文章编号:1002-0640(2010)03-0009-05

不同流量的复杂保障网络抗毁性仿真分析*

李 勇,邓宏钟,吴 俊,吕 欣,刘 斌,谭跃进
(国防科技大学信息系统与管理学院,长沙 410073)

摘 要:通过引入流量强度指数和流量分布指数,建立了不同网络流量下的复杂保障网络级联失效抗毁性模型。基于该模型比较分析了无标度网络、随机网络和复杂保障网络在不同流量强度和流量分布下对单个节点的随机失效和故意攻击的抗毁性。结果表明:复杂保障网络的抗毁性随着流量强度的增加急剧下降。此外,流量分布对复杂保障网络的抗毁性也有显著影响。

关键词:保障网络,级联失效,抗毁性,流量强度
中图分类号:TP393.08 文献标识码:A

Invulnerability Simulation Analysis of Complex Logistics Networks with Different Flows

LI Yong, DENG Hong-zhong, WU Jun, Lü Xin, LIU Bin, TAN Yue-jin
(*School of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*)

Abstract: A simulation model based on cascading failure for the invulnerability of complex logistics networks with different flows is proposed. In this model, the intensity and distribution of network traffic is controlled by an α-index and a β-index, respectively. The variety of invulnerability is simulated under random failures and intentional attacks on different networks. Result shows that the invulnerability performance declines rapidly when the network traffic is increased. Furthermore, the distribution of network traffic also has a strong impact on the invulnerability performance.

Key words: logistics networks, cascading failure, invulnerability, network traffic

引 言

现代战争中,军事后勤保障已经成为决定战争胜负的重要因素。当前的保障网络系统是以各种不同属性的仓库、转运中心、存储中心和交通枢纽为节点,以各种交通线路为边,以各种补给、保障物资为负载,所构成的一个节点数目庞大,连接方式多样的复杂网络,这种网络称之为复杂保障网络,也是敌方攻击的主要目标之一。因此,采用复杂网络理论来研究其抗毁性有非常重要的理论和现实意义。

复杂网络抗毁性研究主要包括网络拓扑结构静态抗毁性研究和基于负载的复杂网络抗毁性研究。早期的复杂网络抗毁性研究[1,2]主要关注静态的抗毁性,不考虑节点(边)失效的动态关联,即总是假设一个节点(边)的失效不会导致其他节点(边)的失效。这方面研究最重要的成果就是无标度网络的双重性:面对随机性的损伤,无标度网络比随机网络有着更好的抗毁性,但面对选择性型打击,无标度网络却显得异常脆弱[1],在这种假设下,少数几个节点的失效不会导致整个网络的崩溃,然而事实并非如此,实际上大多数网络上是有负载的[3],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,网络上的负载将重新分配,一般来说,网络中节点的容量是有限的,有限的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,负载的重分配可能使得某些节点上的负

收稿日期:2008-04-15 修回日期:2009-03-11
* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(70501032,70771111)
作者简介:李 勇(1979-),男,湖南长沙人,博士研究生,主要研究方向:复杂网络抗毁性。

载超过其容量而失效，这些节点的失效又可能导致其他节点的“级联失效(cascading failure)”，如果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，称之为“级联崩溃(cascading breakdown)”。这种现象[4-6]比故意攻击网络的后果更严重[1]。级联失效的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。复杂网络上的级联失效研究近年来得到了很大关注。2002年，Watts给出了一个级联失效过程的简单模型[5]，它能转换到一类渗流模型之上，从而可以利用与针对简单顶点删除过程而言类似的生成函数方法来解决。Moreno等人提出一种研究BA无标度网络中的相继故障模型，发现节点容量阈值分布较均匀的网络对故障更有承受能力[6]。Motter研究发现非同质拓扑结构中级联失效对选择性打击的敏感性[3]，并在2004年研究了级联失效的防御和控制[7]，Dobson等研究了电力网中的级联失效问题[8-10]，汪小帆研究了耦合映象格子中的级联失效[11]。2006年，Schafer等提出了一种增加网络级联失效抗毁性的设计方法[12]，该方法通过负载和权重的转换使得网络负载分布更均匀，并通过减少网络总负载提高网络抗毁性。2007年，WANG Bing等提出了一种低代价下的高抗毁性模型[13]。

