文章编号:1005-0523(2025)03-0067-10

多机场终端区航线网络抗毁性分析

彭 瑛[1,2],叶文婕[1,2],王婷婷[1,2],程延松[3]

(1. 南京航空航天大学民航学院,江苏 南京 211106; 2. 南京航空航天大学空中交通管理系统全国重点实验室,
江苏 南京 211106;3. 中国民用航空局第二研究所,四川 成都 610041)

摘要:文章以广州终端区与珠海终端区为例,运用复杂网络方法,分别构建广州终端区航线网络模型与珠海终端区航线网络模型。通过节点度、度分布、介数中心性、聚集系数、网络直径和平均路径长度等指标对网络的拓扑结构进行详细分析。在此基础上,利用度中心性、介数中心性和KBKNR算法识别节点重要程度,并设计随机攻击和蓄意攻击两种情景,以网络效率和网络连通度作为表征指标评估航线网络的抗毁性。实验结果表明:在随机攻击下,珠海终端区航线网络相较于广州终端区航线网络表现出更强的抗毁性;在蓄意攻击下,广州终端区航线网络的抗毁性更强;此外,相较于介数排序攻击和KBKNR排序攻击,度排序攻击更容易导致网络崩溃,应优先将度中心性高的节点作为关键节点进行保护。

关键词:终端区航线网络;拓扑结构;节点重要性;抗毁性

中图分类号:V355;[U8] **文献标志码:**A

本文引用格式:彭瑛,叶文婕,王婷婷,等. 多机场终端区航线网络抗毁性分析[J]. 华东交通大学学报,2025,42(3):67-76.

Resilience Analysis of Multi-Airport Terminal Area Route Networks

Peng Ying[1,2], Ye Wenjie[1,2], Wang Tingting[1,2], Cheng Yansong[3]

(1. College of Civil Aviation,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 211106, China;
2. State Key Laboratory of Air Traffic Management System, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing Jiangsu 210006, China; 3. The Second Research Institute of CAAC, Sichuan Chengdu 610041, China)

Abstract: This study uses the Guangzhou terminal area and the Zhuhai terminal area as examples, applying complex network methods to construct route network models for each. The network topology is analyzed in detail using indicators such as node degree, degree distribution, betweenness centrality, clustering coefficient, network diameter, and average path length. Based on this analysis, node importance is identified using degree centrality, betweenness centrality, and the KBKNR algorithm. Additionally, scenarios of random attacks and deliberate destruction are designed, and network efficiency and connectivity are used as metrics to evaluate the resilience of the route networks.The experimental results show that under random attacks, the Zhuhai terminal air route network demonstrates greater resilience compared to the Guangzhou terminal air route network. Conversely, under intentional attacks, the Guangzhou terminal air route network exhibits stronger resilience. Moreover, degree centrality attacks are more likely to cause network collapse compared to betweenness centrality attacks and KBKNR attacks, indicating that nodes with high degree centrality should be prioritized for protection as critical nodes.

收稿日期:2024-07-03

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB2602401);南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划资助项目(xcxjh20230709)

Key words: terminal area route network; topological structure; node importance; resilience
Citation format: PENG Y, YE W J, WANG T T, et al. Resilience analysis of multi-airport terminal area route networks[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(3): 67−76.

机场终端区是机场运营的核心部分,负责管理进离港航班,确保其安全、高效地起飞和降落。终端区内的进离港航线形成一个复杂的网络结构,这种网络由多个节点和边组成,其中节点代表航路点,边代表航空器在这些节点之间的飞行路径。随着航线网络规模的逐渐扩大,节点之间的联系愈加紧密,线路故障、蓄意破坏等突发事件极有可能导致节点失效甚至网络瘫痪。因此,研究终端区航线网络的拓扑结构与抗毁性,对提高终端区网络的稳定性和运行效率具有重要意义。

目前国内外学者对网络特性及抗毁性进行了大量研究。在网络特性方面,大量研究发现我国航空网络具有小世界、无标度特性[1-5];在抗毁性分析方面,Albert等[6]最早结合网络的拓扑结构研究其抗毁性;Qi等[7]对不同领域的抗毁性概念进行解构,将评估抗毁性的方法分为定性和定量测量,为网络抗毁性的测量和评价提供了详细的方法框架;Zhang等[8]通过仿真实现了多场景下不同策略的无人机抗毁性评估;孔建国等[9]采取随机攻击、度中心性、中介中心性和接近中心性等策略,量化对比西南地区管制扇区网络在不同攻击策略下的抗毁性变化;Liang等[10]基于复杂网络理论研究了空域扇区网络的特征及其抗毁性,表明网络的抗毁性随攻击策略的不同而变化。

在航空运输网络方面,曾小舟等[11]率先对航空网络的抗毁性进行研究,基于节点度值大小对机场进行蓄意攻击,进而评判不同机场对网络稳定性的影响;Lordan等[12]通过比较低成本航空公司与全服务航空公司,证明前者的网络更为稳定;Yang等[13]针对春节期间形成的航空运输网络,研究该网络在面对各种故意攻击策略时网络的抗毁性变化。此后,学者们开始从随机攻击和蓄意攻击两个方面分析航空网络的抗毁性[14-19],并提出了相应的优化策略。

综上所述,大多数学者的研究集中在机场网络、航空网络以及空域扇区网络的抗毁性方面。关于多机场终端区航线网络抗毁性的研究较为缺乏。此外,学者们在研究中往往忽略了节点在蓄意攻击情境下的重要性。针对以上不足,本文选取了珠三角机场群中的4个机场,构建了广州终端区与珠海终端区航线网络模型[20],从节点的近邻、全局路径以及网络位置3个角度分析了节点的重要程度,设计了3种不同的蓄意攻击方式,并对比分析了两个网络在随机攻击和蓄意攻击下的抗毁性。本研究为多机场终端区航线网络的关键点识别和未来规划提供参考依据。

