

航空复杂网络拓扑特性与可靠性研究

董昌乐, 王 雄*

山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南

收稿日期: 2024年4月25日; 录用日期: 2024年5月23日; 发布日期: 2024年5月31日

摘 要

为了减少不确定因素对航空网络的影响, 通过选取全国33个城市为机场节点, 借助UCINET软件构建航空网络, 并根据复杂网络理论来分析网络拓扑特性, 利用Pajek软件计算网络特征指标, 并通过Python来仿真模拟随机攻击和蓄意攻击, 对比分析不同节点失效下航空网络的连通性变化, 结果表明: 网络效率和最大联通子图相对大小两个指标, 在随机攻击下变化弱于蓄意攻击, 随着每次失效节点数量增多, 网络连通性下降更显著。重点加强对重要城市的安全防护, 来保障航空网络的运行效率以及旅客的出行安全。

关键词

航空网络, 特征指标, 仿真模拟, 可靠性

Research on Topological Characteristics and Reliability of Aviation Complex Networks

Changle Dong, Xiong Wang*

School of Traffic and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

Received: Apr. 25th, 2024; accepted: May. 23rd, 2024; published: May. 31st, 2024

Abstract

In order to reduce the influence of uncertainties on the aviation network, by selecting 33 cities as airport nodes, the aviation network was constructed with the help of UCINET software, and the network topology characteristics were analyzed according to the complex network theory, the network characteristic index was calculated by using Pajek software, and the random attack and deliberate attack were simulated by Python, and the connectivity changes of the aviation network under different node failures were compared and analyzed. Focus on strengthening the security protection of important cities to ensure the operational efficiency of the aviation network and the safety of passengers.

*通讯作者。

Keywords

Aviation Network, Feature Indicators, Simulation, Reliability

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着航空事业的不断发展,它在提供出行、贸易和旅游便利的同时,也面临着多种问题和挑战,影响其网络效率、安全性和可持续性。研究航空网络的可靠性对于机场航班的安全高效运营以及航线的规划具有重要的意义。

现阶段,诸多学者对航空网络的拓扑特性和可靠性进行了研究,吕伟等[1]以航班流量和机场间距离作为权重构建航空加权网络,且在关键节点选取上采用综合效率分析法,最后对航空网络进行仿真模拟来研究其可靠性。王鹏宇[2]对航空网络等多个网络进行结构特征分析,并利用 Space-P 方法进行模型构建,并按照度和介数排序对网络进行模拟攻击,通过分析网络的连通度、网络效率、最大连通子图相对大小和自然连通度等指标来研究其鲁棒性。张文文[3]以复杂网络理论为基础,采用主要航线数据来分析航空网络结构特征。汪倩倩[4]通过 Space-P 构建空铁双层复杂网络,通过换乘连接强度指标来表征网络功能的脆弱性,利用 MATLAB 软件模拟随机攻击和给予最大 MCGM 值的蓄意攻击。杜欣茹[5]研究航空冷链运输的拓扑结构,考虑边失效情形下最大联通子图和网路效率的变化,通过拉格朗日松弛与分支定界算法重新设计航空冷链运输网络,从网络结构和时间可靠性两个方面对网络可靠性变化进行研究。冯晓[6]基于极端事件下分析高铁航空网络的脆弱性,通过网络科学方法识别出脆弱节点和区域,最后应用数学优化的方法对网络脆弱性进行改善。杜方叶等[7]以全球航空网络视角探究网络连通性的影响及地区差异。吕文红等[8]从指标、网络类型和可靠性三个方面论述交通运输网络的研究和应用现状。蒲亚琼[9]对 2016 年货运航空网络的基本特征进行分析,通过 GIS 构建网络拓扑结构,并对三个观测年的货运航空网络进行模拟攻击。张豫翔等[10]以流量为边权,提出运输可靠性和可达性度量两个测度指标,构建不完全信息攻击模型提出两种攻击策略进行仿真。孙书霞[11]介绍了图论、统计物理学和社会网络分析三种方法研究网络拓扑结构。陈娱等[12]从随机故障和 4 种蓄意情况出发定量分析机场失效对航空运输网络效率的影响。王俊超等[13]利用 PAJEK 绘制航空网络,利用 MATLAB 计算并分析复杂网络特征,最后在不同攻击模式下研究空网的性能变化。