已有的基于级联失效抗毁性模型[3,12]大多假设所有节点对之间发送的流量相同，都为一个单位，很少考虑网络中节点之间流量的差异性。实际的网络中(例如通信网路，交通网络等)，不同的时刻(例如流量高峰期和非高峰期)网络的流量强度不同，在同一时刻，不同的节点对之间(例如交通网络中的商业区之间的节点对和郊区间的节点对)发送的流量也不相同。针对复杂保障网络流量的特点，本文通过引入流量强度指数和流量分布指数等建立了不同流量下的复杂保障网络级联失效抗毁性模型，分析了复杂保障网络在不同流量强度和不同流量分布下的抗毁性。

1 复杂保障网络构成

1.1 网络节点

在复杂保障网络中，尽管基地、兵站、综合仓库、弹药库、修理所、医院等保障实体在功能上有所不同，有的实体在功能上还相互包含，但是，它们有一个共同的特点就是发出或接收资源，并且，在某段时间内，各保障实体在地域上具有相对固定的关系。我们把所有的保障实体、路口以及被保障实体抽象为节点。路口包括：火车站、汽车站、中转站以及公路路口等。抽象后的网络节点可以分为两类：连通节点、仓库节点。连通节点，是指该节点毁伤以后，连接到该节点的路径即在该位置失效，如果该节点连接到保障仓库，则所有资源在该节点恢复连通之前将不能通过该节点运出；如果连接到该节点的边上有向该节点运送的物资，则这些物资原路返回，到前一节点重新路由或者等待。例如交通要道上的立交桥，一旦被炸毁，则所有连接到该桥梁的道路不能够再运输资源，如果有一保障仓库只能通过一条道路连接到该桥梁，而与其他道路没有连接，则该资源将被封闭在库所内，直到桥梁修复方可进行运输，如果有其他正常的交通路口节点与之连接，从该交通路口节点到损坏的立交桥节点之间的物资源路返回；仓库节点又可分为源仓库节点和汇仓库节点，源仓库节点是指保障实体仓库，为发送物资仓库；汇仓库节点是指被保障实体仓库，为接收物资仓库。有些仓库既是源仓库节点又是汇仓库节点，因为它们可以作为上一级保障系统中的被保障实体，又可以作为下一级保障系统中的保障实体。

1.2 网络的边、负载量和容量

各节点之间相互连接依靠的是传输线路，如：公路、铁路、水路、航线、管线。这些传输线路就是网络的边，与节点一起构成复杂保障网络。负载量是指在某一时刻，网络上的节点或者边上运载物资的量，分别称为节点负载量和边负载量。容量是网络中节点和边可承受的最大的负载量。

1.3 网络结构

复杂保障网络主要由民用交通网络(铁路网、公路网和水路网等)和不同级别的保障实体构成，复杂保障网络的拓扑特性依赖交通网络的拓扑特性，已有的研究中[13]已经发现公路网和铁路网的节点度分布服从衰减指数分布，本文以某团的保障网络

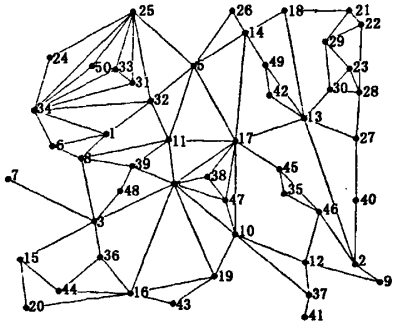


图1 某团保障网络拓扑图

(图1)为研究对象,节点表示交通枢纽和保障实体,边表示高速公路、国道、省级公路和县级公路,边和节点的位置和地图近似,但不完全重合,边长也不代表道路实际长度。

2 基于级联失效的复杂保障网络抗毁性模型

复杂网络抗毁性研究中,用图 $G=(V,E)$ 来表示网络。假设 G 是一个无向的加权连通图,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 流量强度与流量分布

