

考虑级联失效的复杂负载网络节点重要度评估

吴俊, 谭跃进, 邓宏钟, 迟妍

(国防科技大学 信息系统与管理学院管理系, 湖南 长沙 410073)

E-mail: wujunpla@163.com

摘要: 首先提出了一个基于负载重分配的复杂负载网络级联失效模型, 与现有模型的区别在于: (1) 针对每个节点定义了一个“过载函数”; (2) 用节点权值演化代替网络拓扑结构的演化. 在级联失效模型基础上, 提出了考虑级联失效的复杂负载网络节点重要度评估方法, 给出了节点重要度的新定义. 该方法有助于发现网络中一些潜在的“关键节点”. 最后的实验分析验证了该方法的有效性和可行性.

关键词: 级联失效; 节点重要度; 抗毁性; 负载; 复杂网络

中图分类号: TP 302 N 945 1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1220(2007) 04-0627-04

Evaluating Node Importance Considering Cascading Failure in Complex Load-networks

WU Jun, TAN Yue jin, DENG Hong zhong, CHI Yan

(Department of Management, School of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper presented a model with “overload function” for cascading failure. The main differences with respect to previous models are as follows: (1) “overload function” is defined for each node, according to the value of “overload function”, one node has three states: success, overload, failure. After the load decreases, an overloaded node can be success again. (2) The evolution of topology is replaced by the evolution of value of “overload function” during the process of cascading failure. It is needless to delete the failure nodes and its edges, the load will avoid the failure nodes automatically and the decrease of network performance will be reflected by network efficiency. An evaluation method of node importance considering cascading failure is proposed, and its algorithm is presented. A new definition of node importance is proposed. The most important node is the one whose failure results in the largest decrease of networks efficiency at the end of cascading. The evaluation method can help us to find some potential critical nodes which are sensitive to the efficiency of networks but not so important intuitively. Final example verifies its efficiency and feasibility.

Key words: cascade failure; node importance; invulnerability; load; complex networks

1 引言

随着复杂网络的小世界效应及无标度性的发现, 复杂网络研究逐渐成为多个学科共同关注的前沿热点^[1]. 作为复杂网络的一个重要研究方向, 复杂网络的容错抗毁性也越来越受到关注. 研究表明不同拓扑结构的网络对不同打击具有不同的抗毁性, 在随机打击下无标度网络比随机网络具有更强的容错性, 但在选择性打击下, 无标度网络却又显得异常脆弱, 5%的关键节点被攻击, 网络就基本瘫痪^[2]. 所谓选择性打击就是先攻击网络中重要的“关键节点”, 那么通过节点重要度评估找出那些重要的“关键节点”将是一项非常有意义的工作. 一方面可以通过重点保护这些“关键节点”来提高整个网络的可靠性, 另外一方面也可以攻击这些“薄弱环节”达到摧毁整个网络的目的, 比如阻截病毒的传播.

相比于网络中边的重要度评估^[3,4], 网络中节点的重要度评估并未受到太多关注, 现有的评估方法很有限. 文献[2]把节点的连接度作为节点重要度的衡量标准, 即认为与节点相连的边越多则该节点越重要. 文献[5]基于源点到汇点最短路径来评价节点重要度, 定义最重要的节点为去掉该节点使源点到汇点最短路径距离增加最大. 文献[6]提出了一种基于生成树数目的节点删除法, 定义最重要的节点为去掉该节点使生成树数目最小. 文献[7]提出了一种节点收缩方法, 定义最重要的节点为收缩该节点后使得网络凝聚度最大.

这些节点重要度评估方法几乎都假设节点失效是相互独立的, 并且都是静态评估, 没有考虑网络上的负载. 实际上大多数网络上是有负载的, 这些负载可以是物质、信息或能量, 可以是具体的, 也可以是抽象的. 网络上的负载是动态变化的, 特别是当网络结构发生改变, 如节点的加入、移除, 网络上

收稿日期: 2006-02-15 收修改稿日期: 2006-03-28 基金项目: 国家自然科学基金项目(70501033)资助. 作者简介: 吴俊, 男, 1980年生, 博士研究生, 主要研究方向为复杂系统理论、复杂网络抗毁性; 谭跃进, 男, 1958年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为系统优化与系统集成、复杂系统理论; 邓宏钟, 男, 1974年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为分布式人工智能、多智能体仿真; 迟妍, 女, 1975年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为军事复杂适应系统理论.