本文对 2023 年国内航空网络的特性和可靠性进行分析,利用 UCINET 构建航空运输网络并对网络的特征指标进行分析,然后进行关键节点选取。最后对网络的节点城市进行逐个累次的随机和蓄意攻击,观察这两种攻击模式下网络连通性的变化情况,为我国航空站点及航线的安全管理运营提供参考借鉴。

2. 数据来源与模型构建

2.1. 数据来源

本文研究数据来源于 2023 年中国民用航空局统计公报以及铁路 12306 官网,由于国内机场站点较多,因此根据 2023 年统计公报旅客吞吐量筛选出省会、自治区首府、直辖市城市和个别吞吐量高于这三者的地级市作为机场节点(不包含港澳台),共 33 个节点城市和 862 条航线来构建航空网络。

2.2. 模型构建

由于航空网络以城市为节点以航线构成连边共同组成复杂网络故模型构建选择 Space-P 的构建方法。构建说明如下:

- (1) 网络节点说明, 以城市为单位代替机场站点为节点, 若一个城市有多个机场则合并为一个机场。
- (2) 网络连边说明, 若节点城市之间存在直达航班, 则有连边否则无连边。且航班可以往返于两城市之间, 因此不考虑连边方向。
- (3) 关于边权说明, 由于飞机航班经常动态调整, 且获取客流量较为困难, 因此不考虑边的权重, 本次构建的航空网络为无向无权网络, 如图 1 所示。

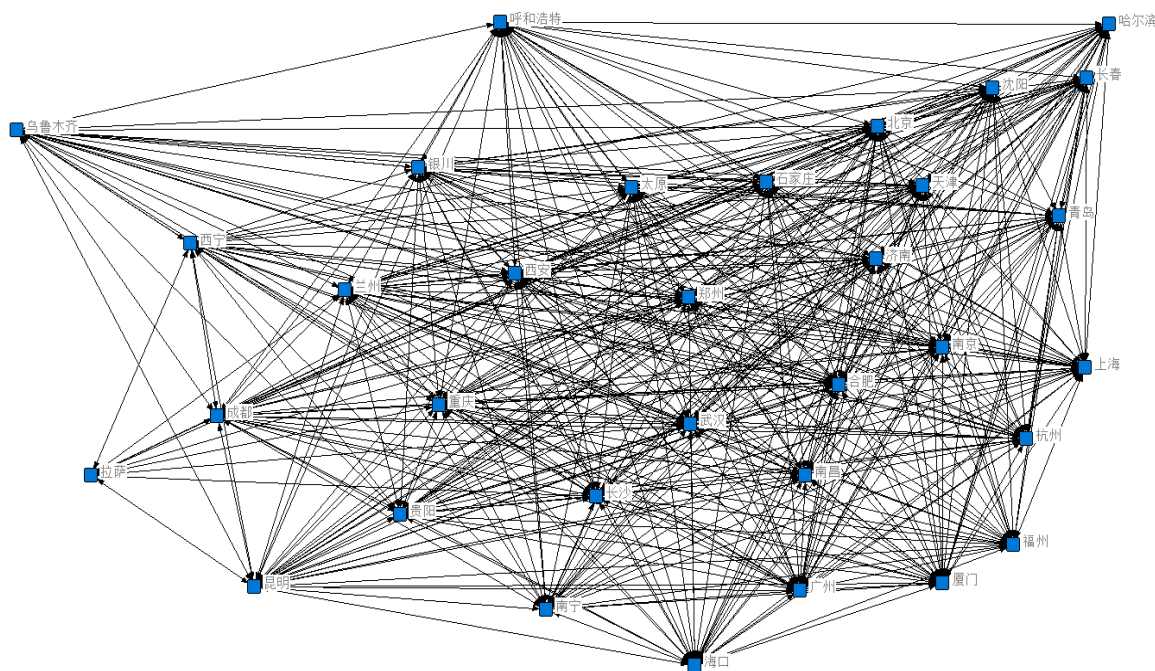


Figure 1. Aviation network connectivity diagram

图 1. 航空网络连通图

3. 航空网络拓扑特性分析

对于无向无权航空网络, 本文通过度与度分布、平均路径长度、聚类系数、介数来分析航空复杂网络的拓扑结构。

3.1. 度与度分布

节点度可以帮助识别主要航空枢纽, 它是指与该节点城市直接相连的航线数量, 计算公式为:

