

全球航运网络鲁棒性和脆弱性研究

邓贵仕*, 武佩剑, 田 炜

(大连理工大学 系统工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 通过对全球航运网络节点度分布、度值相关性和节点度与介数相关性分析发现, 度值大的节点优先与度值较大节点连接, 度值大的节点介数也较大, 因而度值较大的节点对网络影响程度较大. 选择度值较大节点为优先攻击目标进行选择删除, 随机生成节点序列作为出错目标进行随机删除, 进而研究在出错和攻击情况下, 全球航运网络聚集系数、平均距离、孤立节点比率和网络效率的变化情况. 通过分析发现全球航运网络具有较好的鲁棒性, 但网络较脆弱.

关键词: 全球航运网络; 鲁棒性; 脆弱性

中图分类号: C94 **文献标志码:** A

0 引言

网络鲁棒性和脆弱性是指随机删除和选择删除网络中节点或者边对网络连通性的影响. 网络鲁棒性和脆弱性是刻画真实网络的重要特征, 也是近年来学者研究真实网络的热点问题^[1,2]. 而自然灾害、战争、拥堵、其他港口竞争等原因都会对港口在航运网络中的功能产生不同程度的影响^[3]. 本文分析随机出错和有目的攻击两种方式对全球航运网络的聚集系数、平均距离、孤立节点比率和网络效率等拓扑特征的影响, 进而研究航运网络的鲁棒性和脆弱性.

1 网络鲁棒性和脆弱性

2004年法国资深的船舶经纪人公司BRS ALPHALINE针对集装箱运力对班轮公司进行了排名, 并统计得到排名前25位的班轮公司总运力占全球集装箱总运力的81.3%. 本文统计得到这25家班轮公司官方网站提供的航线1436条, 这些航线挂靠集装箱港口503个, 以班轮公司航线挂靠的集装箱港口为节点(所有节点的集合记为 V), 以班轮公司航线经过的相邻港口连线作为边(所有边的集合记为 E)构建本文研究的全球航运网络 $G(V, E)$, 其拓扑结构如图1所示.

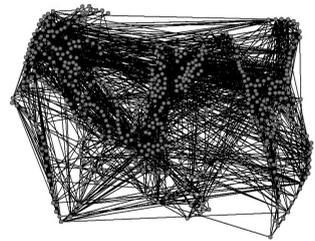


图1 全球航运网络拓扑结构

Fig. 1 Topology of global shipping network

1.1 出错和攻击节点描述

网络中一个节点 v 的度是网络中与此顶点连接边的数量^[4], 可以统计出全球航运网络中所有节点的度值(D), 度值较大的节点则体现其具有较多的航线经过该港口. 节点的度的变化规律用分布函数 $P(k)$ 来表示, 其表示随机选择一个节点恰有 k 条边的概率. 根据上面得到的全球航运网络中每个节点的度值可以描述全球航运网络度的概率分布, 如图2所示.

由图2可以看出全球航运网络的节点度分布基本满足截断递减幂率分布, 度值大的节点所占比重较小, 而度值小的节点占比较大.

Newman^[5]提出了一个标志网络的同类性统计参数(也称为度相关性). 同类性用一个在-1

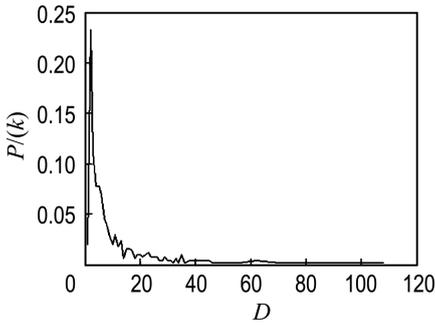


图2 节点度分布

Fig. 2 Degree distribution of nodes

和1之间变化的参量 r 表征,表示网络中节点是否与类似自己的其他节点优先建立边连接。 r 大于零表示邻接节点度的正相关,即度值高的节点优先与度值高的节点连接;而 r 小于零表示邻接节点度的负相关,即度值高的节点优先与度值低的节点连接。无向网同类性可通过式(1)求得。

$$r = \frac{1}{\sigma_q^2} \sum_{jk} jk(e_{jk} - q_j q_k) \quad (1)$$

其中 e_{jk} 表示随机选择一条边联接剩余度分别为 j 和 k 的节点的联合概率分布, $\sum_{jk} e_{jk} = 1, q_k = \sum_j e_{jk}, \sigma_q^2 = \sum_k k^2 q_k - [\sum_k k q_k]^2$ 。