的负载将重新分配.一般来说,网络中节点承受负载的能力是有限的,即节点的负载容量是有限的.有限的负载容量和负载的重新分配使得负载网络的抗毁性问题变得更加复杂:一个节点的失效导致网络负载的重分配,负载的重分配使得某些节点上的负载超过其负载容量而失效,这些节点的失效又可能导致其他节点的“级联失效(cascading failure)”^[9].如果我们开始移除的是一个重要的“关键节点”,它的移除可能触发整个网络的崩溃,我们称之为“级联崩溃(cascading break-down)”^[9].现实世界中,很多网络安全性问题可以归结为这类考虑“级联失效”的网络抗毁性问题,一个比较典型的例子就是2003年8月北美电力网崩溃事故.北美电力网是一个由美、加两国多家能源运营商经营的以大型发电厂为“关键节点”,以主干电力网相互连接起来的高度集群电网.由于他们使用的是同步交流电网,只要一家电厂出事,频率异动就会瞬间波及全网,导致“级联崩溃”.同样的问题也存在于因特网^[10]、通信网^[11]、交通物流网以及其它社会经济系统网络中^[12].所以,在考虑“级联失效”条件下进行节点重要度评估有着重要的现实意义.它将有助我们发现一些潜在的“关键”节点,从而更好地保障网络安全.

本文首先提出了一个带有过载函数的级联失效模型,在此基础上提出了考虑级联失效的复杂负载网络节点重要度评估方法并给出了其算法步骤,最后通过实验分析验证了该方法的有效性.

2 复杂负载网络级联失效模型

复杂网络可以用图 $G=(V,E)$ 来表示.假设 G 是一个无向的连通图,有 n 个节点, m 条边,其中 $V=\{v_1,v_2,v_3,\cdots,v_n\}$ 代表节点集合, $E=\{e_1,e_2,e_3,\cdots,e_m\}\subseteq V\times V$ 代表边的集合.

2.1 负载的分布

网络上的负载分布是由多个因素决定的,其中网络拓扑结构是主要因素之一.为了与实际的“物理负载”相区别,我们把完全由拓扑结构决定的负载称之为“结构负载”.在本文中,我们把节点的结构负载定义为该节点的介数(Betweenness)^[13].在难以确定网络上实际物理负载的情况下,用这种无量纲的“结构负载”来研究复杂网络的抗毁性及节点重要度评估是合理有效的.介数作为节点的中心性测度最初是在社会学研究中提出的,本文采用最简单也是最常用的最短路介数(shortest path betweenness),即认为经过节点的最短路径越多该节点上的负载越高:

$$L_k=C_B(k)=\frac{\sum_{w\neq w'\in V}\frac{\alpha_{ww'}(k)}{n\cdot(n-1)}}{n\cdot(n-1)}\quad (1)$$

其中 $\alpha_{ww'}$ 表示 w 与 w' 之间所有最短路径数目, $\alpha_{ww'}(k)$ 表示 w 与 w' 之间经过节点 k 的最短路径数目.为避免节点上负载为零,式(1)中允许 w,w' 为 k .实际上,

$$\sum_{w\neq w'\in V}\frac{\alpha_{ww'}(k)}{\alpha_{ww'}}=\sum_{w=k\neq w'}\frac{\alpha_{kw'}}{\alpha_{kw'}}+\sum_{w\neq k=w'}\frac{\alpha_{ww'}}{\alpha_{ww'}}+\sum_{w\neq k\neq w'}\frac{\alpha_{ww'}(k)}{\alpha_{ww'}}$$
$$\frac{\alpha_{ww'}(k)}{\alpha_{ww'}}=\sum_{w\neq k\neq w'}\frac{\alpha_{ww'}(k)}{\alpha_{ww'}}+2(n-1)\quad (2)$$

所以 $2/n\leq L_k\leq 1$ 在星型网络中,所有节点对之间的最短路径都必须通过中心节点,故中心节点的负载为最大值1

2.2 负载的重新分配

在以往的级联失效模型中,节点通常只有两种状态,即“正常”和“失效”,而且当节点上的负载超过其容量而处于“失效”状态后,节点立即从网络中删除.实际上,网络中的节点很多时候都处于“正常”和“失效”之间的“中间状态”,例如交通网络中,真正“堵死”的情况并不多,只是在某个时间段、某些路段车流速度变慢而以,而且当节点上的负载减少后,该节点还能恢复到正常状态,所以将其从网络中删除是不合适的.

针对上述问题,我们给网络中的每个节点定义一个“过载函数” F_k ,相当于给每个节点赋一个动态的权值,该权值表示负载通过该节点的“困难程度”,定义边的权为它所连接节点权值之和.我们将 F_k 定义为节点上负载 L_k 的单调非减函数,这样节点上的负载 L_k 与其过载函数值 F_k 在负载重新分配过程中是相互制约的:当节点的过载函数值改变后,网络上的负载将重新分配,负载的重分配将改变节点的过载函数值.