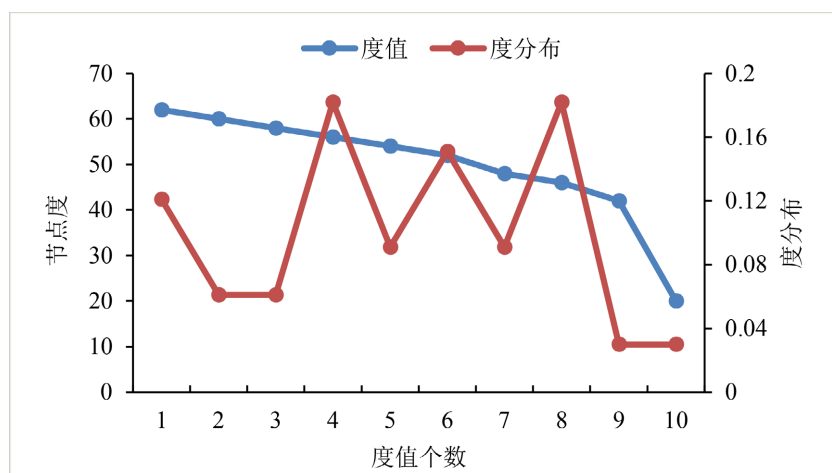
$$K_i = \sum_j^N a_{ij} \quad (1)$$

式中: K_i 表示节点度; N 表示节点城市数; i, j 表示任一节点; a_{ij} 表示节点城市 i 和 j 之间有无直达航班, $a_{ij} = 1$ 有直达, $a_{ij} = 0$ 无直达; 由于航空网络属于无向网络, 存在 $a_{ij} = a_{ji}$ 。

度分布用 $P(k)$ 表示, 即为网络中任意节点城市度数为 k 的概率, 利用 Pajek 软件计算节点城市度值及度分布, 计算结果降序排列如表 1 和图 2 所示。

Table 1. Degree and degree distribution of aviation network**表 1.** 航空网络度与度分布

序号	度值	节点个数	度分布
1	62	4	0.121
2	60	2	0.061
3	58	2	0.061
4	56	6	0.182
5	54	3	0.091
6	52	5	0.151
7	48	3	0.091
8	46	6	0.182
9	42	1	0.03
10	20	1	0.03

**Figure 2.** Aviation network degree and uniformity distribution map**图 2.** 航空网络节点城市度与度分布图

由上述计算结果可知, 航空网络的度值分布在 20 到 62 之间, 平均度值为 52.24, 度值在 52 及以上的约占 66.7%, 说明航空网络的连通性较好, 度值为 62 的城市分别是广州、成都、昆明、重庆这四个城市对网络的可靠性影响很大。若节点受到突发事件影响, 则网络的可靠性下降很快。

3.2. 平均路径长度

平均路径长度是航空网络中任意两个节点城市对之间的最短路径长度的平均值, 平均路径长度越短则航空网络效率越高。公式如下:

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i \geq j}^N d_{ij} \quad (2)$$

式中 L 表示平均路径长度; N 为节点城市总数; d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的最短路径长度。

在航空网络中平均路径长度为 1.83, 网络直径为 2 说明网络节点之间连接相对紧密, 旅客通常只需要乘坐 1 或 2 次航班即可抵达, 说明网络具有较好的可达性, 节省了旅客的出行时间。

3.3. 聚类系数

航空网络的聚类系数是指节点之间连接形成了许多紧密的群体, 表达了某一节点与其邻接节点的密切程度, 显示了该节点的局部凝聚能力, 再对全部节点的聚类系数进行求平均, 即可反映整体网络的聚类程度。聚类系数越大, 网络之间节点的连接越紧密。 C_i 表示节点 i 的聚类系数, 即 M 为实际连接数目与理论连接数目 $N(N-1)/2$ 的比值。计算公式为:

$$C_i = \frac{2M}{N(N-1)} \quad (3)$$

根据计算结果可知, 网络的局部聚类系数在 0.794 以上, 表明局部网络具有相对较高的群体凝聚力, 整体聚类系数约 0.839, 说明航空网络的整体连通性较好, 具有较高的聚集性, 网络可靠性也越高。