1 多机场终端区航线网络模型

正常状态下,航空器在终端区内飞行时遵循固定的路径,因此本文以终端区内的航路点和进离港航线为基础,构建网络模型。定义多机场终端区航线网络为 G ,其表达式为 $G=(V,E)$ 。其中:$V=\{v_i,i\in N\}$ 为网络 G 的节点集,代表终端区内的航路点,N为网络总结点数; $E=\{e_{ij},i\neq j,i,j\in N\}$ 为网络 G 的连边集,代表航空器在终端区内的飞行路径,其中 $e_{ij}=(v_i,v_j)$,表明边为有向边。

2 网络拓扑结构及抗毁性分析

2.1 网络的拓扑结构指标

从节点度、度分布、介数中心性、网络直径、平均路径长度、平均聚集系数[21]等方面对终端区航线网络的拓扑结构进行分析。拓扑结构在一定程度上也能反映网络的抗毁性。

2.1.1 节点度与度分布

节点的度 k_i 是指与节点 i 直接相连的所有边的数量。一般情况下,节点度值大小与该节点对网络的影响程度呈正相关。网络的平均度 $\bar{k}$ 表示网络中节点之间的连通程度。节点的度分布 $P(k)$ 是指任意一个节点的度为 k 的概率,其中 k 为正整数。

2.1.2 节点的介数中心性

节点 i 的介数中心性 $C_B(i)$ 表示该节点在最短路径上被经过的次数占最短路径数的比例,反映了

该节点在网络中与其他节点的衔接程度,节点 i 的介数中心性计算式如下

$$C_B(i)=\frac{1}{(N-1)(N-2)}\sum_{i\neq j\neq s}\frac{g_{js}(i)}{g_{js}} \tag{1}$$

式中：$g_{js}(i)$ 为节点 j 与节点 s 之间的最短路径经过节点 i 的数量；g_{js} 为节点 j 与节点 s 之间的最短路径数量。

2.1.3　网络直径和平均路径长度

网络直径 D 为网络中任意两节点间最短路径的最大边数,平均路径长度 L 为网络中任意两节点间距离的平均值。通常情况下,平均路径越短,节点连接越紧密。L 的计算式如下

$$L=\frac{2}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}d_{ij} \tag{2}$$

式中：d_{ij} 为节点 i，j 之间的距离。

2.1.4　聚集系数

网络的聚集系数 C 为整个网络的聚集系数用于衡量网络中节点之间连接的紧密程度。计算式如下

$$C=\frac{C_i}{N},C_i=\frac{2N_i}{k_i(k_i-1)} \tag{3}$$

式中：N_i 为与节点 i 相邻节点之间实际相连的边数；k_i 为节点 i 的度值；C_i 为节点 i 的聚集系数。

2.2　网络的抗毁性分析方法

终端区网络通常处于正常运行状态,但在突发事件如恶劣天气、航空器损坏、设备故障或蓄意破坏的情况下,可能会导致节点失效甚至网络瘫痪当终端区网络受到外部干扰或内部结构变化时,其维持正常运行的能力称为终端区网络的抗毁性。

2.2.1　抗毁性分析表征指标

本文选取网络效率和网络连通度两个指标对终端区网络的抗毁性进行分析,基于这两个指标定义网络瘫痪。

1）网络效率E。E反映了节点间的连通性和传输效率,计算式为

$$E=\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}\frac{1}{d_{ij}} \tag{4}$$

2）网络连通度 S。定义 S 为最大连通子图比例,网络连通度可以反映网络受攻击前后其拓扑结构变化和受损程度,计算式为

$$S=\frac{N'}{N} \tag{5}$$

式中：N' 为网络受到攻击后最大连通子图的节点数量。由于终端区网络为全连通,不存在单个或不连通的节点,故初始网络连通度为1。

3）网络瘫痪。当网络效率下降到初始值的15%以下,同时网络连通度下降到初始值的20%以下,网络即被认为处于瘫痪状态。

2.2.2　网络攻击策略

复杂网络通常面临两种危机:随机攻击和蓄意攻击。随机攻击是指网络中的节点以一定概率被随机破坏;蓄意攻击是指节点按照不同重要度从高到低依次失效。本文的攻击策略如图1所示。

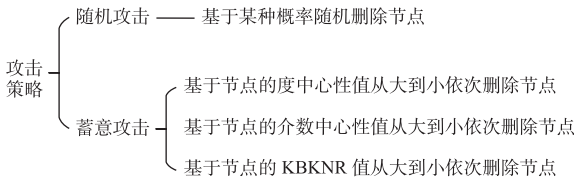


图1　终端区航线网络攻击策略

Fig. 1　Attack strategies for terminal air route networks

1）随机攻击:随机删除网络中的点;

2）度排序攻击:按照网络中节点的度中心性大小排序依次删除节点;

3）介数排序攻击:按照网络中节点的介数中心性大小排序依次删除节点;

4）改进K-shell(KBKNR)算法排序攻击:考虑网络分层、邻居节点和次邻居节点3个角度,在K-shell算法的基础上对其进行改进[22-24],计算各个节点的壳值 k_s，根据节点的综合度 Z_i 得到最终排序。综合度计算方式为

$$\begin{aligned}&Z_i=k_i+\mu_i\times d_i\\&\mu_i=\frac{k_i}{n_i},d_i=n_i-k_i\end{aligned} \tag{6}$$