根据实际情况,“过载函数”可以有多种形式.下面我们给出一个迭代形式的“过载函数”表达式:

$$F_k(t)=\begin{cases} 1 & L_k(t)\leq L_k(0) \\ 1+\frac{L_k(t-1)-L_k(0)}{C_k-L_k(0)}(n-1) & L_k(0)<L_k(t)<C_k \\ n & L_k(t)\geq C_k \end{cases}\quad (3)$$

其中 L_k 为初始负载, C_k 为负载容量.(3)式中中等号右边的三种情况分别对应节点的三种状态:正常状态、过载状态、失效状态.我们假设当节点处于失效状态后其状态不再变化,即若 $F_k(t)=n$,则令 $F_k(t)=n,t\geq t'$.三种状态之间的转换见图1.

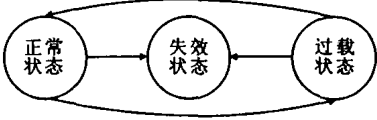


图1 节点三种状态之间的转换
Fig. 1 Three states of nodes

网络中节点的负载容量是受成本约束的,确定这些节点的负载容量时都是“按需定容”,所以一般认为节点的负载容量与其初始负载 $L_k(0)$ 成正比^[9],即

$$C_k=L_k(0)\cdot(1+\alpha)\quad (4)$$

其中 α 为“容限系数”,可根据网络的实际情况给出.

2.3 级联失效过程

在以往的级联失效模型中,“初始攻击(initial damage)”都被处理为删除一个或多个节点,在本文中我们只需将要攻击节点的“过载函数”值变为 n ,不需要作节点及其边的删除操作.本文定义级联失效过程的结束标志为:不再有新的节点转为“失效状态”.由于节点失效后不能转为正常和过载状态,所以级联失效过程至多经过 $n-1$ 步迭代就会停止.

在本文中,我们用级联失效后网络的平均加权效率^[14]度

量级联失效的后果,即

$$E=\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i\neq j\in V}\frac{1}{d_{ij}}\tag{5}$$

其中 d_{ij} 为节点 v_i 与 v_j 之间的加权最短距离,这样不仅反映了“初始攻击”引起级联失效的节点数目,还反映了失效节点在网络中的位置.

在本文中,即使节点失效也不从网络中删除,网络拓扑结构在级联失效过程中始终保持不变.由于通过失效节点的“代价”太大($F_k=n$),原先经过它的最短路径将自动避开它(相当于该节点已被删除).如果节点失效后仍有负载经过它(该节点是其它节点之间连通的“必经之地”),此时由于该节点过载函数值很高,该节点失效导致的网络性能下降会通过网络平均加权效率明显反映出来.这种用节点权值演化代替拓扑结构演化的方法使得级联失效模型操作更为简单.

3 考虑级联失效的复杂负载网络节点重要度评估方法

在考虑级联失效的情况下,假设一个节点失效,即令该节点“过载函数”值为 n ,如果该节点是一个重要的“关键节点”,该节点的失效会触发网络的级联失效,从而导致网络性能下降,即平均加权效率变小.所以可以认为,级联失效后网络的平均加权效率越小,该节点越重要.

定义1. 在网络 $G=(V,E)$ 中,令 v_k 失效,即令 $F_k=n$,则称 $I_k=1-E_k/E_0$ 为节点 v_k 的重要度,其中 $v_k\in V,E_0$ 为网络的初始平均加权效率, E_k 为节点 v_k 失效触发的级联失效过程结束后网络的平均加权效率.

显然 $0<I_k<1$
下面给出评估所有节点重要度的算法步骤.

输入: G,α
输出: I
1 计算所有节点初始负载 $L_k(0)$,负载容量 C_k ;
/* 采用 Brandes 算法^[13]计算介数,时间复杂性为 $O(nm+n^3\log n)$ */
2 按照式(5)计算初始平均加权效率 E_0 ;
3 for $k=1$ to n /* 主循环,评估所有节点的重要度 */
 for $i=1$ to n do $F_i(0)=1$ /* 初始化过载函数值 */
 $F_k(1)=n$; /* 令节点 v_k 失效 */
 $t=1$;
 while (有新节点转为失效状态)
 计算 t 时刻所有节点负载 $L_k(t)$;
 $t=t+1$;
 for $i=1$ to n
 if ($F_i(t-1)=n$) then $F_i(t)=n$;
 /* 节点处于失效状态后,其过载函数值不再变化 */
 else 按照式(3)计算 $F_i(t)$;
 }
 按照式(5)计算平均加权效率 E_k ;
 按照定义3.1计算 I_k ;
}