3.4. 介数中心性

介数中心性用来衡量节点在网络中起到桥梁作用的重要程度, 即该节点在网络中所有最短路上出现的频率, 一个节点的介数中心性越高, 越能体现其作为关键枢纽的战略地位。计算公式如下:

$$C_B(v) = \sum_{s \neq t \in V} \frac{g_{st}(v)}{g_{st}} \quad (4)$$

式中, g_{st} 为 s 到 t 的最短路径条数; $g_{st}(v)$ 为从 s 到 t 之间经过节点 v 的路径条数。

根据公式(4), 利用 Pajek 计算得出中介中心性如图 3 所示。

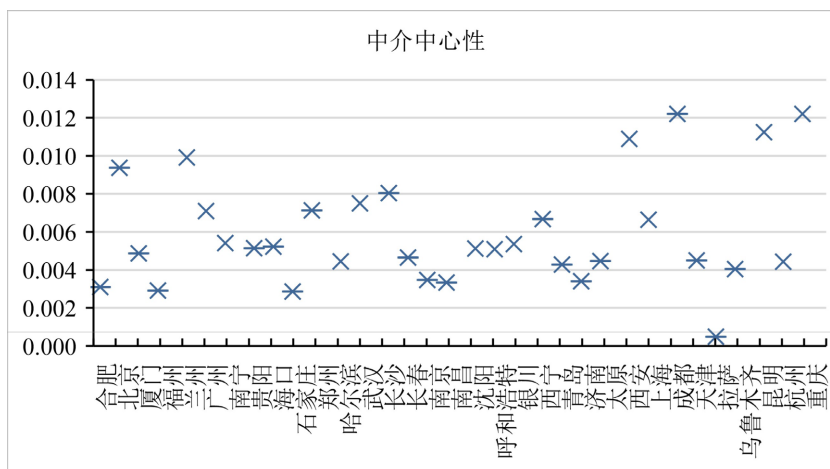


Figure 3. Air network node city intermediary centrality diagram

图 3. 航空网络节点城市中介中心性图

由图 3 可知, 北京、兰州、西安、成都、昆明、重庆的中介中心性较高, 它们在连接其他城市的过程中扮演者重要的角色, 拉萨的中介中心性相对与其他城市来说较低, 说明它作为桥梁节点的角色不太突出, 其他城市之间的航班连接很少需要通过它中转。

综上平均路径长度为 1.83, 聚类系数为 0.839, 说明构建的航空网络具有平均路径长度小且聚类系数高的小世界网络特性。方便后续网络关键节点确定以及节点失效研究, 来确保网络的稳定性和可靠性。

3.5. 准确性检验

通过对 4 个指标的计算, 了解到航空网络拓扑特征, 为保证计算的准确性和结果的科学性, 现对与

节点重要度呈正相关的指标度值、聚类系数、中介中心性进行加权平均计算, 然后依据计算结果, 对节点城市进行降序排名, 按照排名结果与下文中关键节点排名即两个排名集合进行比较, 本文通过计算 Jaccard 系数来确定二者的相似度。通常, Jaccard 系数在 0 到 1 之间, 数值越接近 1, 表示排名越一致, 通过 Python 计算得知 Jaccard 系数约为 0.941, 说明排名相似程度高和指标计算结果准确且为下文关键节点的选取提供支撑。

4. 航空网络可靠性分析

航空网络的可靠性是指网络在面临各种内部和外部扰动时, 能够维持预定服务水平的能力。这包括在正常运营条件下的稳定性和在极端情况或危机时的恢复能力。航空网络的可靠性对乘客、航空公司、机场和其他利益相关者都至关重要。

4.1. 可靠性测度指标选取

(1) 网络全局效率

可靠性是当遇到突发情况时, 网络受到影响后整体连通性的变化, 可靠性越强对网络产生的影响越小, 全局网络效率 E 可以用来衡量其连通性, 当航空网络中某个或某些节点失效时, 网络的全局效率会下降, 通过计算节点失效前后的全局网络效率可以评估网络的可靠性。计算公式如下:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (5)$$