本模型中,定义网络流量强度为某一时刻进入网络的流量总和,即在某一时刻所有节点对之间发送流量的总和。定义网络流量分布为网络中所有节点对之间发送流量的空间分布。

网络流矩阵为

$$U=\begin{bmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1k} & \cdots & f_{1n} \\ \vdots & & & & \\ f_{j1} & \cdots & f_{jk} & \cdots & f_{jn} \\ \vdots & & & & \\ f_{n1} & \cdots & f_{nk} & \cdots & f_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

f_{jk} 为运载函数,表示节点 v_j 发送给节点 v_k 的流量。流量强度 $NF=\sum f_{jk}$,表示所有发送流量的总和。本文中假设:

$$f_{jk}=\begin{cases} \alpha\times\dfrac{(d_j^\beta/2+d_k^\beta/2)\cdot n}{\sum\limits_{j=1}^{n}d_j^\beta} & (j\neq k,0\leqslant\alpha\leqslant 1) \\ 0 & (j=k) \end{cases} \tag{2}$$

d_j 和 d_k 分别表示节点 v_j 和 v_k 的度。α 为流量强度指数,用来调节发送流量的多少。当 $\alpha=1$,$f_{jk}=f_{jk}^{\max}$ 表示节点对 v_j,v_k 之间发送最大流量。β 为流量分布指数,用来表示运载函数和度的关联程度。

这样可以得到:

$$NF=\sum f_{jk}=\sum_{j\neq k}\alpha\times\frac{(d_j^\beta/2+d_k^\beta/2)\cdot n}{\sum\limits_{j=1}^{n}d_j^\beta}=\frac{\alpha.n}{\sum\limits_{j=k}^{n}d_j^\beta}\times$$

$$\sum_j\sum_{k\neq j}(d_j^\beta/2+d_k^\beta/2)=\frac{\alpha.n}{2\sum\limits_{j=1}^{n}d_j^\beta}\times\sum_j((n-2)d_j^\beta+$$

$$\sum_{k=1}^{n}d_k^\beta)=\frac{\alpha.n}{2\sum\limits_{j=1}^{n}d_j^\beta}\times((n-2)\times\sum_{j=1}^{n}d_j^\beta+n\times\sum_{k=1}^{n}d_k^\beta)=$$

$$\frac{\alpha.n}{2\sum\limits_{j=1}^{n}d_j^\beta}\times(2n-2)\sum_{j=1}^{n}d_j^\beta=\alpha.n(n-1) \tag{3}$$

流量强度 NF 由网络的大小 n 和流量强度指数 α 决定,跟 β 无关。这样改变 α 的大小就可以改变流量强度。

当 $\beta>0$ 时表示 f_{jk} 跟节点的度正相关,节点的度越大,该节点越重要,发送的流量越多,这时,称网络流量分布跟网络度分布同配;$\beta<0$ 时表示 f_{jk} 跟节点的度负相关,节点的度越大,该节点越不重要,发送的流量越少,这时,称网络流量分布跟网络度分布异配;当 $\beta=0,\alpha=1$,就表示所有节点对之间发送的流量都为一个单位,和已有模型的假设一致。本模型中,在流量强度 NF 不变(α 值不变)的条件下,改变 β 值,可以改变网络的流量分布。

2.2 节点的负载量

本模型中,定义节点 v_i 的负载量 $F_i(i=1,2,3,\cdots,n)$,为所有节点对 v_j,v_k 之间按照最短路(如时间最短、距离最短)原则发送的物资,经过节点 v_i 的流量的和

$$F_i=\sum_{j\neq k}f_{jk}(i)(i=1,2,3,\cdots,n) \tag{4}$$

$f_{jk}(i)$ 为节点对 v_j,v_k 之间发送 f_{jk} 的物资经过节点 v_i 的流量。

2.3 节点的容量

节点的容量表示节点可以承受的最大负载量。本模型中,定义节点 v_i 的容量

$$C_i=F_i^{\max}=\sum_{j\neq k}f_{jk}^{\max}(i)(i=1,2,3,\cdots,n) \tag{5}$$

$f_{jk}^{\max}(i)$ 表示所有节点对 v_j,v_k 之间发送最大物资量 $f_{jk}^{\max}(\alpha=1)$ 时经过节点 v_i 的流量。