4 实验分析

如图2所示,某负载网络有25个节点,39条边,图中节点的大小与其初始负载成正比.取 $\alpha=0.3$ 按照第三节中的算

法步骤对每个节点进行重要度评估并排序.作为比较,在不

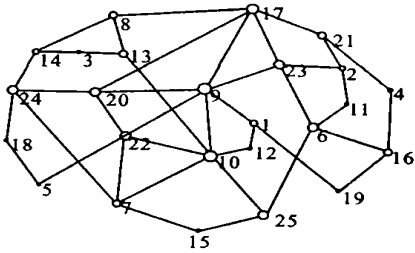


图2 某网络拓扑结构图
Fig. 2 Illustration of a network ($n=25,m=39$ edges)
表1 节点重要度评估结果

Table 1 Results of evaluation of node importance					
节点	本文方法			节点收缩方法	
	级联失效过程	重要度	排序	重要度	排序
1	1→16→2,5,7,8,9,14,15,17,21,22→3,6,10,12,13,23,25→20→24	0.9573	7	0.1761	16
2	无	0.5236	16	0.1720	17
3	无	0.2580	24	0.1190	24
4	无	0.4705	18	0.1345	18
5	无	0.4362	20	0.1216	23
6	6→2→3,7,14,15,16,18,24,25→1,5,9,17,20,22→8→13,23→4,10,12,19,21	0.9596	2	0.2603	6
7	无	0.6984	12	0.2304	9
8	无	0.6148	15	0.1829	14
9	9→10,12→2,5,8,14,15,18,21→3,4,6,13,16,19,20,24→7,22	0.9504	10	0.2974	2
10	10→1,9→2,4,5,8,11,16,17,20,21→6,7,14,15,18,23,24,25→3,13	0.9573	7	0.3219	1
11	无	0.1938	25	0.1151	25
12	无	0.3757	21	0.1229	21
13	13→14→5,6,10,16,18,22,23,25→1,2,4,7,8,9,11,15,17,20,21,24→3,12	0.9593	3	0.2447	8
14	无	0.5161	17	0.1788	15
15	无	0.3140	22	0.1293	20
16	无	0.6683	13	0.1951	13
17	17→2,23→1,7,12,14,15,18,19,20,24→3,5,6,10,11,13,16,22,25→4,8,21→9	0.9600	1	0.2703	5
18	无	0.2587	23	0.1216	22
19	无	0.4609	19	0.1319	19
20	无	0.6384	14	0.2033	12
21	21→16→7,8,10,12,14,17,18,19,20,24→3,5,6,9,13,22,23→2,11,15	0.9570	9	0.2046	10
22	22→18,24→2,3,9,13,23→4,6,8,10,12,16,17,20,21,25→1,7,15,19	0.9584	6	0.2964	3
23	23→21→1,3,5,7,9,14,16,18,19,22,24→6,8,10,11,12,13,17,20,25	0.9588	4	0.2732	4
24	24→5→2,4,6,7,11,15,16,19,21,25→3,9,10,13,22,23→1,8,14,17→20	0.9585	5	0.2475	7
25	无	0.7806	11	0.2033	11

考虑级联失效的条件下,对每个节点用文献[7]中的节点收缩方法进行重要度评估并排序.评估结果如表1所示.

由表1可以看出,考虑级联失效对复杂网络节点重要度评估的结果有显著影响.在不考虑级联失效条件下,节点10、9、22、23、17是重要的“关键节点”,节点1、6、13的重要度并不突出,但在考虑级联失效条件下,由于节点1、6、13失效触发其它节点的级联失效,使得整个网络的性能大幅下降,从而这些节点重要度大幅提高.特别是节点1,我们从图2可以看出该节点连接度和初始负载均很低,但节点1失效后,首先导致节点16超过负载容量失效,接着导致其它节点的级联失效.级联失效过程结束后网络的平均加权效率从初始的0.4393下降到0.0187.这意味着节点1是一个“潜在的关键节点”.

