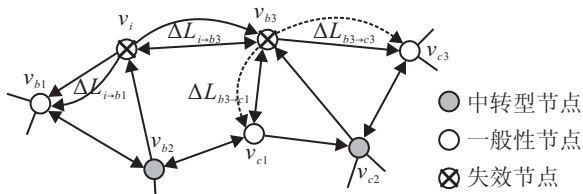


图1 失效负载的重分配传递过程

2.2 重分配规则

在制定失效负载重分配规则之前,首先给出节点初始负载以及负载能力量化方式。由于节点上的负载与其业务关联节点的数量具有一定的线性关系,关联

的邻接节点越多说明节点间的业务往来越频密,则节点的负载越大。假设任意节点 v_i 的初始负载为 L_i , 则节点初始负载的量化表达式为

$$L_i = k_i^\alpha \left(\sum_{v_j \in \Gamma_i} k_j \right)^{1-\alpha}. \quad (3)$$

其中: k_i 为 v_i 的度,即邻接节点数量; Γ_i 为 v_i 的邻接节点集合; α 为负载调节参数,满足 $0 \leq \alpha \leq 1$; $v_i, v_j \in V$ 。正常运作下的节点的实时负载不超过其负载能力。为此,假设任意节点 v_i 的负载能力为 C_i , 其具体计算公式为

$$C_i = \beta L_i. \quad (4)$$

其中 β 为能力调节参数且满足 $\beta \geq 1$ 。 β 越大 C_i 越大,节点抵御失效负载的额外分配冲击的能力也越大。而 C_i 越大,投入建设的总成本也越大。因此,寻求使网络达到预定抗毁能力下的最小成本投入的 β 关键阈值(假设为 β_θ) 便成为本文所构建模型的求解关键之处。

基于上述所定义的节点负载能力,本文提出如下失效负载重分配规则:假设任意节点 v_i 失效,其上负载将依据下式的分配比例 P_j 向邻接节点 v_j 进行分配转移:

$$P_j = \frac{C_j}{\sum_{v_\eta \in \Gamma_i} C_\eta} = \frac{k_j^\alpha \left(\sum_{v_\mu \in \Gamma_j} k_\mu \right)^{1-\alpha}}{\sum_{v_\eta \in \Gamma_i} \left[k_\eta^\alpha \left(\sum_{v_\varphi \in \Gamma_\eta} k_\varphi \right)^{1-\alpha} \right]}, \quad (5)$$

其中 Γ_η 为节点 v_j 的邻接节点集合。

结合式(3)和(5),节点 v_j 将获得的失效负载分配量为

$$\Delta L_{i \rightarrow j} = L_i P_j = k_i^\alpha \left(\sum_{v_j \in \Gamma_i} k_j \right)^{1-\alpha} \frac{k_j^\alpha \left(\sum_{v_\mu \in \Gamma_j} k_\mu \right)^{1-\alpha}}{\sum_{v_\eta \in \Gamma_i} \left[k_\eta^\alpha \left(\sum_{v_\varphi \in \Gamma_\eta} k_\varphi \right)^{1-\alpha} \right]}. \quad (6)$$

2.3 度量指标

采用如下归一化度量指标 CF 对级联失效的破坏影响进行统一度量:

$$CF = \sum_{v_i \in V} CF_i / N(N-1). \quad (7)$$

其中: CF_i 为物流节点 v_i 失效后所导致的其他节点失效的个数,满足 $0 \leq CF \leq N-1$ 。

3 数值仿真及分析

下面根据网络模型生成算法^[11]选取节点规模为 $N = 500$, 平均度 $\langle K \rangle$ 为4的网络模型,分别从 α 参数、节点类型以及网络结构等角度对网络级联失效下的抗毁性展开分析。

3.1 α 对网络抗毁性的影响

首先分析不同 α 值下的网络抗毁性, 具体结果如图2所示. 其中, 横坐标为网络的整体负载承受能力调节控制参数, 纵坐标为度量指标值 CF. 由图2可知, 随着 β 值的增大 CF 值逐渐减小, 即网络的抗毁性逐渐加强. 基于成本因素考虑, 以总成本投入最少的关键阈值 β_θ 作为网络达最佳抗毁性时的临界点. 由图2中的插图可知, 随着 α 值的增大 β_θ 相应地减小. 可见增加 α 值有利于加强网络的抗毁性.

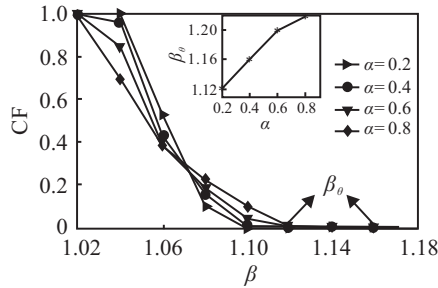


图2 α 对物流基础设施网络抗毁性的影响

3.2 不同类型节点失效对网络抗毁性的影响

以 $p = 0.1$ 的比例选取最大度的节点作为中转型节点, 分别与同等比例下的一般性节点及最小度节点进行比较分析, 仿真结果如图3所示. 由图3可知, 在相同值下, 度越大的节点失效后所获得的 CF 值越大, 说明中转型节点失效下所导致的级联失效对网络的抗毁性影响较其他节点要大.