式中：n_i 为节点 i 两步领域内连接的节点数；μ_i，d_i 为中间变量。

2.2.3　抗毁性分析步骤

终端区航线网络抗毁性分析包括3个步骤。

1）选择网络攻击策略。对网络进行随机攻击和蓄意攻击失效处理。

2）计算抗毁性分析表征指标。计算不同攻击策略下的网络效率和网络连通度,进而判断网络何时瘫痪。

3）网络抗毁性分析与评估。分析网络在不同攻击策略下以及不同网络在同一攻击策略下表征指标的变化趋势,以评估终端区航线网络的抗

毁性。

3 实例分析

珠三角机场群共有7个机场，表1呈现了2023年该机场群中各机场的旅客吞吐量和飞机起降量。

表1 2023年珠三角机场群各机场航班数据统计
Tab.1 Statistics of flight data for Pearl River Delta various airports in 2023

机场名称	旅客吞吐量/万人次	飞机起降量/架次
香港机场	3 950	276 000
澳门机场	515	42 504
广州白云机场	6 317	456 100
惠州平潭机场	261	21 190
珠海金湾机场	1 146	87 400
深圳宝安机场	5 273	393 100
佛山机场	107	8 093

图2展示了广州终端区与珠海终端区空域结构，其中包含进港点、离港点以及各机场的相对位置关系等信息。广州白云机场隶属于广州终端区，而深圳宝安机场、珠海金湾机场和惠州平潭机场则隶属于珠海终端区。这两个终端区地理位置相邻，各自的总吞吐量级别类似，但广州终端区以广州白云机场为主，珠海终端区有3个机场互相影响，同时

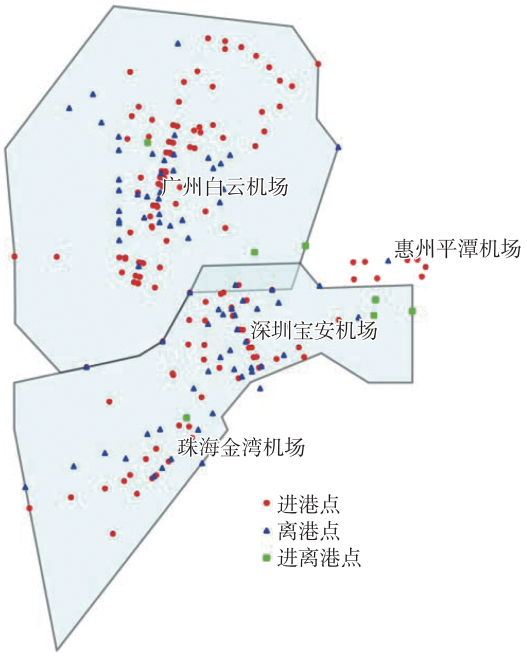


图2 广州与珠海进近终端区空域结构
Fig. 2 Airspace structure of the Guangzhou and Zhuhai terminal control areas

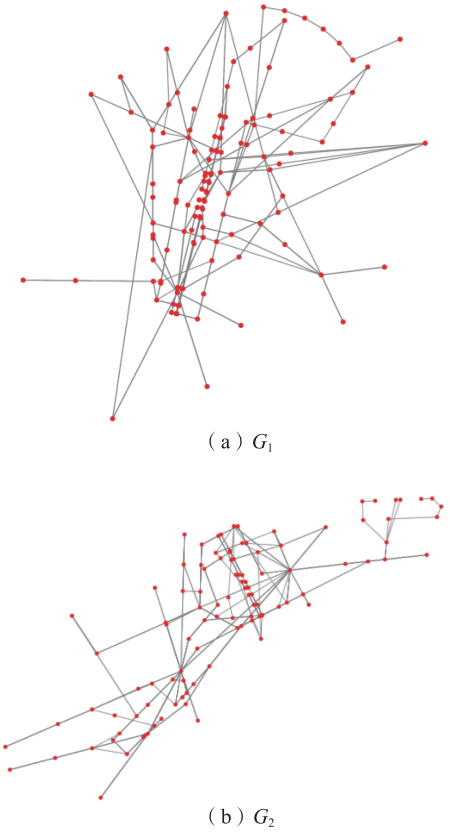
广州白云机场与深圳宝安机场、深圳宝安机场与香港机场、珠海金湾机场与澳门机场之间也存在共用部分空域的情况。基于这些特点，本文选取广州终端区与珠海终端区进行网络结构与抗毁性的分析。

3.1 终端区航线网络拓扑图

本文根据广州终端区和珠海终端区进离港航线数据，应用Python编程软件、NAIP和NetworkX库，纵向对比分析广州终端区航线网络与珠海终端区航线网络的拓扑结构和抗毁性。

首先，参照前文介绍的建模方法，构建广州终端区航线网络 G_1，珠海终端区航线网络 G_2；其次，对比分析两个网络的拓扑结构；最后，对比分析随机攻击和蓄意攻击下网络的抗毁性。

G_1 和 G_2 的拓扑结构如图3所示。G_1 共有124个节点，160条边；G_2 共有107个节点，141条边。与 G_2 相比，G_1 的内部结构更加复杂。这是由广州白云机场本身地理位置优越所决定，该机场航线覆盖范围广，并且作为主要的枢纽机场，负责大量的中转航班和联程航班，因此其终端区航线网络相较