经过对全球航运网络节点度值数据进行计算得到度相关系数 $r=0.0264$,说明全球航运网络中度值高的节点一般选择和度值高的节点相连。

网络中两个节点之间的距离是连接这两个节点的最短路径的边数,节点介数是网络中所有最短路径经过该节点的数量比例。介数描述了节点在网络中的作用和影响力^[6]。在航运网络中,港口介数的分布特征反映了不同港口在航运中的地位和相应关系。经过对全球航运网络中所有节点的介数和度值相关性分析得到它们之间的相关系数 $r=0.8245$,说明有较多航线经过的港口其介数也较大,网络中节点间最短路径经过的次数也较多。

所以本文把度值较大的港口节点作为优先攻击目标进行选择删除与此节点相连的边;随机生成港口节点序列作为出错目标进行随机删除与此节点相连的边,进而研究出错和攻击对全球航运网络聚集系数、网络平均距离、孤立节点比率和网络效率等网络重要特性的影响。

1.2 出错和攻击对网络聚集系数影响

聚集系数 C 用来描述网络中节点的聚集情况,即网络的聚集程度^[7]。航运网络中,同时和一个港口相连的两个港口也可能是相连的。网络节点 i 的聚集系数 C_i 可由式(2)求得:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (2)$$

其中 k_i 为节点 i 的度值, E_i 为与节点 i 相连的节点间实际连接边的总数。若与节点 i 相连的 k_i 个节点构成完全图,则这 k_i 个节点间有 $k_i(k_i - 1)/2$ 条边相连接。

则整个网络的聚集系数为网络中所有节点的聚集系数的平均值:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (3)$$

其中 N 为网络节点总数。

通过计算可以求得全球航运网络的聚集系数 $C=0.4008$ 。由1.1生成的出错节点序列和攻击节点序列进行随机删除和选择删除,两种删除方式导致网络聚集系数变化情况如图3所示。

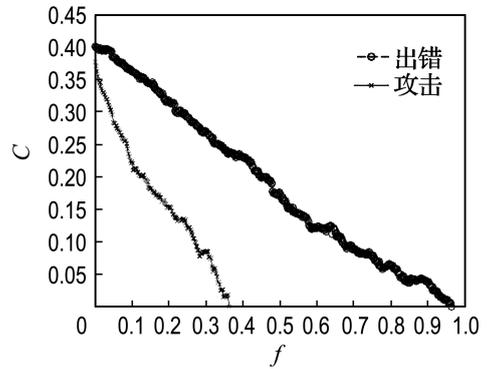


图3 出错和攻击对全球航运网络聚集系数影响

Fig. 3 Change of clustering coefficient of global shipping network under errors and attacks

由图3可看出网络节点出错导致网络的聚集系数缓慢递减,当出错节点数占所有节点总数比例 $f=0.96$ 时,网络聚集系数为0;而对网络度值较大的节点进行攻击导致网络的聚集系数迅速递减,当 $f=0.36$ 时,网络聚集系数为0。

1.3 出错和攻击对网络孤立节点比率影响

网络中孤立节点总数占网络节点总数的比率 I 体现了网络的离散程度。针对出错节点序列和攻击节点序列对网络节点进行随机删除和选择删除与之相连的边,两种删除方式导致网络孤立节点比率变化情况如图4所示。

由图4可以看出对网络节点选择攻击导致网络孤立节点产生要大于网络出错下孤立节点的产生。当攻击节点总数占网络所有节点总数比率 $f=0.56$ 时,网络孤立节点比率为1,也就是网络所有节点均为孤立节点;当出错节点总数占网络所有节点总数比率 $f=0.96$ 时,网络所有节点均为孤立节点。

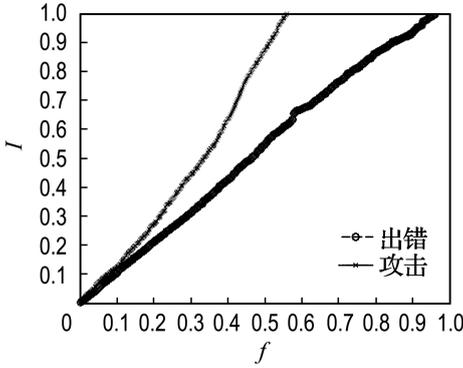


图4 出错和攻击对全球航运网络孤立节点比例影响

Fig. 4 Change of isolated nodes of global shipping network under errors and attacks