2.4 负载的重分配策略

基于级联失效的抗毁性模型的负载重分配策略有很多形式。在本模型中,假设当某个节点或(和)边出现故障的时候,经过这些损坏节点或边的运输物资将按重新计算出来的最短路运输,实现了网络负载重分配。

2.5 级联失效过程

在本模型中,节点的"初始攻击(initial damage)"被处理为删除一个节点,初始节点的删除将导致网络负载的重分配,由于网络中节点的最大容量是确定的,重分配的负载可能会超过某些节点的容量,从而使这些节点出现级联故障,这些级联故障节点又可能产生下一轮的负载重分配,继而出现新的级联故障,这个级联过程可延续到没有新的级联故障节点出现才会停止。在剩余网络(节点删除以后的网络)中,网络可能被分割成一些不连通的子网和孤立节点,子网内部可以实现相互间的流量发送,而孤立节点则不具备流量的发送和接收能力。

2.6 抗毁性的度量

在本文中，用级联失效后网络的最大连通片尺寸与网络尺寸之比 R[7]来度量网络的抗毁性，即

$$R=N'/N \tag{6}$$

N 表示网络在攻击以前网络节点的数目，N' 表示在攻击以后最大连通尺寸中节点的数目。

3 仿真分析

3.1 仿真设计

仿真设计主要包括网络结构、攻击形式的设计，以及对网络在不同流量强度和不同流量分布下抗毁性的比较分析。

3.1.1 网络结构

本文主要关心网络流量对不同的拓扑结构网络的抗毁性影响，分别以 BA 模型[16]生成的无标度网络、ER 模型[17]生成的随机网络和团一级的复杂保障网络作为研究对象。在本文中，BA 网络初始节点 $n_0=2$，每个时间步增加一个节点和 $m=2$ 条边，平均度 $\overline{d_i}\approx 4$。ER 随机网络中任意两节点的连接概率 $p=0.04$，平均度 $\overline{d_j}\approx 4$。复杂保障网络平均度 $\overline{d_i}\approx 4$。

3.1.2 攻击形式

本文主要考虑网络在故意攻击和随机失效两种条件下的抗毁性。在仿真过程中故意攻击是指移除网络中负载量最大的单个节点；随机失效是指随机的移除网络中的单个节点。

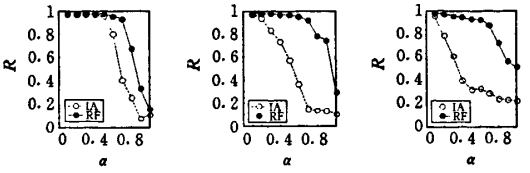
3.1.3 比较设计

首先比较分析不同的流量强度下(不同 α)每种网络对于单个节点移除的抗毁性；然后比较分析不同的流量分布下(不同 β)每种网络对于单个节点移除的抗毁性，模型中，α 的取值范围是 $0<\alpha\leqslant 1$，$\alpha=1$ 表示满负荷运行，节点对之间最大量的发送流量，所有节点的负载都达到容量的极限，β 的取值范围是 $-3<\beta<3$，这是由于实际网络中节点的度相差很大，发送流量的差将以指数的形式缩放(如节点 v_j，v_k 的度都为 1，节点 v_m，v_n 的度都为 10，$\beta=3$ 时，v_m，v_n 的流量将是 v_j，v_k 流量的 1 000 倍)，对于复杂保障网络而言，$-1<\beta<1$ 更符合实际情况。

