

基于级联失效的战域保障网络节点容量优化

李 勇, 吕 欣, 谭跃进

(国防科技大学信息系统与管理学院, 长沙 410073)



摘要:通过分析战域保障网络的构造和特点,提出了基于级联失效的战域保障网络节点容量优化模型,进而研究了 3 种优化策略对级联失效抗毁性的影响:度升序优化策略、度降序优化策略、随机优化策略。结果表明按度降序策略优化约 50% 的节点可以有效提高战域保障网络级联失效抗毁性。

关键词:保障网络;级联失效;抗毁性;容量优化

中图分类号: TP302; N945

文献标识码: A

Optimizing Node Capacity of Campaign Logistics Networks Based on Cascading Failure

LI Yong, LÜ Xin, TAN Yue-jin

(College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A node capacity optimization model for campaign logistics networks based on cascading failure is proposed by analyzing its construction and features. Based on the optimization model, the effects of three optimization strategies on network invulnerability are investigated: degree-descend optimization strategy, degree-ascend optimization strategy and random optimization strategy. It is shown that the degree-descend optimization strategy with 50% node selection proportion can improve the network invulnerability effectively.

Key words: logistics networks; cascading failure; invulnerability; capacity optimization

1 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。在作战保障(包括实战演习和局部战争)中,以全体任务涉及的主要作战单位、仓库、医院、兵站等保障实体,和连接这些保障实体的主要交通路口、桥梁、隧道、车站等为节点,以公路、铁路、管道等连接线路为边的保障网络,称为战域保障网络,是敌方攻击的主要目标之一。战域保障网络中(协同作战单位之间)节点连接频繁,保障物资流量大,采用复杂网络理论来研究其抗毁性有非常重要的理论和实际意义。

目前,对复杂网络的研究主要集中在 3 个领域: 1) 网络生成机制及演化模型,即通过生成机制建立模型,模仿真实网络行为; 2) 复杂网络的稳定性,研究限制条件对网络几何特性的影响,如复杂网络承受意外

收稿日期: 2008 - 03 - 31

基金项目: 国家自然科学基金(70501032, 70771111)

作者简介: 李勇(1979-),男,湖南长沙人,博士研究生,主要研究方向为复杂网络抗毁性。

故障和恶意攻击的能力等;3)复杂网络上的动力学,这是人们研究复杂网络的最终目标,也就是超越网络拓扑结构,掌握建立在这些网络上的系统的工作方式和机理,认识复杂系统内部深奥得难以理解的动力学:如复杂网络上的同步、疾病传播等。近年来,对复杂网络的研究方兴未艾,研究从不同角度同时展开,从 Watts 和 Strogatz在 1998年提出的小世界网络模型(W S模型^[11])和 Barabási和 Albert在 1999年提出的无标度网络模型(BA模型^[12])开始,关于网络演化机制及演化模型的研究最为活跃,取得了很多的成就。在最近几年里,人们提出了大量的模型来描述现实网络。2000年,通过提出并使用主方程方法,Doǝgovtsev等^[13]给出了一类增长网络模型的精确解。同年,Krapivsky等^[14]提出了率方程方法,并利用这一方法研究了非线性择优连接对网络动态性及拓扑结构的影响。AmaraI等^[15]通过考虑老化、成本、容量约束等因素,建立模型来解释一些现实网络偏离幂律分布的行为。Motter提出了一种节点动态的级联失效模型^[16],Moreno等人提出一种边动态的相继故障模型^[17]。Crucitti提出了一种节点和边的混合动态相继故障模型^[18],Dobson提出 CAS-CASDE模型^[9],研究了电网中在不同负载条件下故障规模的概率分布特征。吕金虎等人^[10-12]提出了几种动态网络模型,并研究了其同步性。

现有研究表明^[13]:在网络拓扑结构一定的条件下,节点容量越大,级联失效抗毁性越强。然而,增加网络节点容量会提高网络的成本,对于保障网络来说,网络成本是有限的。因此,一个亟待解决的问题就是,在网络成本一定的条件下,如何优化配置网络中节点的容量。本文首先分析战域保障网络的构造和特点,其次建立基于级联失效的保障网络节点容量优化模型,最后通过仿真分析不同优化策略及成本系数对于网络抗毁性的影响。