式中, E 表示网络全局效率且取值在 0 到 1 之间; N 为节点城市数; d_{ij} 为节点城市之间的路径长度。

(2) 最大连通子图相对大小

航空网络在受到攻击时, 节点失效导致网络分散成许多子网络而子网络中的节点数与整体网络中的节点数的比例即为最大联通子图相对大小。计算公式如下:

$$S = \frac{N'}{N} \quad (6)$$

式中, S 表示最大连通子图相对大小; N' 表示节点失效后网络中最大连通图的节点数; N 表示整体网络的节点数。

4.2. 网络关键节点确定

度值、聚类系数、中介中心性这三个指标均可作为关键节点选取的依据, 但是由计算结果可知这些指标中出现了数值相同的节点城市, 由于本文采用单节点攻击, 为了避免对仿真结果的影响, 通过选取节点城市的飞机起降架次来度量网络中节点的重要性, 将结果按降序排列如表 2 所示。

Table 2. Node city importance ranking

表 2. 节点城市重要度排名

序号	城市	起降架次(架次)	序号	城市	起降架次(架次)
1	北京	2,906,489	18	哈尔滨	147,907
2	上海	700,680	19	贵阳	144,024
3	成都	538,269	20	天津	143,851
4	广州	456,104	21	济南	136,731
5	昆明	318,586	22	兰州	120,711

续表

6	重庆	315,990	23	长春	114,212
7	西安	310,547	24	南宁	110,168
8	杭州	300,361	25	呼和浩特	105,280
9	南京	222,487	26	太原	102,372
10	武汉	206,440	27	福州	100,102
11	长沙	201,880	28	合肥	96,721
12	郑州	200,933	29	南昌	87,995
13	厦门	179,518	30	石家庄	76,666
14	乌鲁木齐	176,801	31	银川	65,286
15	海口	172,454	32	西宁	62,255
16	青岛	170,815	33	拉萨	44,908
17	沈阳	152,522			

4.3. 可靠性实证分析

(1) 攻击策略

对航空网络的仿真采用两种攻击策略分别是随机攻击和蓄意攻击，随机攻击则是对网络中的节点城市进行随机节点失效策略，节点失效方式为单次累计失效和多节点累计失效，单次则每次删除一个节点，多节点即每次删除 3 个节点，通过观察每次节点失效后网络连通性的变化情况来分析网络可靠性。蓄意攻击则是按照关键节点城市降序的排名分别先后进行节点失效，同样观察网络每次连通性的变化。设初始网络连通性为 100%，当网络的全局效率及最大连通子图相对下降到 50% 时，则认为是网络崩溃的临界点。通过采用这两种攻击策略来分析网络的可靠性。

(2) 仿真结果分析

通过 Python 得出单节点攻击下，网络效率与最大连通子图相对大小的变化情况如图 4 和图 5 所示。

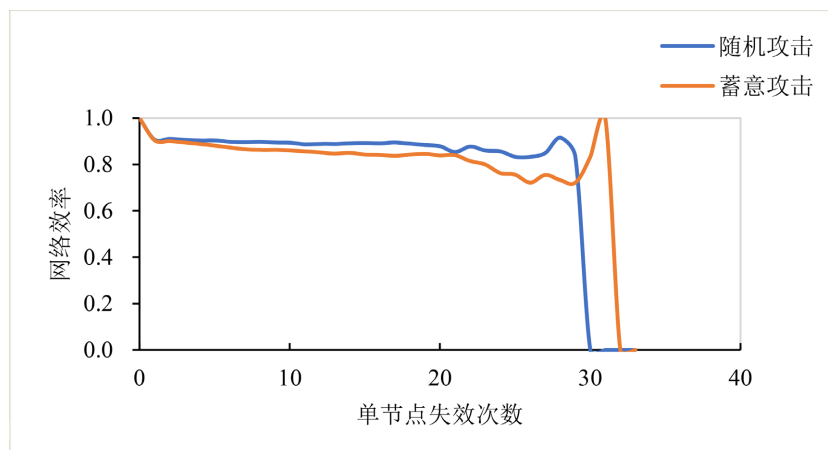


Figure 4. Efficiency change of single node network

图 4. 单节点网络效率变化情况

由上图可知，在随机攻击和蓄意攻击两种策略下，每次删除一个节点使其失效，航空网络的网络效率变化有明显区别，蓄意攻击比随机攻击时网络效率下降的更快，在删除到第 30 个节点前随机攻击下的

