

基于网络效率的中国全货运航空网络鲁棒性研究

石学刚^a, 邬林江^b

(中国民航大学 a. 临空经济研究中心; b. 交通科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 在新的发展格局下, 提高中国全货运航空网络的抗风险能力尤为重要。本文首先以 2023 年中国的全货运航线数据为基础, 构建无向加权的拓扑网络结构; 然后, 基于不同方法对拓扑网络中的关键节点和连边进行识别; 最后, 探究在不同攻击策略下全货运航空网络效率的变化趋势。结果表明: 中国国内全货运航空网络(简称国内网络)和国际全货运航空网络(简称国际网络)中节点度均以指数分布; 在国内网络中的关键节点识别上, PageRank 算法优于综合度法, 但与节点度法识别效果相当, 均在节点失效比例为 40% 时达到网络效率的崩溃阈值; 国际网络总体上抗风险能力弱于国内网络, 尤其在连边失效情况下的脆弱性更为明显。根据研究结果, 建议加大现有国际全货运航班频率, 并不断开辟新的国际全货运航线, 以增强国际网络的鲁棒性和整体网络的抗风险能力。

关键词: 全货运航空网络; PageRank 算法; 熵值法; 网络效率

中图分类号: V35; U113 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)01-0032-08

Research on the robustness of China's all-cargo aviation network based on network efficiency

SHI Xuegang^a, WU Linjiang^b

(a. Research Center for Aerotropolis Economy; b. College of Transportation Science and Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: Under the new development pattern, it is particularly important to enhance the risk resistance capability of China's all-cargo aviation network. This paper first constructs an undirected weighted topological network structure based on China's all-cargo air route data in 2023, then identifies key nodes and edges in the topological network using different methods, and finally explores the changing trends of network efficiency of the all-cargo aviation network under different attack strategies. The results show that the node degrees in both China's domestic all-cargo aviation network (referred to as the domestic network) and international all-cargo aviation network (referred to as the international network) follow an exponential distribution. In identifying key nodes in the domestic network, the PageRank algorithm outperforms the comprehensive degree method but is comparable to the node degree method, with both reaching the collapse threshold of network efficiency when the node failure ratio is 40%. The international network generally has weaker risk resistance capability than the domestic network, especially showing greater vulnerability under edge failure scenarios. Based on the findings of this study, it is recommended to increase the frequency of existing international all-cargo flights and continuously launch new international all-cargo air routes to enhance the robustness of the international network and the overall network's risk resistance capability.

Key words: all-cargo aviation network; PageRank algorithm; entropy method; network efficiency

随着经济全球化和电子商务的快速发展, 航空货运在国际贸易和供应链中的重要性日益凸显, 机场成为连接全球市场的重要枢纽。根据 2022 年发布的《国家物流枢纽建设发展纲要》, 预计到 2030 年, 中国

航空货运总量将达到 25 000 kt。然而, 近年来, 航空货运网络的结构、运输能力、节点脆弱性和外部风险事件等对其稳定性提出了更大挑战。根据 2023 年货运数据统计, 货邮吞吐量排名前 5 的机场货邮量占全国

60%以上,其他地区运力严重不足,使得航空货运网络在面对自然灾害或疫情等突发事件时脆弱性显著增加。此外,全球经济波动、贸易政策变化及地缘政治风险等外部因素也对货运网络的稳定性产生了直接影响。因此,研究中国航空货运网络的鲁棒性不仅具有现实紧迫性和重要意义,还能为政策制定提供参考,提升航空货运系统的抗风险能力,确保其在各种挑战下保持稳定高效的运行,从而推动经济发展,保障供应链安全。