2 战域保障网络构成及特点

2.1 战域保障网络构成

2.1.1 网络节点

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。按照保障任务的属性可以把保障网络的节点分为两类:保障节点和连节点。

1)保障节点。在保障网络中,具有物资接收或者发送能力的节点称为保障节点,保障节点包括仓库、医院、兵战等。

2)连节点。在保障网络中,所有不具备物资接收或者发送能力的节点称之为连节点,其作用就是转运资源。包括交通路口、车站、桥梁等。

2.1.2 网络的边、负载和容量

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

2.1.3 网络结构

网络的拓扑结构是网络的一个重要特征,用来刻画拓扑结构的参数一般有度分布、特征路径、聚集系数和社团结构等。比如说,很多研究结果表明,在通信、社会和生物系统中,大多数实际网络虽然内在不同,但是具有很多相同的拓扑属性,如较短的特征路径、较高的聚集系数、度分布的胖尾形状、度相关性、模体和社团结构。实际网络的所有这些特征与规则网格和随机图绝然不同。保障网络也是一种实际的有形网络,但又不同于一般的生物和社会网络,跟通信网络也有很大的区别,这就需要重新研究保障网络的拓扑属性。

很多学者已经对交通网络进行大量的研究^[14-17],无论是铁路网还是公路网,都存在几个基本的属性:

- 1)网络中节点的度分布比较均匀,并且不存在度很大的节点(不是无标度网络)。
- 2)网络中的节点平均距离较大(不是小世界网络)。
- 3)网络的全局聚集系数较小,局部聚集系数较大(具有社团结构)。

形成这些特点的原因是交通网络是典型的空间网络,首先,在空间网络中,点的度数是有限制的,这是由

于能连接到一个点的边数是受它的物理空间所限制。其次,由于边的成本与距离有关,所以远距离的点连接的可能性很少。长程连接受欧几里德距离的限制这个事实是不能形成小世界行为的重要原因,在 WS 的小世界网络建模重连程序中,两个点的连接与欧几里德距离无关。这意味着最短路的分布是均匀的。Watts 在文献 [18] 中考虑了节点按照均匀分布或者高斯分布在有限空间距离内与其他点相连的图。由于的限制,这类空间图不再是小世界的,因为特征路径长度和聚集系数表现为相同地依赖于参数的函数,Csanyi 和 Szendro 在文献 [19] 中证明了有强的地理约束条件的网络不是小世界网络。Ravasz 和 Basab 的文献 [20] 也已经表明在有强的地理位置限制和成本限制的网络中,由于加在边长上的拓扑限制,所以表现出平凡的聚集性。

保障网络还具有一般交通网络所没有的特性,比如,由于保障节点的位置通常比较偏僻,网络的结构不同于城市的路网结构,而表现出连接的稀疏性;战域保障网络的节点连接频繁,保障物资流量大,而战域间的网络节点依靠路网连接,保障流量相对较小。整体的拓扑结构如图 1 (战域保障网络为保障网络的子图) 所示。从图 1 可以看出,网络结构有明显的层次性,在战域保障网络中,由于受到空间容量的限制,网络不会存在度很大的节点,而表现出度分布的均匀性 (如图 1b)。并且,因为各节点之间 (兵站、仓库、医院等) 位置相对较近,不受地理距离影响,所以表现出节点连接的随机性。