（a）G_1

（b）G_2

图3 网络拓扑结构
Fig. 3 Network topology

于珠海终端区航线网络会更为复杂。

3.2　网络拓扑结构分析

3.2.1　节点度与度分布

G_1网络平均度为2.58，G_2网络平均度为2.64，即平均每一个节点与其他2个节点相连接。从图4可以看出，无论是广州终端区还是珠海终端区，节点度值为2的节点在网络中占比较高，这表明两个终端区的多数航路点均与两个其他航路点相连，构成了基本的网络结构。其中，广州终端区航线网络中少部分节点度值为9和12，这些节点具有较高的通达性，能够直接连接到网络中的许多其他节点，因此可以将其视为网络中的关键节点；同理，珠海终端区航线网络中也存在一些度值较高的节点，甚至有部分节点的度值高达15，可以看出这些节点对整个网络也至关重要。

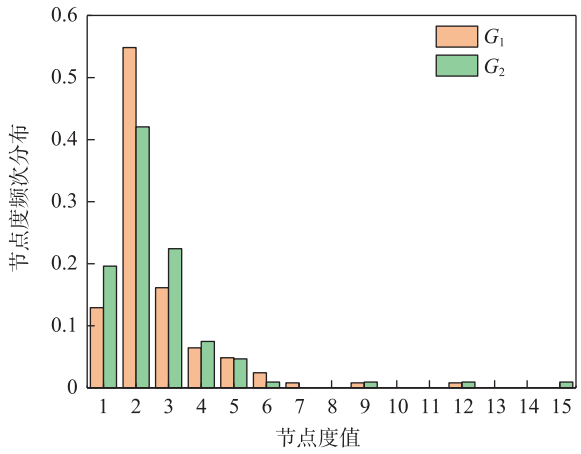


图4　节点度频次分布

Fig. 4　The frequency distribution of node degrees

通过对比分析可以看出，虽然两个网络的平均度接近，但珠海终端区航线网络的部分节点连接性更强，这种差异可能会影响两个终端区在应对突发事件和流量高峰时的表现，在后续网络抗毁性的研究中会进一步体现出来。

3.2.2　节点的介数中心性

图5为G_1，G_2网络中各节点介数中心性分布情况。

在广州终端区航线网络和珠海终端区航线网络中，大部分节点的介数中心性集中在[0，0.01]，占比超过80%，高介数中心性值的节点比例较低，且节点的介数中心性值相差较大，表明网络的脆弱性较明显。在广州终端区航线网络中，大部分节点的介数中心性较低，网络结构较为集中。网络的稳定性可能依赖于少数高介数中心性的节点，这些节点如果失效，可能会对网络造成较大的影响。相比之下，珠海终端区航线网络不仅存在高介数中心性的节点，而且在中低介数中心性区间也有更多的节点分布，这表明其网络结构相对更分散和均衡，在应对节点失效或攻击时具备更好的抗毁性。

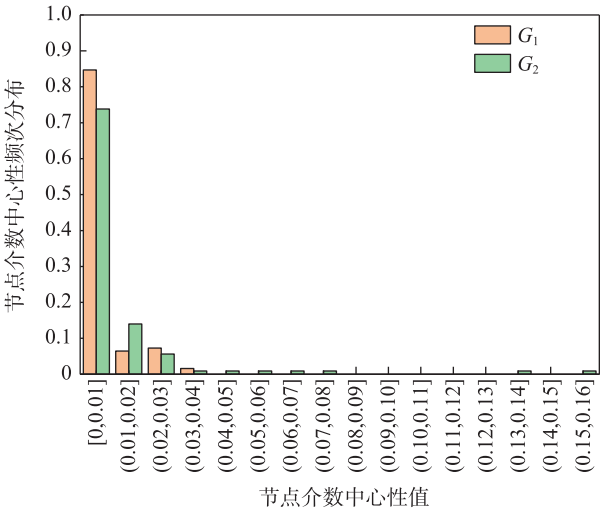


图5　节点介数中心性频次分布

Fig. 5　The frequency distribution of node betweenness centrality

3.2.3　聚集系数

经计算得到G_1网络的平均聚集系数为0.044，G_2网络的平均聚集系数为0.041，两个网络的平均聚集系数都较低。从网络结构上看，两个网络均未形成大量紧密连接的小集群，网络更注重全局连通性而非局部紧密连接；从平均聚集系数的角度来看，低聚集系数的网络通常局部冗余较少，整体连通性更多依赖于网络中的关键节点，因此在关键节点受到攻击时，网络更容易崩溃。

此外，广州终端区航线网络的平均聚集系数略高于珠海终端区航线网络，尽管差异不大，但这表明在广州终端区航线网络中存在某些节点之间有更多的局部连接，节点之间的连接更加紧密。这种微小的差异可能是由于广州终端区航线网络在某些区域有更密集的航班调度需求所致。

3.2.4　网络直径和平均路径长度

G_1网络直径$D_1=21$，即在广州终端区航线网络中，距离最远的两个航路点之间需要经过21个航路点，平均路径长度$L_1=7.81$，表明网络中任意两

个航路点之间的连接需要经过7个航路点；G_2网络直径$D_2=12$，即在珠海终端区航线网络中，距离最远的两个航路点之间需要经过12个节点，平均路径长度$L_2=5.088$，表明网络中任意两个航路点之间的连接需要经过5个航路点。

从网络直径和平均路径长度可以看出，广州终端区航线网络直径较大，平均路径长度较长，表明节点之间的连接效率相对较低，信息传递和资源分配需要经过更多的中间节点，整体效率较低。然而，这种结构在应对局部节点失效时表现出更好的灵活性和抗毁性；相比之下，珠海终端区航线网络直径和平均路径长度均较小，表明节点之间的连接更为紧密，信息传递效率更高。但这意味着网络对关键节点的依赖性更大，需要特别关注这些节点，以确保网络在高负载或故障情况下的稳定性。