网络效率高于蓄意攻击, 此时网络效率均大于 50%, 并未崩溃。而最大连通子图相对大小在两种策略攻击下网络变化情况基本没有区别, 在移除第 17 个节点时, 网络连通性为 48.5% 处于崩溃状态。

多节点攻击下网络效率与最大连通子图相对大小变化情况如图 6 和图 7 所示。

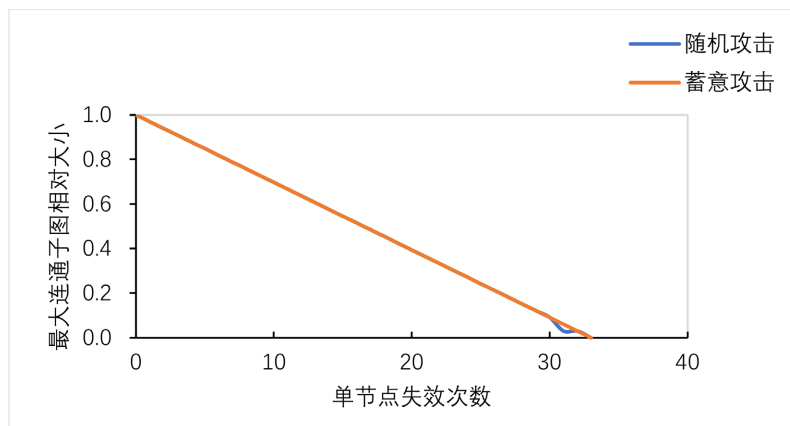


Figure 5. The maximum connected subgraph relative size of a single node

图 5. 单节点最大连通子图相对大小变化情况

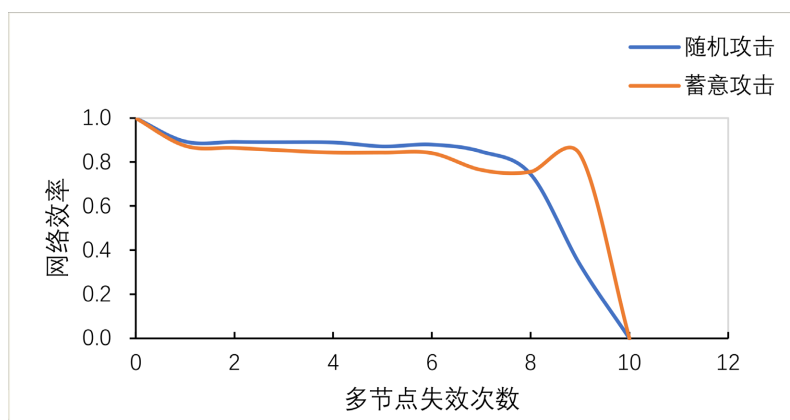


Figure 6. Efficiency change of multi-node network

图 6. 多节点网络效率变化情况

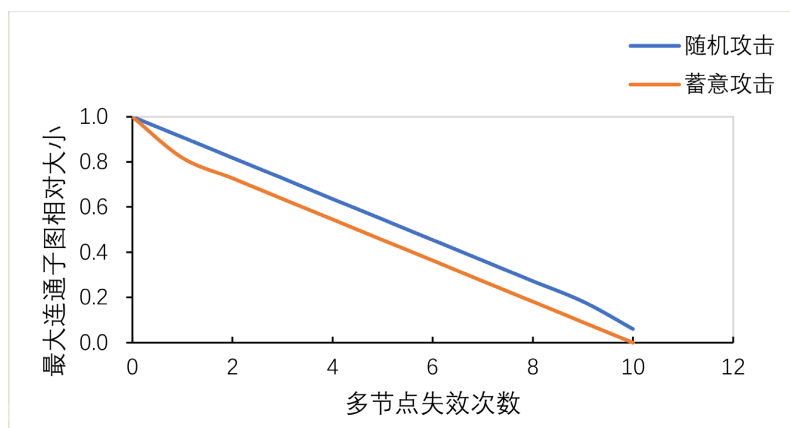


Figure 7. The maximum connected subgraph relative size of multi-node

图 7. 多节点最大连通子图相对大小变化情况

由上图可知, 在随机和蓄意攻击下, 每次同时攻击 3 个节点, 网络连通性在随机攻击下下降缓慢, 网络效率在节点失效 8 次后依旧处于 74.4% 和 75.6%, 而最大连通子图相对大小在第 5 次节点失效后蓄意攻击下网络处于崩溃状态。