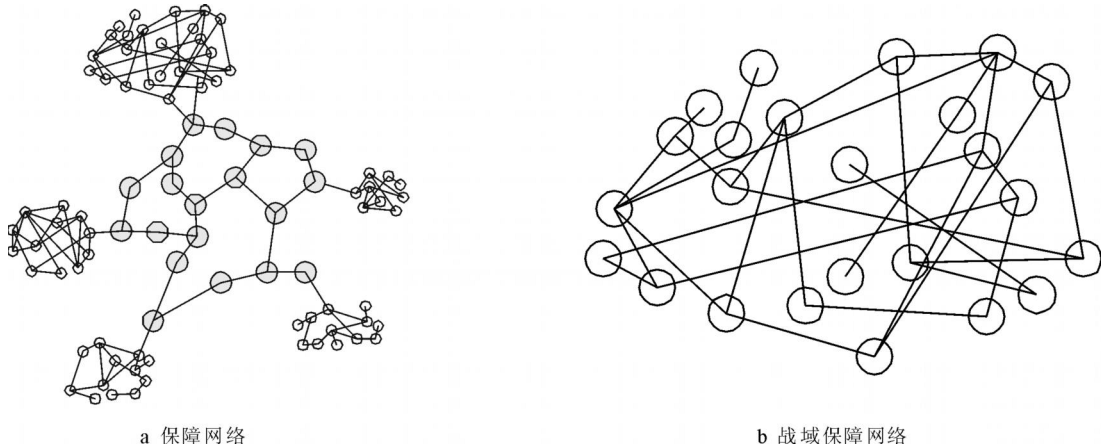


图 1 保障网络拓扑示意图

2.2 战域保障网络的特点

战域保障网络不同于一般的物流网络,有其自身的特点,主要包括:

- 1) 网络很可能遭受敌方攻击,抗毁性成为网络考虑的首要问题之一。
- 2) 仓库节点一般比较隐蔽,不容易受到攻击,也有一定的防护能力,而网络的连结节点很脆弱,容易失效;战域保障网络中绝大多数节点都是连结节点,既不发送物资,也不接收物资,只用作物资的承载和转运。
- 3) 对于每次物资运输而言,运输路线是事先制定的,制定路线有很多原则,如:安排多任务的调度、满足特殊运输工具要求、服从任务优先级的规定等。在网络节点被毁时不进行所有运输任务的重新调度。
- 4) 保障网络的负载,即所运输的物资不能像通信网的负载那样丢弃处理。对于正在路上运行的某个运输单位而言,如果前方节点被毁,考虑的策略首先是从被毁节点之前最近的节点怎样到达目的节点;如果不能到达目的节点,则物资返回。

3 战域保障网络节点容量优化模型

本文中,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 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 代表节点集合, $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_m\} \subseteq V \times V$ 代表边的集合。

3.1 网络模型

由于战域保障网络受地理距离影响较小,仅仅受到空间的约束,因此,网络连接具有随机性,并且网络中不存在度很大的节点,节点的度分布比较均匀,由 Bender和 Canfield^[21]引入的配置模型可以根据度序列建立网络图。度序列是 N 个整数列 $D = \{k_1, k_2, \dots, k_N\}$ 且

$$\sum_{i=1}^N k_i = 2M \tag{1}$$

在配置模型中, D 满足当 N 很大时,具有 k 度的点所占的比例趋于理想分布 $p(k)$ 。模型以等概率考察了所有含有 N 个节点且度序列为 D 的图的集合 (记为 $G_{N,D}^{conf}$)。给每个节点 v_i 配置 k_i 条半边,并以均匀概率随机将两个半边组对成边,这就是 N 个节点、度序列为 D 的随机配置。这个程序以相等的概率产生与序列 D 相符的任意图^[22]。事实上,因为节点 v_i 的 k_i 条不同半边有 $k_i!$ 种的排列数,所以每个配置图的取得有 $\prod_i (k_i!)$ 种不同方法。

这样,可以将战域保障网络模型看成为度在 1 到 d_{max} 的均匀随机网络,度分布为

$$p(k) = 1/d_{max} \quad (k = 1, 2, \dots, d_{max}) \tag{2}$$

其中, d_{max} 为网络中节点最大的度。

3.2 节点负载和网络负载

网络中节点 v_i 的负载 $l(v_i)$ 表示节点 v_i 上当前时刻承载物资的总和。网络负载

$$Nl = \sum_{i=1}^n l(v_i) \tag{3}$$

表示网络上所有节点的负载之和。文献 [23] 把节点的初始负载定义为某一区间上的均匀分布,文献 [24] 用介数作为初始负载,用来反映网络拓扑结构对负载的影响。在本文中,把节点上的初始负载定义为该节点的介数的函数,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径介数^[25],即:

$$C_B(k) = \frac{\sum_{w,w'} \frac{1}{n-1} \frac{1}{n-1} \dots}{n(n-1)} \tag{4}$$