3.3 网络抗毁性分析

3.3.1 蓄意攻击

在对网络进行蓄意攻击时，本文使用了度排序攻击、介数排序攻击以及KBKNR排序攻击这3种方式。

度排序攻击基于节点的度中心性，通过移除网络中度中心性高的节点，评估网络在关键连接点被破坏时的脆弱性，这种攻击方式能快速识别和移除对网络整体结构影响最大的节点。介数排序攻击基于节点的介数中心性，由于介数中心性高的节点在信息流通中起重要桥梁作用，因此这种攻击方式能揭示和移除对信息传递和流通影响最大的节点。KBKNR排序攻击基于改进的K-shell算法，通过考虑节点在网络中的层级结构及其邻居节点的特性来识别和攻击关键节点，KBKNR排序攻击能综合评估节点的重要性，识别和移除对网络核心结构影响最大的节点。初始网络状态下不同方法得到的节点重要度排序如表2、表3所示。

由表2、表3可知，在广州终端区航线网络中，按照度排序、介数排序和KBKNR排序得到的节点重要性排序差异较大，但TAN和GG423这2个航路点在3种排序方式下排名均靠前，可以初步判断这两个节点是网络的关键节点；在珠海进近终端区航线网络中，3种排序方式下得到的节点重要性排序较为一致，可以初步推断GLN、ZUH、NLG和VIPAP这4个航路点为网络的关键节点，在对这几个节点进行攻击时网络效率和连通度可能会出现较大变化。

表2 广州终端区航线网络节点重要性排序

Tab.2 Node importance ordering in Guangzhou terminal air route network

重要性	度排序	介数排序	KBKNR排序
第1	TAN	GG423	TAN
第2	POU	GG408	GG412
第3	SHL	TAN	GG512
第4	GG412	GG410	GG594
第5	GG594	GG424	GG513
第6	GG423	GG594	GG423
第7	GG512	GG421	CON
第8	CON	GG409	GG410
第9	GG426	SHL	GG521
第10	GG424	GG427	GG431

表3 珠海终端区航线网络节点重要性排序

Tab.3 Node importance ordering in Zhuhai terminal air route network

重要性	度排序	介数排序	KBKNR排序
第1	GLN	GLN	GLN
第2	ZUH	ZUH	ZUH
第3	VIPAP	NLG	VIPAP
第4	NLG	VIPAP	SZ003
第5	HZ401	SD415	SZ102
第6	GURIN	KEVAR	HZ401
第7	MIPAG	SZ113	NLG
第8	SZ003	SZ152	GURIN
第9	SZ102	SZ003	SZ101
第10	SD418	SZ153	SZ005

图6展示了TAN和GG423两个航路点在广州终端区航线网络中的具体位置，图7展示了GLN、ZUH、NLG和VIPAP 4个航路点在珠海终端区航线网络中的具体位置。

根据图6、图7以及飞行计划数据中航班的计划航路信息可知：在广州终端区航线网络中，TAN和GG423位于网络的核心位置，分别连接了多条航线，作为枢纽点显著增强了整个网络的稳健性和可靠性。在珠海进近终端区航线网络中，ZUH位于核心位置，连接了多条航线，发挥了重要作用；GLN主要负责长距离航线的连接，在延伸网络覆盖范围方面至关重要；NLG作为次级枢纽，增强了区域内航线的灵活性；尽管VIPAP连接的航线较少，但其在延伸网络范围和覆盖远距离航线方面具有一定的重要性。

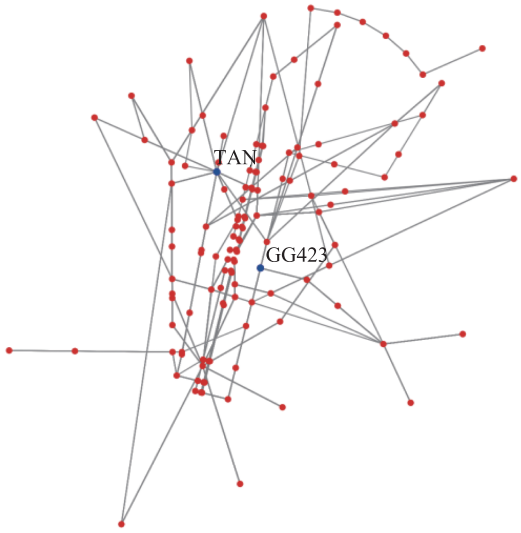


图6　广州终端区航线网络重要节点

Fig. 6　Important nodes in the Guangzhou terminal area route network

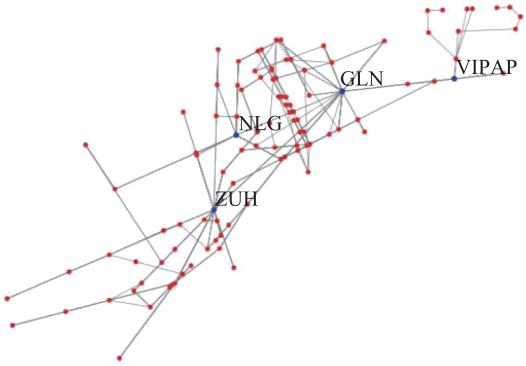


图7　珠海终端区航线网络重要节点

Fig. 7　Important nodes in the Zhuhai terminal area route network

结合表2、表3中节点的重要程度排序以及它们在网络中的位置可知，这些节点是网络中的关键节点，在不同位置和层级上对整个网络的连通性和稳定性起到了关键作用。

在蓄意攻击下，G_1，G_2网络效率和网络连通度分别如图8、图9所示。

由图8、图9可知，随着节点删除数量的增加，网络效率和网络连通度均呈下降趋势。对于广州终端区航线网络，在度排序攻击下，网络效率和网络连通度的下降速率最快。删除TAN、POU、SHL这3个节点后，网络效率和网络连通度均降至初始值的一半。根据表2可知，这3个节点的度中心性值居于前列，表明它们在网络中连接了大量其他节