1.4 出错和攻击对网络平均距离影响

网络中两个节点之间的距离是由连接这两个节点的最短路径的边的个数所定义^[8]. 度与度相关性分析研究发现节点度之间有正的相关性, 度值较大的节点往往与度值较大的节点相连. 所以本文在求解航运网络中节点间最短距离时采用度值较大节点优先搜索. 首先统计得到表示网络中节点间关系的邻接矩阵 (a_{ij}) .

$$a_{ij} = \begin{cases} 1; & \exists l \in E, \text{ s. t. } i \in l \text{ and } j \in l \\ 0; & \forall l \in E, \text{ s. t. } i \notin l \text{ or } j \notin l \end{cases}$$

其中 $i, j \in V$. 网络中所有节点的相邻节点集合为 $B_i = \{j \in V; A(i, j) = 1\}$, 其中 $i \in V$.

对 B_i 内元素按照度值大小的倒序排列. 那么在集装箱航运网络中求任意两个节点 m, n 间最短路径时, 先对节点 n 和节点 m 的度比较, 度值大的节点作为始点, 度值小的节点作为终点.

假设 $D_n > D_m$, 则以 n 为起点, 若节点 m 属于 B_n , 则节点 m, n 间最短距离 $d(n, m) = 1$, 否则用 B_n 中元素的相邻节点的并集除去已经比较过的节点来替代 B_n , 并对 B_n 按照度值排序, $d(n, m)$ 用 $d(n, m) + 1$ 替代, 检验节点 m 是否在 B_n 中所有元素的相邻节点集合中, 依此循环可以建立一棵以 n 为根以 m 为终点的度优先树, 从而可以求得节点 m, n 间最短路径. 网络中任意两节点之间距离统计情况如图5所示.

网络的平均距离 l 就是网络中所有节点对之间距离的平均值, 它描述了网络的分离程度. 通过计算机计算可知本文研究的全球航运网络的平均距离 $l=3.252$. 针对出错节点序列和攻击节点序列对网络节点进行随机删除和选择删除与节点相连的边, 两种删除方式导致网络平均距离变化情况如图6所示.

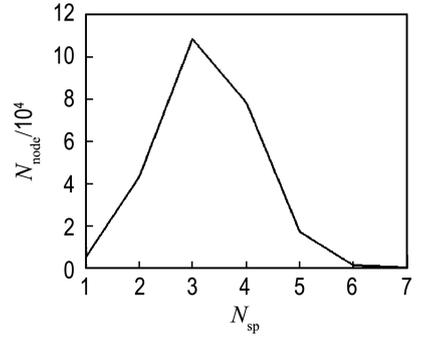


图5 全球航运网络节点最短路径分布
Fig. 5 Distribution of shortest path between ports of global shipping network

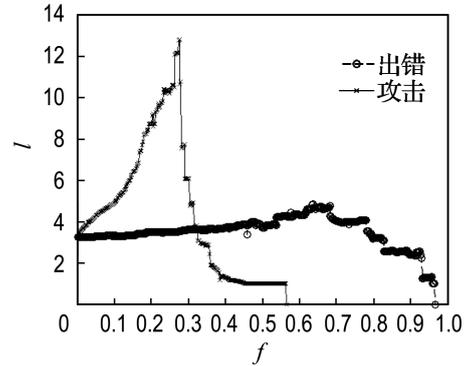


图6 出错和攻击对全球航运网络平均距离影响
Fig. 6 Change of average length of global shipping network under errors and attacks

由图6可以看出, 在 f 由 $0 \rightarrow 0.77$ 变化时, 网络节点出错时对网络平均距离影响很弱, 当 f 由 $0.77 \rightarrow 0.96$ 变化时会使得网络平均距离缓慢递减至0; 而对网络节点进行选择攻击时, 对网络平均距离影响较大, 在 f 由 $0 \rightarrow 0.27$ 变化时, 网络平均距离递增, 当 $f = 0.27$ 时, 网络的平均距离达到最大值12.817, 由于网络孤立节点急剧增加, 当 f 由 $0.27 \rightarrow 0.56$ 变化时, 网络平均距离递减, 并于 $f = 0.56$ 时, 网络平均距离为0.