其中, $\frac{1}{n-1}$ 为 w 与 w' 之间所有最短路径数目, $\frac{1}{n-1}$ 为 w 与 w' 之间经过节点 k 的最短路径数目。式 (2) 中允许 w, w' 为 k 。实际上,

$$\sum_{w,w'} \frac{1}{n-1} \frac{1}{n-1} \dots = \sum_{w=k} \frac{1}{n-1} \frac{1}{n-1} \dots + \sum_{w'=k} \frac{1}{n-1} \frac{1}{n-1} \dots + \sum_{w,k} \frac{1}{n-1} \frac{1}{n-1} \dots = \sum_{w,k} \frac{1}{n-1} \frac{1}{n-1} \dots + 2(n-1) \tag{5}$$

所以 $2/n \leq C_B(k) \leq 1$ 。本文中,节点负载 $l(v_k) = \alpha C_B(k) (0 < \alpha < 1)$, 称为流量系数。

3.3 网络初始容量

网络初始容量的内涵包括初始容量大小和初始容量分布,本模型中,定义节点的初始容量 $C(v_k) = C_B(k)$,初始容量的分布和初始负载分布一致,都等于网络的介数分布,由于流量系数 $0 < \alpha < 1$,在没有节点故障的时候,不会出现级联失效现象。

3.4 容量优化函数

首先,定义网络成本为

$$Cost = \alpha \sum_{k=1}^n C(v_k) \tag{6}$$

其中, α 为成本系数,用来表示网络成本相对于网络初始容量的大小。战域保障网络中,引起网络效率下降的大多数是网络的节点,所以本文中,不考虑网络边的容量不足的问题,只对网络节点容量进行优化。把节点的容量优化分为两个部分:按某种规则选择节点;以某种策略优化被选节点的容量。定义选择函数:

$$V = Sel(V) \tag{7}$$

其中, V 为网络节点集合, V' 为优化节点集合。 Sel 为网络节点集合到优化节点集合的映射, 由两部分组成:

1) 节点选择比例 (Selection Proportion, SP)。 $SP = |V'| / |V|$ ($0 < SP < 1$), 优化节点集合 V' 的大小与网络节点集合 V 大小的比, 如 $SP = 0$, 表示不优化任何节点; $SP = 1$, 表示优化所有节点。

2) 节点选择规则 (Selection Rule, SL)。本模型中, SL 分为随机选择 (Random Selection): 从网络节点集合 V 中随机选择节点; 度降序选择 (Degree-descend Selection): 从网络节点集合 V 中按度降序原则选择节点; 度升序选择 (Degree-ascend Selection): 从网络节点集合 V 中按度升序原则选择节点。

定义节点容量优化配置函数如下:

$$C(v_i) = \begin{cases} C(v_i) + \frac{C(v_i)}{\sum_{v_j \in V} C(v_j)} \times Cost & v_i \in V \\ C(v_i) & v_i \notin V \end{cases} \quad (8)$$

其中, $C(v_i)$ 为新的节点容量。这种优化方式是将网络成本在优化节点集合内按照节点的初始容量份额大小进行分配, 初始容量大的节点会获得更大的网络成本。

3.5 级联失效过程

基于级联失效的模型中级联失效过程有很多形式, 这里, 假设当某个节点或 (和) 边出现故障的时候, 该故障节点上的负载将分配到和其相邻的其他节点上, 对于战域保障网络而言, 这种假设是合理的, 如图 2 所示, 假设网络中节点 v_i 失效, 它的负载按某种策略分配到与它相邻的节点 a, b, c 上, 因为对于节点 v_i 来说, 它自身不产生负载 (连结点), 它的负载是从相邻的节点传递过来的, 当它发生故障, 这些被传递的负载将原路返回, 使得节点 a, b, c 上的负载增加, 可能产生故障, 一旦其中某个节点产生故障又会将所有的负载分配给与之相邻的正常节点上。这一过程可能会产生大面积的网络节点故障。