3.2 仿真结果

3.2.1 不同流量强度下网络的抗毁性

图 2 中，(a)图表示 ER 随机网络在不同的流量强度下对于单个节点移除的抗毁性；(b)图表示 BA 网络在不同流量强度下对于单个节点移除的抗毁性；(c)图表示复杂保障网络在不同流量强度下对于单个节点移除的抗毁性。其中空心圆表示故意攻击(Intentional Attacks)；实心圆表示随机失效(Random Failure)。图的横轴表示 α，用来度量流量强度，图的纵轴表示最大连通片比 R，用来度量网络的抗毁性。



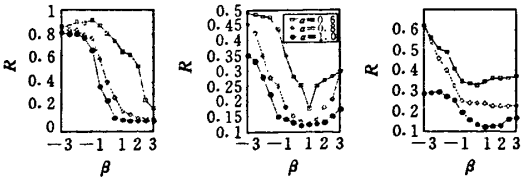
(a)随机网络 (b)无标度网络 (c)复杂保障网络

图 2 不同流量强度下网络的抗毁性

通过分析仿真结果发现：随机网络(图 2(a))在流量强度不大的时候对单个节点的移除表现出很强的抗毁性，在 α 的一段变化区间内($\alpha<0.5$)，网络随着 α 的变化，抗毁性曲线几乎没有变化；随机失效和故意攻击都存在一个 α 临界点 α^*，当 $\alpha<\alpha^*$，网络完好，当 $\alpha>\alpha^*$，网络开始级联失效，随机失效中 $\alpha^*\approx 0.7$，故意攻击中 $\alpha^*\approx 0.5$。无标度网络(图 2(b))中，网络对于随机失效和故意攻击的抗毁性差异很大，随机失效在 $\alpha=0.7$ 的时候网络的抗毁性仍然很好($R>0.9$)，甚至在网络接近饱和状态时($\alpha=0.9$)，网络的抗毁性指标还可以达到 70%以上；相反，故意攻击在流量强度很小的时候就出现级联失效($\alpha^*=0.2$)，在 $\alpha=0.7$ 的时候，网络几乎崩溃($R<0.15$)。复杂保障网络(图 2(c))中，故意攻击的 α 临界点在 α 很小的时候就出现了($\alpha^*\approx 0.1$)，在 $\alpha=0.4$ 时，网络抗毁性指标(R)已经降到 40%以下；随机失效的 α 临界点为 $\alpha^*\approx 0.7$，在流量强度达到满负荷时($\alpha\approx 1$)，保障网络对于随机失效的抗毁性指标(R)依然能达到 50%以上，这说明复杂保障网络对于随机失效有较好的抗毁性，对于故意攻击的抗毁性很差。

3.2.2 不同流量分布下网络的抗毁性

本文旨在研究复杂保障网络中流量分布对于抗毁性的影响，在模型中，通过改变 β，可以改变网络流量分布，如图 3 所示，这里主要关注 $-1<\beta<1$。



(a)随机网络 (b)无标度网络 (c)复杂保障网络

图 3 不同流量分布下网络对于节点随机失效的抗毁性

通过仿真结果可以发现：在同样的网络流量强度不同的流量分布下(不同 β)网络对于随机失效的抗毁性差异很大，随机网络(图 3(a))中，网络抗毁

性随 β 递增而递减。无标度网络(图3(b))的曲线是先递减后递增的,在 $\beta=1$ 附近出现最小值。但对于 $-1<\beta<1$ 区间,曲线也是明显递减的。复杂保障网络(图3(c))曲线的变化趋势没有前面两个那么明显,变化幅度也没有那么大,但是仍然呈先减后增的趋势。在 $\beta=-1$ 时,抗毁性要比 $\beta=1$ 时好。说明对于随机失效,节点流量与节点度异配的网络(度大的节点发送更少的流量,度小的节点发送更多的流量)抗毁性更好。