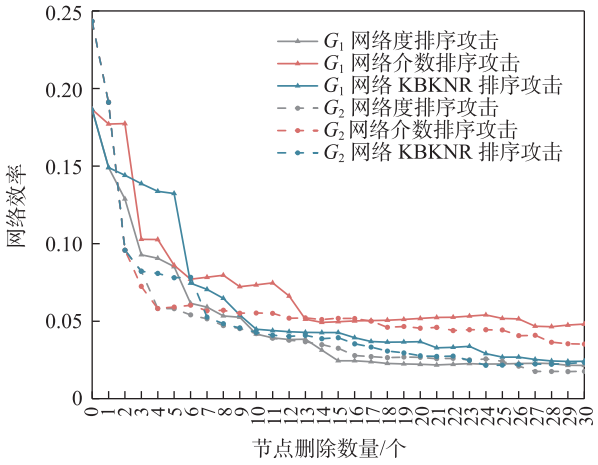


图8　度排序、介数排序和KBKNR排序攻击下网络效率

Fig. 8　Network efficiency under degree centrality, betweenness centrality,and KBKNR ordering attacks

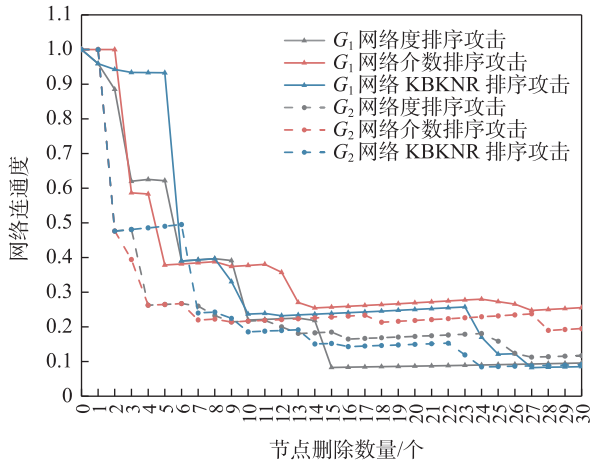


图9　度排序、介数排序和KBKNR排序攻击下的网络连通度

Fig. 9　Network connectivity under degree centrality, betweenness centrality, and KBKNR ordering attacks

点。因此，删除这3个节点会导致网络效率和连通度显著下降。在KBKNR排序攻击下，删除到第6个节点GG423后，网络效率和网络连通度发生大幅下降，随后曲线变化趋于平缓，这是由于GG423是网络的关键节点。由此可见，删除网络中的关键节点更容易导致网络崩溃，应优先对这些节点进行保护。

对于珠海终端区航线网络而言，3种攻击方式下，删除前4个节点后，网络效率和网络连通度均发生了显著变化。此后，在度排序攻击和介数排序攻击下，网络效率和网络连通度的变化趋于平缓，没有出现显著下降；然而，在KBKNR排序攻击下，累

计删除7个节点后,网络效率和网络连通度再次波动,随后下降趋于平缓。此外,删除30个节点后,介数排序攻击下的网络效率和连通度值要高于度排序攻击和KBKNR排序攻击,表明珠海终端区航线网络在介数排序攻击下具有更强的抗毁性。

表4和表5分别展示了广州和珠海终端区航线网络在不同攻击方式下遭受不同次数攻击后网络瘫痪时对应的网络效率和网络连通度值。当网络效率下降到初始值的15%以下,并且网络连通度下降到初始值的20%以下时,网络处于瘫痪状态。

表4 广州终端区航线网络的网络效率与网络连通度

Tab. 4 Network efficiency and network connectivity of the Guangzhou terminal area route network

攻击方式	网络效率	网络连通度
无攻击	0.187	1.000
17次度排序攻击	0.023	0.084
27次KBKNR排序攻击	0.025	0.082
30次介数排序攻击	0.048	0.252

表5 珠海终端区航线网络的网络效率与网络连通度

Tab.5 Network efficiency and network connectivity of the Zhuhai terminal area route network

攻击方式	网络效率	网络连通度
无攻击	0.243	1.000
14次度排序攻击	0.034	0.182
18次KBKNR排序攻击	0.031	0.146
30次介数排序攻击	0.035	0.192

由表4、表5可得:在度排序攻击下,广州终端区航线网络在遭受17次破坏后几乎完全失效,而珠海终端区航线网络在遭受14次破坏后网络已经处于瘫痪状态;在KBKNR排序攻击下,广州终端区航线网络在遭受27次破坏后几乎完全失效,而珠海终端区航线网络在遭受18次破坏后网络已处于瘫痪状态;在介数排序攻击下,广州终端区航线网络在遭受30次破坏后,网络仍保持一定的连通度,而珠海终端区航线网络在遭受30次破坏后网络已处于瘫痪状态。由此可见,在蓄意攻击下,无论使用哪种攻击方式,广州终端区航线网络的抗毁性均优于珠海终端区航线网络。