这里, 用级联失效后剩余网络中未失效节点的最大连通片尺寸与网络尺寸之比 $R^{[6]}$ 来度量战域保障网络的抗毁性, 即

$$R = N' / N \quad (9)$$

N 为战域保障网络在攻击以前网络节点的数目, N' 为在攻击以后最大连通尺寸中节点的数目。

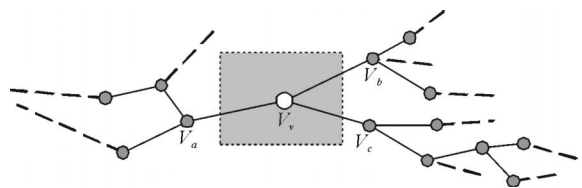


图 2 负载重分配示意图

4 仿真分析

4.1 仿真设计

仿真设计主要包括网络结构、攻击形式的设计, 以及对战域保障网络仿真的初始流量和容量的假设等。

战域保障网络的特点是度分布比较均匀, 节点之间的连接具有随机性, 本文中用均匀随机网络表示其网络模型, 同时, 我们还对 Barabasi 的 BA 无标度网络、ER 随机网络进行对比分析, 在本文中, 网络平均度 $d_k = 4$, 网络规模都为 200 个节点。

本文只考虑网络面临单个节点随机失效的情况。

假设流量系数 $\alpha = 0.95$ 。这样, 网络中某个节点的随机失效就可能使得网络大规模故障。

仿真结果比较分析容量优化函数模型中不同节点选择比例 (SP) 和不同节点选择规则 (SL) 下, 网络抗毁性的差异。

4.2 仿真结果

4.2.1 优化策略对抗毁性的影响

图 3a 表示 BA 网络在同样的网络成本中不同节点优化规则 and 不同节点选择比例下对于单个节点随机移除的抗毁性; 图 3b 表示 ER 随机网络的抗毁性。图 3c 表示战域保障网络的抗毁性。其中三角形表示度降序选择 (DDS) 优化策略; 圆形表示随机选择优化策略 (RS); 方形表示度升序选择优化策略 (DAS)。图的