目前航空网络鲁棒性的研究主要分为关键节点和连边的识别、网络结构的分层及鲁棒性度量指标的选择。王兴隆等^[1]提出了复杂矩阵和节点效率指标,并探究了不同节点失效比例下的网络鲁棒性强弱。文献[2-5]运用节点适应度技术、K-核心分解法、度分布、人鱼算法等来识别航空网络中的关键节点并对整体网络进行分层。在此基础上,文献[6-7]根据不同的分层结构对节点和连边进行删除攻击,得出干线或核心层网络比支线或边缘网络鲁棒性更强的结论。文献[8-9]根据航空网络在不同时间节点的航线分布情况,建立了拓扑网络结构并对比分析了不同时间段的网络鲁棒性。文献[10-12]提出了基于网络中最小三元组数量的方法来测量中国航空网络和公交网络的鲁棒性。张锦等^[13]利用两阶段法来探究在客舱运力发生变动背景下全货运航空网络的鲁棒性,并选择列与约束生成算法来对建立的模型进行规划求解。杨文东等^[14]基于市场运输需求不确定性的视角,得出了不同需求情景下的枢纽选址和最优运输路径。

综上所述,以往对航空网络鲁棒性的研究中存在以下不足:①在研究方向上,鲜有以全货运航空网络为研究对象,并将国内和国际网络进行对比分析的研究;②在研究方法上,鲜有考虑删除网络中的孤立点和连边后,全货运航空网络的鲁棒性不降反升的异常情况。本文主要创新之处为:①在研究方向上,以全货运航空网络为视角,构建无向加权的航空网络拓扑结构,并通过两阶段法分配货运量;②在研究方法上,利用熵值法对网络的点度中心度、接近中心度、中介中心度进行客观赋权,以进行关键节点识别。此外,本文通过归一化节点间距离并引入惩罚因子,解决了删除节点或连边后网络效率异常上升的问题,提高了评估的准确性。本文有望对中国航空货运网络布局提供参考,同时增加航空货运网络鲁棒性方面的研究成果。

1 模型构建

1.1 构建全货运航空网络拓扑结构

本文选取 2023 年中国航空货运吞吐量排名前 50 的机场全货运航线,数据来源于 Official Airline Guide (简称 OAG)和中国民用航空局公布的货邮吞吐量机场排名。本研究将同一城市的多个机场假定为一个节点,构建无向加权的复杂网络,通过 Pajek 软件绘制网络拓扑结构如图 1 所示。

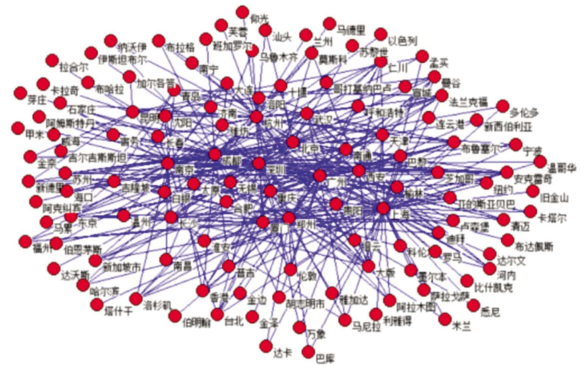


图 1 中国整体全货运航空网络

Fig.1 China's overall all-cargo aviation network

在无向加权的全货运航空网络 $P = \{U, D, Q\}$ 中, $U = \{u_1, u_2, \dots\}$ 表示全货运航空网络的通航机场节点集合; $D = \{d_{12}, d_{23}, \dots\}$ 为节点间的空间直线距离,没有通航的城市距离取值为 0,表示两节点无法通过航空运输直接到达; $Q = \{q_1, q_2, \dots\}$ 表示连边上航空货运量集合,由于所构建的网络不区分方向,因此每条连边的货运量为两节点之间的货运量总和。进一步,将航线网络抽象为由点、连边及流量组成的复杂网络模型。

对网络模型剔除重复边和无效节点后,网络中节点数为 123,连边数为 417,国内全货运航空网络(简称国内网络)和国际全货运航空网络(简称国际网络)及整体网络的节点度近似服从指数分布,网络具有无标度性,绘制度分布如图 2—图 4 所示。