3.2.3 不同流量分布下网络对于节点故意攻击的抗毁性

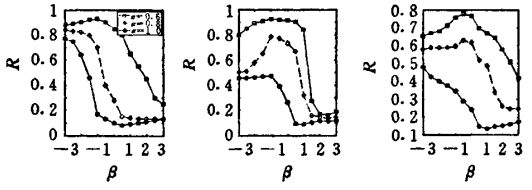


图4 不同流量分布下网络对于节点故意攻击的抗毁性

仿真结果(图4)表明:随机网络对于单个节点的故意攻击(图4(a)),随 β 递增而递减,曲线变化和节点随机失效相似。无标度网络对于故意攻击是先递增后递减的,在 $\beta=-1$ 附近出现最大值。复杂保障网络(图4(c))对于故意攻击在网络流量不大($\alpha=0.6,\alpha=0.8$)时,网络曲线特性和无标度网络对于故意攻击的曲线相似,表现为先增后减的形式,在满负荷($\alpha=1$)时,网络曲线又和无标度网络对于随机失效的曲线相似,表现为先减后增的趋势。对于 $-1<\beta<1$ 区间,网络抗毁性都是递减的。

通过以上三种网络的故意攻击和随机失效的仿真发现,对于同样的网络流量强度(固定 α),改变流量分布(改变 β),网络的抗毁性变化很大,节点度和节点发送流量的异配($\beta=-1$)比节点度和发送流量的同配($\beta=1$)有更好的级联失效抗毁性。

4 结束语

本文提出了不同流量下的复杂保障网络级联失效抗毁性模型,仿真分析了复杂保障网络在不同流量强度和不同流量分布条件下的网络抗毁性,研究表明复杂保障网络随着流量强度的增加,网络抗毁性急剧下降,在流量强度较大时,更可能使得网络整体崩溃。同时,不同的流量分布也能使得网络的抗毁性发生变化,网络流量分布跟节点度分布的异配比同配有更好的级联失效抗毁性,在网络流量一定的条件下改变网络的流量分布,可以提高网络的抗毁性。

参考文献:

[1] Albert R, Jeong H, Barabási A L. Error and Attack Tolerance of Complex Networks [J]. Nature, 2000, 406(6794): 378-382.

[2] Broadbent S R, Hammersley J M. Percolation Processes: I. Crystals and Mazes [J]. Proc Cambridge Philos Soc, 1957, 53: 629-641.

[3] Adilson E M, Ying C L. Cascade-based Attacks on Complex Networks[J]. Phys. Rev. E, 2002, 66 (6): 065102.

[4] Wu J J, Sun H J, Gao Z Y. Cascading Failures on Weighted Urban Traffic Equilibrium Networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007, 386(1): 407-413.

[5] 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.

[6] Moreno Y, Gómez J B, Pacheco A F. Instability of Scale-free Networks Under Node-breaking Avalanches [J]. Europhys. Lett., 2002, 58(4): 630-636.

[7] Adilson E M. Cascade Control and Defense in Complex Networks [J]. Phys. Rev. Lett., 2004, 93(9): 098701.

[8] Ian Dobson, Benjamin A Carreras, David E Newman. Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences[C]// Hawaii: IEEE Computer Society, 2003.

[9] Wang X F, Xu J. Cascading Failures in Coupled Map Lattices [J]. Phys. Rev. E, 2004, 70 (5): 056113.

[10] Mirko S, Jan S, Martin G. Proactive Robustness Control of Heterogeneously Loaded Networks [J]. Phys. Rev. Lett., 2006, 96(10): 108701.

[11] Wang B, Kim B J. A High-robustness and Low-cost Model for Cascading Failures [J]. Europhysics letters(Print), 2007, 78 (4): 15-19.

[12] Crucitti P, Latora V, Marchiori M. Model for Cascading Failures in Complex Networks [J]. Phys. Rev. E, 2004, 69(4): 045104.

[13] Kurant M, Thiran P. Layered Complex Networks [J]. Physical Review Letters, 2006, 96 (13): 138701.

[14] Barabási A L, Albert R, Jeong H. Mean-field Theory for Scale-free Random Networks [J]. Physica A 1999, 272: 173-187.

[15] Erdos P, A Rényi. On the Evolution of Random Graphs [J]. Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci., 1960, 5: 17-60.