横轴为节点选择比例 SP ,纵轴为最大连通片比 R ,表示网络的抗毁性。

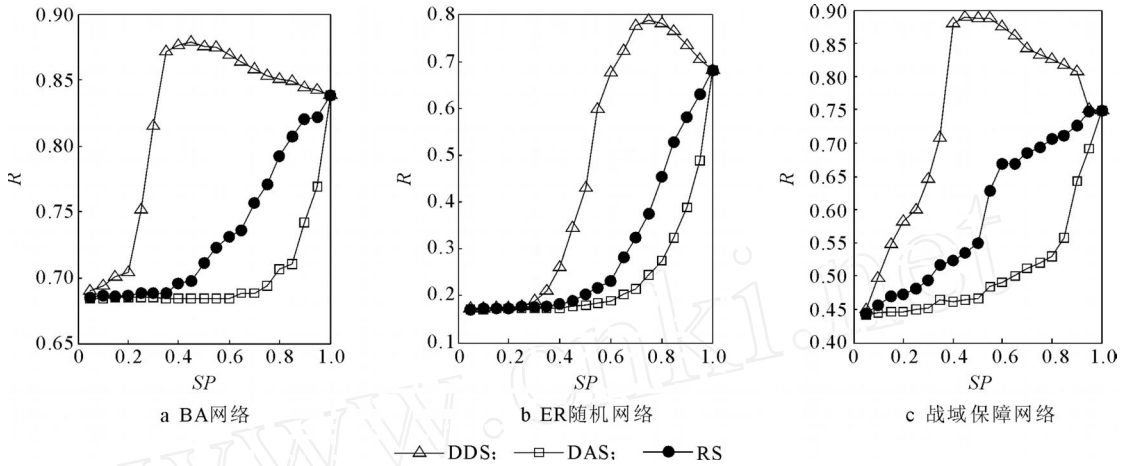


图 3 优化策略对抗毁性的影响

仿真结果表明:不同的优化策略对于网络的抗毁性影响很大,在 DAS和 RS下,网络的抗毁性都随 SP 递增,而在 DDS中,网络的抗毁性是先递增后递减的,存在最佳优化比例 SP^* ,这时,网络抗毁性效果最好。BA网络中 $SP^* = 0.5$,ER网络中 $SP^* = 0.7$,战域保障网络中 $SP^* = 0.6$ 。对于度升序优化和随机优化都需要尽量多地增加选择比例,才能提高网络的抗毁性。而在度降序选择优化中,节点选择比例的大小对网络的抗毁性影响很大,找到最佳节点选择比例 SP^* ,能很好地提高网络的抗毁性,相对于网络节点全部优化,在 SP^* 点上,BA网络的抗毁性提高了 7%,ER随机网络提高了 12%,战域保障网络提高了 20%。网络优化的成本可以分为构成成本和运行成本^[26],本文的网络成本实际上是属于构成成本,而对于运行成本而言,增加节点选择比例,运行成本也增加。所以就总成本上来说,最佳选择比例点的度降序优化是有效的优化规则,因为此刻既达到了网络抗毁性的最大值,也降低了网络的运行成本。

4.2.2 成本系数对抗毁性的影响

图 4a表示 BA 网络在同样的优化策略 (DDS)不同成本系数下对于单个节点随机移除的抗毁性;图 4b表示 ER 随机网络的抗毁性;图 4c表示战域保障网络的抗毁性。图的横轴为节点选择比例 SP ,纵轴是最大连通片比 R ,表示网络的抗毁性。

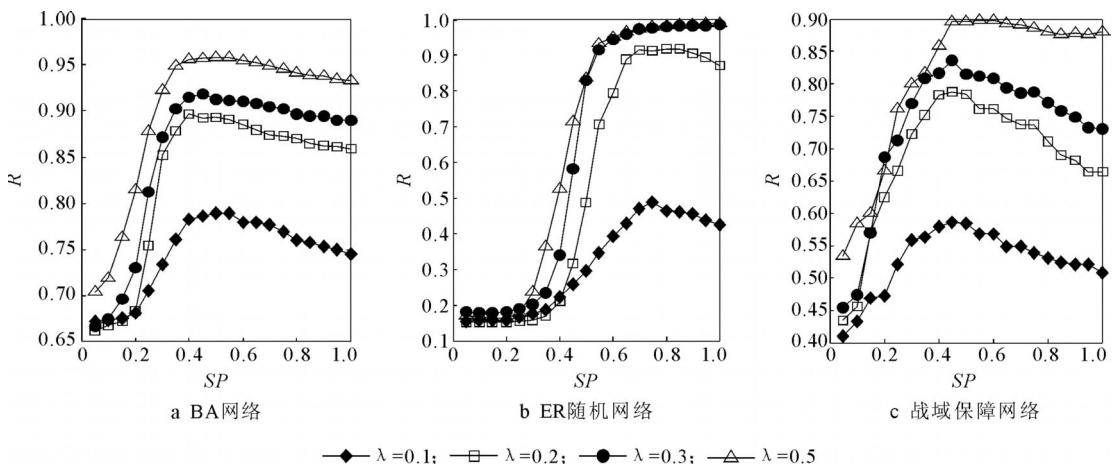


图 4 成本系数 对抗毁性的影响

通过仿真,我们发现:1)网络的抗毁性是随着网络成本的增加而增加的,无论是哪种网络结构,在度降序优化策略中,节点选择比例要超过一定的值(BA网络中 $SP > 0.4$,ER网络中 $SP > 0.6$,战域保障网络中 $SP > 0.5$),网络的抗毁性才能显著提高,也就是需要优化网络规模一半左右数量的度大的节点,网络抗毁性才能明显提高;2)随着网络成本的增加,优化的峰值点逐渐消失($\alpha = 0.5$ 时,图 4a中峰值点不明显,图 4b中峰值点已经消失,图 4c中峰值点模糊),这说明如果网络成本足够大,则可以对整个网络节点容量进行优化。