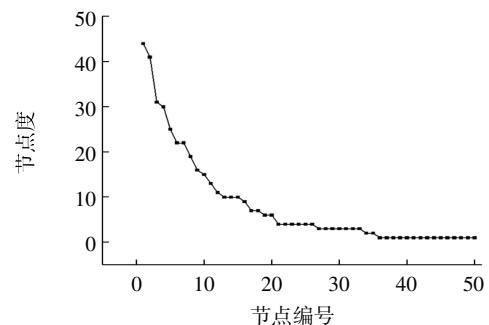


图 2 国内度分布

Fig.2 Distribution of domestic degree

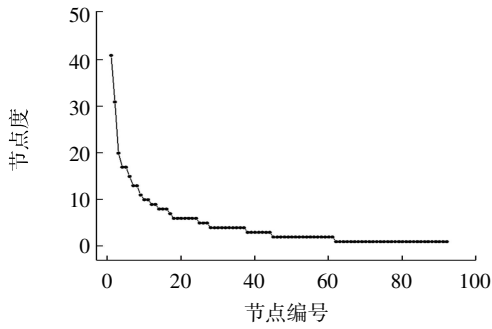


图3 国际度分布

Fig.3 Distribution of international degree

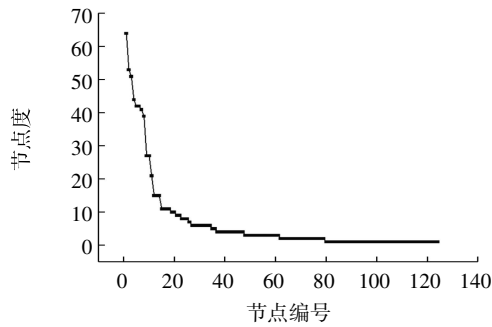


图4 整体度分布

Fig.4 Distribution of overall degree

1.2 构建加权的全货运航空网络

由于现实网络中不同节点之间的距离差异较大,因此通过对每条航线赋权可以更准确地描述全货运航空网络的节点分布。无加权网络的网络平均路径长度为

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

式中: N 为节点数量; d_{ij} 表示第*i*个节点与第*j*个节点间的最短连接距离。 L 值越小,代表网络的通达性越强。

在加权网络中,节点之间的权重只与最短路径长度相关,路径越长,对应的权重越低。首先对节点之间的距离做归一化处理,计算公式为

$$w_{ij} = \frac{d_{ij} - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (2)$$

式中: w_{ij} 表示第*i*个节点与第*j*个节点之间归一化后的权重; d_{\max} 、 d_{\min} 分别表示网络中任意两个节点之间的最长距离和最短距离。第*i*个节点与第*j*个节点之间的最短路径长度表示为

$$d_{ij}^w = \frac{1}{w_{i1}} + \frac{1}{w_{12}} + \dots + \frac{1}{w_{mj}} \quad (3)$$

式中, m 为该最短路径上过渡节点的数量。由于最短路径长度越短越好,因此需要取 w_{ij} 的倒数之和。进一步加权平均路径长度表示为

$$L_w = \sum_{i \neq j} \frac{1}{N(N-1)} d_{ij}^w \quad (4)$$

聚类系数也是衡量网络连通性的重要指标,表示在网络中连接一个节点的邻居节点之间的连边数与可连边数之比,用来描述网络中节点间的紧密程度。聚类系数的计算公式为

$$z_i = \frac{2e_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (5)$$

式中: k_i 表示与第*i*个节点连接的连边数; e_i 表示与第*i*个节点直接连接的连边数。调用 Matlab 求解可知,加权的全货运航空网络国内平均路径长度为 2.279 4,整体平均路径长度为 2.560 0,整体平均聚类系数为 0.327 8,符合网络中较小的平均路径长度和较大的聚类系数。因此,中国全货运航空网络整体具有小世界性。

1.3 关键节点的识别

目前在复杂网络关键节点识别领域已经形成了较为成熟的理论方法,其中以度分布来识别关键节点最为常见。但这种方法仅能反映节点在网络中与邻居节点的关系,即节点连边越多,在网络中的重要性就越强,不能反映节点在网络中的中介作用和其他节点的紧密性。因此,参考文献[15],将点度中心度、接近中心度、中介中心度分别赋权并以综合度进行评价。本文采用熵权法计算综合度各指标之间的权重,具体计算公式为

$$c_i = \sum_{g=1}^3 \varphi_g c_{ig} \quad (6)$$

式中: φ_g 表示第*g*种中心度指标的权重; c_{ig} 表示第*i*个节点的第*g*种中心度指标值。计算信息熵和标准化每种指标,最后得到国内网络和国际网络点度中心度、接近中心度、中介中心度分别赋权为 0.38、0.61、0.01 和 0.29、0.49、0.22,然后分别将每个机场所在节点的 3 种度指标进行赋权,即可得到不同节点的综合度排名。