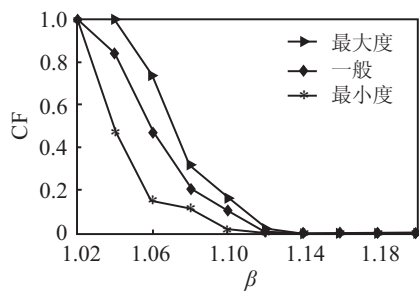
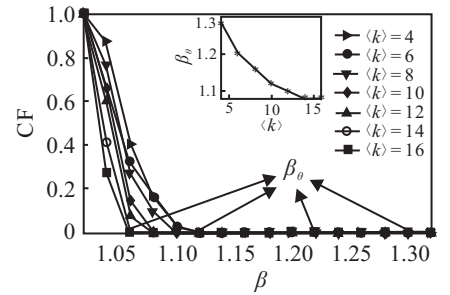


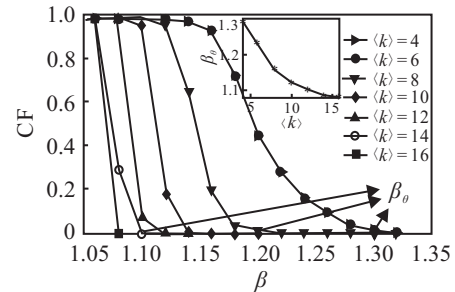
图3 不同类型节点失效对网络抗毁性的影响

3.3 不同网络结构下的抗毁性分析

下面根据 BA 模型算法^[11]和随机网络模型算法^[5]分别选取节点规模为 $N = 500$, 平均度 $\langle K \rangle$ 为 4、6、8、10、12、14、16 的 7 个网络与随机网络进行仿真比较, 分析不同的网络结构对于网络抗毁性的影响, 具体结果如图4所示. 由图4可知, 随着节点平均度 $\langle K \rangle$ 值的增加, 所获得的 β_θ 值逐渐减小. 这说明结构越复杂的物流网络在抵御网络突发级联失效方面的鲁棒性越好, 网络的抗毁性也越强. 另外, 由图4(a)和图4(b)中的插图对比可知, 在相同 β 值即同等的网络整体负载承受能力下, BA 网络结构级联失效的抗毁性较随机网络结构要强.



(a) BA网络结构下的CF值



(b) 随机网络结构下的CF值

图4 不同网络结构下的抗毁性影响

4 抗毁临界值的理论推导

以下根据理论推导求出网络的抗毁临界值以验证该模型的合理性. 首先, 用 $P(k'|k_i)$ 表示网络中度为 k' 和 k_i 节点的相连接的概率, 由概率知识可知, 任意节点 v_i 的邻接节点度之和满足下式:

$$\sum_{v_j \in \Gamma_i} k_j = \sum_{k'=k_{\min}}^{k_{\max}} k_i P(k'|k_i) k', \quad (8)$$

其中 k_{\min} 和 k_{\max} 分别为最小度和最大度.

结合归一化条件^[11]和平衡条件^[12], 化简可得

$$\begin{cases} P(k') \sum_k k P(k) = k' P(k') \sum_k P(k), \\ k P(k) \sum_{k'} P(k') = P(k) \sum_{k'} k' P(k'), \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P(k') \langle k \rangle = k' P(k'), \\ k P(k) = P(k) \langle k' \rangle. \end{cases} \quad (9)$$

由于在复杂网络中 $\langle k \rangle \equiv \langle k' \rangle$, $P(k'|k) \cong P(k')$, 由式(9)可得

$$P(k'|k) = k' P(k') / \langle k \rangle. \quad (10)$$

结合式(2)~(4)以及(6), 经化简可得

$$1 + \frac{k_i^\alpha \left(\sum_{v_j \in \Gamma_i} k_j \right)^{1-\alpha}}{\sum_{v_\eta \in \Gamma_i} \left[k_\eta^\alpha \left(\sum_{v_\varphi \in \Gamma_\eta} k_\varphi \right)^{1-\alpha} \right]} < \beta. \quad (11)$$

结合式(8)和(10), 推导求得

$$\sum_{v_j \in \Gamma_i} k_j^\alpha = k_i \sum_{k'=k_{\min}}^{k_{\max}} \frac{k' P(k') k'^\alpha}{\langle k \rangle} = \frac{k_i \langle k^{1+\alpha} \rangle}{\langle k \rangle}. \quad (12)$$

因此根据式(12), (11)可化简为

$$1 + \frac{k_i^\alpha \left(\sum_{v_j \in \Gamma_i} k_j \right)^{1-\alpha}}{\sum_{v_\eta \in \Gamma_i} \left[k_\eta^\alpha \left(\sum_{v_\varphi \in \Gamma_\eta} k_\varphi \right)^{1-\alpha} \right]} = 1 + \frac{\langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle} < \beta. \quad (13)$$