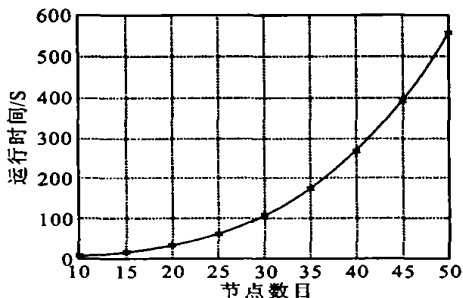


图3 不同节点数目网络中的运行时间

Fig. 3 Runtime of evaluation for different size of networks

在Pentium 4 2.4 GHz 微机上运行Matlab程序对不同节点数目的网络进行重要度评估,运行时间如图3.从图3可以看出,虽然考虑级联失效不可避免的会增加运行时间,但运行时间仍然是可接受的.如果令 α 足够大,网络中任何节点的失效都不会触发级联失效,此时节点重要度评估结果将与不考虑级联失效条件下的评估结果一致.所以本文评估方法与不考虑级联失效的评估方法是相容的,并不矛盾.

5 结束语

复杂负载网络中的级联失效现象是不容忽视的,其本质是一种相关失效,而网络安全中的相关失效行为一直是一个非常棘手的问题.这源于我们对网络中相关失效机理知之甚少,特别是定量分析方法非常缺乏.在考虑级联失效条件下对节点重要度进行评估能让我们发现一些被忽视的关键节点,这对我们深入研究复杂网络可靠性、抗毁性有着重大意义.

本文首先提出了一个复杂负载网络级联失效模型.该模型与其他模型的不同之处在于:

(1) 针对每个节点定义了一个“过载函数”,根据过载函数值,每个节点具有“正常”、“过载”、“失效”三种状态,当节点上的负载减少后,处于过载状态的节点还可以恢复到正常状态,这样更符合实际.

(2) 用节点权值演化代替拓扑结构演化,节点失效不需要作节点及边的删除操作,只需将其过载函数值变为 n ,最短路径将会自动避免经过它,节点失效导致的网络性能下降会

通过网络平均加权效率反映出来,从而使得模型操作更为简单.

在这个模型基础上,提出了考虑级联失效的复杂负载网络节点重要度评估方法及其算法步骤,认为节点失效触发的级联失效过程结束后网络的平均加权效率越低,则该节点越重要.最后的实例分析表明考虑级联失效对复杂网络节点重要度的评估结果有重要影响,它能让我们发现一些“潜在的关键节点”.

References:

- [1] Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Rev. Mod. Phys., 2002, 74(1): 47-51.
- [2] Albert R, Jeong H, Barabási A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406: 679-682.
- [3] Ball M O, Golden B L, Vohra R V. Finding the most vital arcs in a network[J]. Oper. Res. Letters, 1989, 8(3): 73-76.
- [4] Malik K, Mittal A K, Gupta S K. The k most vital arcs in the shortest path problem[J]. Oper. Res. Letters, 1989, 8(4): 223-227.
- [5] Corley H W, Sha D Y. Most vital links and nodes in weighted networks[J]. Oper. Res. Letters, 1982, 1: 157-160.
- [6] Chen Yong, Hu Aiqun, Hu Jun, et al. A method for finding the most vital node in communication networks[J]. High Technology Letters, 2004, 14(1): 21-24.
- [7] Wu Jun, Tan Yuejin. Finding the most vital node by node contraction in communication networks[C]. In: Proceeding of IEEE ICCAS 2005 Hong Kong, 2005, 1283-1286.
- [8] Motter A E, Lai Y C. Cascade based attacks on complex networks[J]. Phys. Rev. E, 2002, 66(8): 65-102.
- [9] Zhao L, Kwangho P, Lai Y C. Attack vulnerability of scale free networks due to cascading breakdown[J]. Phys. Rev. E, 2004, 70(3): 35-101.
- [10] Pastor Satorras R, Vazquez A, Vespignani A. Dynamical and correlation properties of the internet[J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 87(25): 258-701.
- [11] Guimera R, Arenas A, Diaz Guileria A, et al. Dynamical properties of model communication networks[J]. Phys. Rev. E, 2002, 66(3): 26-704.
- [12] Watts D J. A simple model of global cascades on random networks[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 2002, 99(9): 5766-5771.
- [13] Freeman L C. A set of measures of centrality based upon betweenness[J]. Sociometry, 1977, 40(1): 35-41.
- [14] Crucitti P, Latora V, Marchiori M. Model for cascading failures in complex networks[J]. Phys. Rev. E, 2004, 69(4): 45-104.
- [15] Brandes U. A faster algorithm for betweenness centrality[J]. Journal of Mathematical Sociology, 2001, 25(3): 163-177.

附中文参考文献:

- [6] 陈勇,胡爱群,胡骏,等.通信网中重要节点的确定方法[J].高技术通讯, 2004, 14(1): 21-24.