5 结论

本文通过对战域保障网络级联失效机制的分析,提出了战域保障网络级联失效优化模型,仿真分析了不同的优化策略和不同网络成本下网络的抗毁性变化,发现战域保障网络中,度降序优化比随机优化和度升序优化效果要好,并且存在一个最佳节点选择比例,约为 0.5,选择这个比例的度大的节点进行容量优化,能明显提高网络的抗毁性。

参考文献:

- [1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small-world networks[J]. Nature, 1998, 393 (6684): 440 - 442.
- [2] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286 (5439): 509 - 512.
- [3] Dorogovtsev S N, Mendes J F F, Samukhin A N. Structure of growing networks with preferential linking[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85: 4633 - 4636.
- [4] Krapivsky P L, Redner S, Leyvraz F. Connectivity of growing random networks[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85: 4629 - 4632.
- [5] Amaral L A N, Scala A, Barthélémy M. Classes of behavior of small-world networks[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2000, 97: 11149 - 11152.
- [6] Motter A E. Cascade control and defense in complex networks[J]. Phys Rev Lett, 2004, 93 (9): 098701.
- [7] 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.
- [8] Crucitti P, Latora V, Marchiori M. Model for cascading failures in complex networks[J]. Phys Rev E, 2004, 69 (4): 045104.
- [9] Dobson I, Carreras B A, Newman D E. A probabilistic loading-dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts[C]. Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences Hawaii: IEEE Computer Society, 2003.
- [10] Lü J H, Yu X H, Chen G R. Characterizing the synchronizability of small-world dynamical networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I Regular Papers, 2004, 51 (4): 787 - 796.
- [11] Lü J H, Chen G R. A time-varying complex dynamical network model and its controlled synchronization criteria[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50 (6): 841 - 847.
- [12] Zhang Q J, Lu J A, Lü J H. Adaptive feedback synchronization of a general complex dynamical network with delayed nodes[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II Express Briefs, 2008, 55 (2): 183 - 187.
- [13] Wu J J, Gao Z Y. Cascade and breakdown in scale-free networks with community structure[J]. Phys Rev E, 2006, 74 (6): 66111.
- [14] DeMontis A, Barthélemy M, Chessa A, et al. The structure of inter-urban traffic: a weighted network analysis[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2007, 34 (1): 905 - 924.
- [15] Jiang B, Claramunt C. Topological analysis of urban street networks[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2004, 31 (1): 151 - 162.
- [16] Kurant M, Thiran P. Extraction and analysis of traffic and topologies of transportation networks[J]. Phys Rev E, 2006, 74 (3): 36114.
- [17] Sienkiewicz J. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland[J]. Phys Rev E, 2005, 72 (4): 46127.
- [18] Watts D J. Small Worlds: The Dynamics of Networks Between Order and Randomness[M]. Princeton: Princeton University Press, 1999.
- [19] Csanyi G, Szendroi B. Fractal-small-world dichotomy in real-world networks[J]. Phys Rev E, 2004, 70 (1): 016122.

- [20] Ravasz E, Barabasi A L. Hierarchical organization in complex networks[J]. Phys Rev E, 2003, 67 (2): 26112
- [21] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks: structure and dynamics[J]. Physics Reports, 2006, 424 (4 - 5): 175 - 308
- [22] Bomholdt S, Schuster H G. Handbook of Graphs and Networks: From the Genome to the Internet[M]. Berlin: Wiley-VCH Weinheim, 2003
- [23] Wang X F, Xu J. Cascading failures in coupled map lattices[J]. Phys Rev E, 2004, 70 (5): 056113
- [24] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Phys Rev E, 2002, 66 (6): 065102
- [25] Freeman L C. A set of measures of centrality based upon betweenness[J]. Sociometry, 1997, 40: 35 - 41.

www.cnki.net