1.5 出错和攻击对网络效率影响

网络效率是描述网络结构的一个重要特性, 是度量网络对出错和攻击容忍程度的一个重要参数^[9]. 网络中任意两节点 i, j 之间的效率 ϵ_{ij} 由这两个节点的距离 d_{ij} 定义: $\epsilon_{ij} = 1/d_{ij}$, 若节点 i, j 之间没有边把它们连接起来, 则 $d_{ij} = \infty$. 而网络效率由式(4)定义:

$$E(G) = \frac{\sum_{i \neq j \in G} \epsilon_{ij}}{N(N-1)} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (4)$$

对出错节点序列和攻击节点序列进行随机删除和选择删除与之相连的边, 全球航运网络的网

络效率变化情况如图 7 所示。

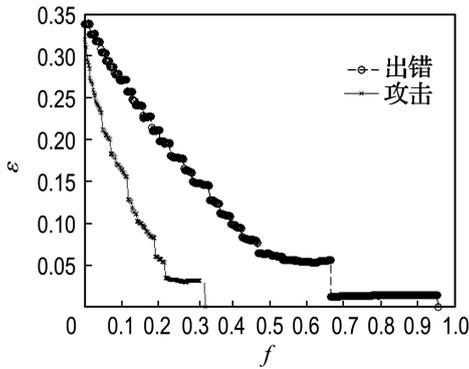


图 7 出错和攻击对全球航运网络效率影响

Fig. 7 Change of network efficiency of global shipping network under errors and attacks

由图 7 可以看出对网络节点随机删除和选择删除均会导致网络效率递减,而对网络攻击导致网络效率迅速减小,当 $f=0.31$ 时,网络效率为 0;网络出错情况时,网络效率缓慢递减,当 $f=0.96$ 时,网络效率为 0.

2 结 论

本文用占全球集装箱总运力 81.3% 且排名为前 25 的班轮公司航线构造全球航运网络,对网络节点度分布、度与度相关性和度与介数相关性分析发现,度值较大的节点对网络影响程度较大,因此以度值较大节点为优先攻击目标进行选择删除与之相连的边,以随机生成节点序列为出错节点序列进行随机删除与之相连的边,进而研究两种删除情况下,网络聚集系数、平均距离、孤立节点比率和网络效率的变化情况.通过分析发现全

球航运网络具有较好的鲁棒性,但网络较脆弱.

对全球航运网络鲁棒性和脆弱性研究可以为班轮网络设计与优化、分析与缓解全球集装箱拥堵问题等提供参考,而对全球航运网络定量分析的相关研究工作仍需进一步探讨.

参考文献:

- [1] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. *Nature*, 2000, **406**: 378-382
- [2] CRUCITTI P, LATORA V, MARCIORI M, *et al.* Error and attack tolerance of complex networks [J]. *Physica A*, 2004, **340**: 388-394
- [3] NOTTEBOOM T E. Container shipping and ports: an overview [J]. *Review of Network Economics*, 2004, **3**(2): 86-106
- [4] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of small world networks [J]. *Nature*, 1998, **393**: 440-442
- [5] NEWMAN M E J. Assortative mixing in networks [J]. *Physical Review Letters*, 2002, **89**(20): 208701
- [6] BOCCALETTI S, LATORA V, MORENO Y, *et al.* Complex networks: Structure and dynamics [J]. *Physics Reports*, 2006, **424**: 175-308
- [7] ALBERT R, BARABÁSI A L. Statistical mechanics of complex network [J]. *Review of Modern Physics*, 2002, **74**(1): 47-97
- [8] STROGATZ S H. Exploring complex networks [J]. *Nature*, 2001, **410**: 268-276
- [9] LATORA V, MARCIORI M. Efficient behavior of small-world networks [J]. *Physical Review Letters*, 2001, **87**(19): 198701

Research on robustness and vulnerability of global shipping network

DENG Gui-shi*, WU Pei-jian, TIAN Wei

(Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Through analyzing degree distribution, relation between degrees and relation between degree and betweenness of global shipping network, the vertex with higher degree is prior to connection with higher node, in general, node with higher degree has higher betweenness, so nodes with higher degree affect network more easily. So the node with higher degree was chosen first as the target of attack to be deleted, and the random vertex was chosen as the target of error to be deleted. The change of clustering coefficient, average path lengths, ratio of isolated nodes, and network efficiency under errors and attacks was analyzed, and a conclusion was drawn that the global shipping network is robust but vulnerable.

Key words: global shipping network; robustness; vulnerability