3.3.2 随机攻击

在随机攻击下,G_1、G_2网络效率和网络连通度分别如图10,图11所示。

从图10可以看出,广州终端区航线网络的网络效率随着节点删除数量的增加逐渐下降。在删除

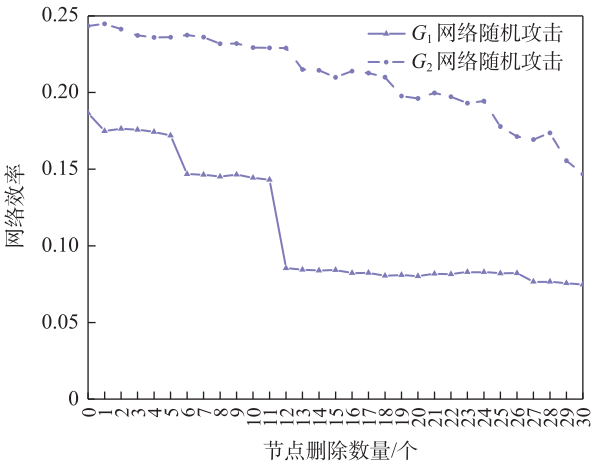


图10 随机攻击下的网络效率

Fig. 10 Network efficiency under random attack

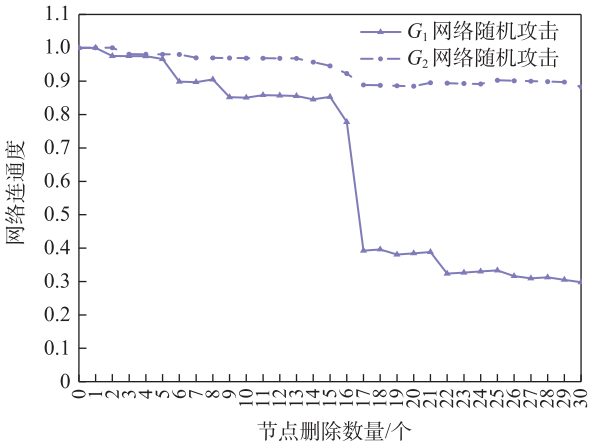


图11 随机攻击下的网络连通度

Fig. 11 Network connectivity under random attack

6个节点后,网络效率显著下降,随后下降趋势较为平缓,在删除约12个节点后网络效率由初始的0.18下降至0.08,下降了55.6%。相比之下,珠海终端区航线网络更为稳定,网络效率下降速度相对较慢,未出现大幅度骤降。即使在删除24个节点后,网络效率仅由初始的0.24下降为0.19,下降了20%。

从图11可以看出,初始状态下两个网络的连通度均为1。然而,广州终端区航线网络在删除17个节点后,网络连通度由初始的1下降至0.38,并在删除26个节点后网络连通度降为0.27,整体下降了73%。相比之下,珠海终端区航线网络的连通度下降趋势较为平缓,没有出现大幅度的骤降,直至删除30个节点后,网络仍然保持一定的连通性。

综合以上分析可以得出结论:在随机攻击下,

广州终端区航线网络的网络效率和网络连通度下降速度较快,网络表现出较弱的抗毁性,而珠海终端区航线网络在面对随机攻击时,能更好地维持网络效率和网络连通度,显示出更强的抗毁性,这可能得益于其分散和冗余设计的网络结构。

4　结论

1）根据拓扑结构分析结果可知,广州终端区航线网络结构较为复杂,覆盖范围广,节点间的连接效率相对较低,高介数中心性节点在网络中起重要作用,网络的稳定性依赖于少数关键节点。相比之下,珠海终端区航线网络结构更为紧凑,节点之间的连接更加紧密,信息传递效率高,具有较好的网络冗余度和容错能力。

2）根据抗毁性分析结果可知,在随机攻击下,珠海终端区航线网络表现出更强的抗毁性,而在蓄意攻击下,广州终端区航线网络的抗毁性更强。这种差异主要源于两者不同的网络结构。在随机攻击下,由于节点删除的任意性较强,广州终端区航线网络节点之间的连接不够紧密,因此网络在遭受攻击时抵御干扰的能力较差。在蓄意攻击下,根据度中心性、介数中心性以及KBKNR值得到的节点重要度排序结果以及它们在网络中的地理位置可知:珠海终端区航线网络的关键节点为GLN、ZUH、NLG、VIPAP。当这些关键节点遭受攻击时,网络效率和连通度会大幅下降,从而导致网络的抗毁性较弱。

3）相较于介数排序攻击和KBKNR排序攻击,度排序攻击对两个网络的影响更大,应将度中心性高的节点作为关键节点进行优先保护。

参考文献:

[1] 胡小兵, 魏媛, 李航. 多情景下航空公司航线网络抗毁性研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(7): 2223-2229.
HU X B, WEI Y, LI H. Research on the invulnerability of airline route networks under multiple scenarios[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(7): 2223-2229.

[2] 王超峰, 万婉晴, 王鹏程. 不同攻击方式下航空货运网络的抗毁性研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(4): 98-103.
WANG C F, WAN W Q, WANG P C. Research on the invulnerability of air cargo network under different attack modes[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(4): 98-103.

[3] 霍非舟, 曲方新, 马亚萍, 等. 城市地铁有向加权网络级联失效模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(12): 143-149.
HUO F Z, QU F X, MA Y P, et al. Cascading failure model on directed weighted network of urban subway[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(12): 143-149.

[4] 王雄, 来逢波, 董昌乐. 高速铁路复杂网络特性与脆弱性研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(7): 139-144.
WANG X, LAI F B, DONG C L. Research on the characteristics and vulnerability of complex high-speed railway network[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2024, 62(7): 139-144.