综上所述, 航空网络的连通性在随机攻击下强于蓄意攻击, 表现的更为可靠, 且单节点与多节点方式在删除节点数相同时, 不管是随机攻击还是蓄意攻击网络连通性总是单节点强于多节点, 多节点攻击网络脆弱性较高。

5. 研究结论

(1) 通过 UCINET 构建网络图并利用 Pajek 计算网络拓扑指标。结果表明, 航空网络显示了较高的可靠性和良好的整体连通性, 同时具备平均路径长度短, 聚类系数高的小世界网络特性, 能够有效的应对局部故障。关键节点城市如北京、兰州、西安、成都、昆明、重庆对网络的可靠性具有重要影响, 因此应重点加强该节点机场日常运营维护, 确保其稳定运行。

(2) 通过模拟随机和蓄意两种策略的攻击实验, 分别采用单节点和多节点删除方式进行分析网络连通性变化, 发现网络的连通性随着攻击节点数的增加而显著下降, 网络崩溃速度加快。这强调了网络在面对攻击时的脆弱性, 尤其是在蓄意攻击的情况下, 随机攻击相较于蓄意攻击对网络稳定性影响较小。说明航空网络对随机故障的抵抗能力更强。

(3) 在构建网络时没有考虑网络连边权重, 仿真模拟也未分析连边的可靠性。这些不足可能导致对网络特性的估计不够准确。未来研究中, 应进一步探讨连边权重和连边可靠性对网络性能的影响, 以实现航空网络的更全面理解。

参考文献

- [1] 吕伟, 刘钰阁, 汪京辉. 考虑班机流量和场站距离的效率加权航空网络研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(11): 29-33.
- [2] 王鹏宇. 基于复杂网络的空铁复合网络鲁棒性分析及优化[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2023. <https://doi.org/10.26990/d.cnki.gsltc.2023.000107>
- [3] 张文文. 基于复杂网络的中国航空网络结构特征及演变研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 长江大学, 2023. <https://doi.org/10.26981/d.cnki.gjhsc.2023.000850>
- [4] 汪倩倩. 重大公共卫生灾害下航空-高铁双层复杂网络脆弱性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2023. <https://doi.org/10.26976/d.cnki.gchau.2023.000944>
- [5] 杜欣茹. 考虑边失效的航空冷链运输可靠性网络设计[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2022. <https://doi.org/10.26989/d.cnki.gdlhu.2022.001190>
- [6] 冯骁. 极端事件下高铁航空运输网络脆弱性识别及改善理论研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021. <https://doi.org/10.26944/d.cnki.gbifu.2021.000223>
- [7] 杜方叶, 王姣娥, 王涵. 新冠疫情对中国国际航空网络连通性的影响及空间差异[J]. 热带地理, 2020, 40(3): 386-395. <https://doi.org/10.13284/j.cnki.rddl.003248>
- [8] 吕文红, 王国娟, 王鹏飞. 基于复杂网络的交通运输网络可靠性研究进展[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(24): 26-33.
- [9] 蒲亚琼. 中国民用货运航空网络演化分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019. <https://doi.org/10.27324/d.cnki.gshkc.2019.000253>
- [10] 张豫翔, 吴明功, 温祥西, 等. 边攻击下的航线网络抗毁性测度[J]. 电光与控制, 2017, 24(9): 64-68.
- [11] 孙书霞. 中国航空运输网络拓扑性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国民用航空飞行学院, 2016.
- [12] 陈娱, 王姣娥, 金凤君. 中国国内航空网络的可靠性评价[J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(3): 59-64+2.
- [13] 王俊超, 殷志远, 冯光柳. 复杂网络特性及可靠性分析——以中国航空网为例[J]. 微型电脑应用, 2013, 29(11): 13-16.