于是可求得网络整体抗毁阈值为

$$\beta_\theta = 1 + \langle k \rangle / \langle k^2 \rangle. \quad (14)$$

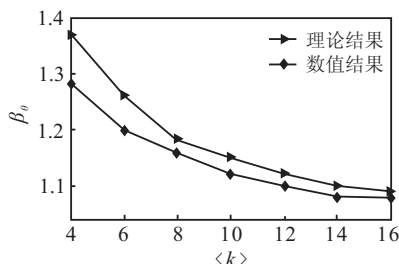
由于节点的度分布近似满足^[12] $P(k) = 2m^2 k^{-3}$, 其中 $m = k_{\min}$, 由式(14)可推导出

$$\int_{k_{\min}}^{\infty} P(k) dk = \int_{k_{\min}}^{\infty} 2m^2 k^{-3} dk = m^2 k_{\max}^{-2} = \frac{1}{N}, \quad (15)$$

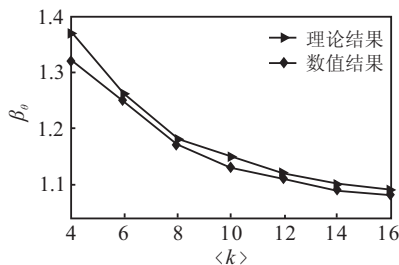
于是得到 $k_{\max} = \sqrt{N} k_{\min}$. 结合式(14)并化简得到

$$\beta_\theta = 1 + \frac{2m}{k_{\min}^2 \ln N} = 1 + \frac{2k_{\min}}{k_{\min}^2 \ln N} = 1 + \frac{2}{k_{\min} \ln N} = 1 + \frac{4}{\langle k \rangle \ln N}. \quad (16)$$

可见, 随着分母 $\langle k \rangle$ 值的增大, β_θ 逐渐减少. 此外, 结合式(16), 将理论解析推导结果与数值模拟仿真所得结果进行比较, 如图5所示. 可以发现二者结果的整体趋势较为一致, 且随着网络节点规模的增加, 二者之间误差越来越小. 这从理论解析推导角度很好地验证了本文所构建模型的准确性与合理性.



(a) BP网络结构



(b) 随机网络结构

图5 理论结果与数值结果对比

5 结论

基于物流基础设施网络结构特征构建级联失效模型, 分别从参数 α 等3方面对网络抗毁性的影响展开分析研究, 并从理论上推导验证了模型的准确性及合理性. 研究发现, 增大 α 、 β 值和 $\langle K \rangle$ 值, 网络抗毁临界值 β_θ 越小, 即加强节点间关联程度、负载能力以及增加网络的结构复杂程度均有助于增强网络的抗毁性. 相信本文的研究可为物流基础设施设计规划及应

急管理方面的预防、控制等方面提供帮助.

参考文献(References)

- [1] Oliver H, Michael S, Marchiori K. Scale-free networks: The impact of fat tailed degree distribution on diffusion and communication processes[J]. *Wirtschaftsinformatik*, 2006, 48(4): 267-275.
- [2] Mishkovski I, Biey M, Kocarev L. Vulnerability of complex networks[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, 16(1): 34-349.
- [3] Zheng J F, Gao Z Y, Zhao X M. Modeling cascading failures in congested complex networks[J]. *Physica A*, 2007, 385(2): 700-706.
- [4] Yang R, Wang W X, Lai Y C. Optimal weighting scheme for suppressing cascades and traffic congestion in complex networks[J]. *Physical Review E*, 2009, 79(2): 026112(1)-026112(6).
- [5] 李勇, 吴俊, 谭跃进. 容量均匀分布的物流保障网络级联失效抗毁性[J]. *系统工程学报*, 2010, 25(6): 853-860. (Li Y, Wu J, Tan Y J. Invulnerability study for cascading failure of the logistics support networks of capacity evenly distributed[J]. *J of Systems Engineering*, 2010, 25(6): 853-860.)
- [6] 闫妍, 刘晓, 庄新田. 基于复杂网络理论的供应链级联失效检测方法[J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44(3): 322-325. (Yan Y, Liu X, Zhuang X T. Cascading failure model and method of supply chain based on complex network[J]. *J of Shanghai Jiaotong University*, 2010, 44(3): 322-325.)
- [7] Christian K, Dirk H, Geoffrey B W. Scaling laws in urban supply networks[J]. *Physica A*, 2006, 363(1): 89-95.
- [8] Wang J, Liu Y H, Jiao Y, et al. Cascading dynamics in congested complex networks[J]. *European Physical J, Part B*, 2009, 67(1): 95-100.
- [9] Solé R V, Casals M R, Murtra B C, et al. Robustness of the European power grids under intentional attack[J]. *Physical Review E*, 2008, 77(2): 026102(1)-026102(7).
- [10] Wang J W, Rong L L. Robustness of the western United States power grid under edge attack strategies due to cascading failures[J]. *Safety Science*, 2011, 49(6): 807-812.
- [11] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [12] Boguna M, Pastor-Satorras R, Vespignani A. Absence of epidemic threshold in scale-free networks with degree correlations[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(2): 028701(1)-028701(4).

(责任编辑: 李君玲)