[5] 陈欣, 李心茹, 盛寅. 基于复杂网络的长三角航线网络结构特征分析[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(4): 139-146.
CHEN X, LI X R, SHENG Y. Characteristics of aviation network in Yangtze River Delta based on complex network[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38(4): 139-146.

[6] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406 (6794): 378-382.

[7] QI X Y, MEI G. Network resilience: definitions, approaches,and applications[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2024, 36(1): 101882.

[8] ZHANG X J, LIU J X. Research on UAV swarm network modeling and resilience assessment methods[J]. Sensors, 2024, 24(1): 11.

[9] 孔建国, 卢靖宇, 李煜琨, 等. 管制空域复杂网络模型构建及抗毁性分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9): 3973-3981.
KONG J G, LU J Y, LI Y K, et al. Complex network model of controlled airspace and invulnerability analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(9): 3973-3981.

[10] LIANG H J, ZHANG S Y, KONG J G. Study on characteristics and invulnerability of airspace sector network using complex network theory[J]. Aerospace, 2023, 10(3): 225.

[11] 曾小舟, 唐笑笑, 江可申. 基于复杂网络理论的中国航空网络抗毁性测度分析[J]. 系统仿真技术, 2012, 8(2): 111-116.
ZENG X Z,T ANG X X, JIANG K S. Measure of China airline networks invulnerability based on complex networks[J]. System Simulation Technology, 2012, 8(2): 111-116.

[12] LORDAN O, SALLAN J M, ESCORIHUELA N, et al. Robustness of airline route networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2016, 445: 18-26.

[13] YANG Y, XU K J, XIANG H H. Analysis on Chinese airline network invulnerability[J]. Journal of Systems Science and Information, 2019, 7(4): 359-372.

[14] 康瑞, 牟睿聆, 李凌海, 等. 航空器场面滑行关键路径识别与抗毁性研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(2): 181-188.
KANG R, MOU R L, LI L H, et al. Critical path identification and destructive resistance study of aircraft field taxiing[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2024, 38(2): 181-188.

[15] 徐凤, 朱金福, 陈丹. 东航空铁联运双层加权网络的关键节点识别与抗毁性分析[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(1): 93-100.
XU F, ZHU J F, CHEN D. Identification of key nodes and invulnerability analysis of double-layer weighted network of air-rail inter-modal transport by China Eastern Airlines[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(1):93-100.

[16] 王兴隆, 尹昊. 基于可达性的多层动态航空网络鲁棒性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(1): 18-24.
WANG X L, YIN H. Robustness analysis of multi-layer dynamic aviation network based on accessibility[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(1): 18-24.

[17] 赵爽. 不完全信息攻击策略下航空运输网络级联抗毁性仿真[J]. 物流工程与管理, 2023, 45(4): 109-112.
ZHAO S. Simulation of network cascade survivability of air transport under incomplete information attack strategy [J]. Logistics Engineering and Management, 2023, 45(4): 109-112.

[18] 柴星思. 基于复杂网络的中国航空网络鲁棒性评估[J]. 北京测绘, 2019, 33(3): 280-284.
CHAI X S. Robustness evaluation of Chinese air transport network based on complex network[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2019, 33(3): 280-284.

[19] 卓志强,姚红光. “一带一路”沿线航空网络结构及其鲁棒性研究[J]. 物流科技, 2018, 41(5): 78-84.
ZHUO Z Q, YAO H G. Study on the structure and the robustness in the aviation network along “the Belt and Road Initiative”[J]. Logistics Sci-Tech, 2018, 41(5): 78-84.

[20] 邵佳佳, 杨文东, 江海. 基于复杂网络的航空联盟航线网络鲁棒性分析[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(1): 39-46.
SHAO J J, YANG W D, JIANG H. Robust analysis of airline alliance route network based on complex network[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(1): 39-46.

[21] 张格豪, 刘伟, 王睿鑫垚, 等. 基于多属性决策的复杂网络关键影响力节点的识别研究[J]. 无线互联科技, 2023,20(16): 116-123.
ZHANG G H, LIU W, WANG R X Y, et al. Research on the identification of key influential nodes in complex networks based on multi-attribute decision making[J]. Wireless Internet Technology, 2023, 20(16): 116-123.

[22] 吴亚丽, 任远光, 董昂, 等. 基于邻域K-shell分布的关键节点识别方法[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(2): 87-95.
WU Y L, REN Y G, DONG A, et al. Key nodes identification method based on neighborhood K-shell distribution[J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(2): 87-95.

[23] 熊才权, 古小惠, 吴歆韵. 基于K-shell位置和两阶邻居的 复杂网络节点重要性评估方法[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(3): 738-742.
XIONG C Q, GU X H, WU X Y. Evaluation method of node importance in complex networks based on K-shell position and neighborhood within two steps[J]. Application Research of Computers, 2023, 40(3): 738-742.

[24] 谢丽霞, 孙红红, 杨宏宇, 等. 基于K-shell的复杂网络关键节点识别方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(5): 849-861.
XIE L X, SUN H H, YANG H Y, et al. Key node recognition in complex networks based on the K-shell method[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2022, 62(5): 849-861.

第一作者:彭瑛(1978—),女,讲师,博士,硕士生导师,研究方向为空中交通管理。E-mail:py423@sina.com。

通信作者:叶文婕(2002—),女,硕士研究生,研究方向为空域规划与管理。E-mail:1156524361@qq.com。

(责任编辑:姜红贵)