相比于用节点度等指标来识别关键节点,张光远等^[6]运用 PageRank 公式法得到成渝地区城际轨道各节点的重要性排序,且验证了该算法比节点度法更优。但公式法的计算过程相对繁琐,阻尼系数值的选取缺乏客观依据,因此,本文采用基于转移矩阵的 Page-Rank 算法来识别网络的重要节点。由于该算法研究的边具有方向性,但本文所构建的网络为无向边,因此需要将网络中的无向边转化为双向边,步骤如下。

初始时,各节点均匀分布,每个节点在网络中的重要程度可以表示为

$$M = \frac{1}{N} \quad (7)$$

构建马尔可夫转移矩阵, 其由网络中节点的入度和出度共同决定, 得到复杂矩阵表达为

$$H = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & \frac{a_{1N}}{a_{1N} + a_{2N} + \cdots + a_{NN}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{a_{N1}}{a_{N1} + a_{N2} + \cdots + a_{NN}} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, a_{12} 表示第 1 个节点与第 2 个节点之间的连接关系, 若两个城市之间直接有航线连接, a_{12} 值为 1, 否则为 0, 其余以此类推。其中, a_{ij} 与 a_{ji} 的取值在国内网络中相同, 但由于研究对象为中国全货运航空网络, 不考虑国际网络中国外机场的航线分布情况, 因此国际货运航线所在的边不具有对称性。进一步, 状态转移矩阵为

$$E = H^v \times M \quad (9)$$

式中, v 表示状态转移次数。E 中的每个值对应着机场所在城市的 PageRank 值, 通过这些值的大小排序对节点进行重要度识别, 即完成基于 PageRank 算法的关键节点识别。

1.4 航线网络货运量分配

据中国民用航空局的统计数据显示, 2023 年中国完成航空货邮运输量为 7 354 kt, 其中国内完成 4 564 kt, 国际完成 2 790 kt, 国内由全货机完成的货邮运输量占比 18%, 国际占比为 51%, 即 2023 年国内由全货机完成货邮运输量为 822 kt, 国际为 1 423 kt。

航空货运量(即货邮吞吐量)一般与当地经济发展水平呈现显著线性关系, 因此, 用机场所在城市的国内生产总值(GDP, gross domestic product)来反映节点的货运量占比, 城市 GDP 数据来源于《各省市国民经济和社会发展统计公报》与世界银行, 从而可以估计得到各地由全货机完成的航空货运量。

基于各节点的航空货运量和网络中各节点的连接情况, 估计节点间的相对货运量和绝对货运量。下面通过引力模型来表达节点间的相关关系, 进一步表达第 i 个节点与第 j 个节点间的绝对货运量, 即

$$R_{ij} = G \times \frac{T_i \times T_j}{l_{ij}^2} \quad (10)$$

式中: G 为待定系数; T_i 、 T_j 分别为第 i 个节点和第 j 个节点的航空货运量; l_{ij} 为两个节点间的欧氏距离。

相对货运量考虑了节点在网络中与其他节点的连接关系, 比绝对货运量更贴合实际, 具体的推算公

式为

$$q_{ij} = \frac{R_{ij}}{G \times \sum_{k=1}^K \frac{T_k}{l_{ik}^2}} + \frac{R_{ij}}{G \times \sum_{b=1}^B \frac{T_b}{l_{jb}^2}} \quad (11)$$

式中: k 为与 i 相连的过渡节点, K 为这些节点的总数; 同理, b 为与 j 相连的过渡节点, B 为这些节点的总数。

2 鲁棒仿真及结果

为系统分析中国全货运航空网络的鲁棒性, 本文将对所构建的网络连边和节点以不同的攻击策略进行删除, 以模拟节点和航线在突发情况下失效, 以此来探究网络结构的鲁棒性。其中对节点的攻击策略包括节点度、综合度、PageRank 值及随机攻击, 对连边的攻击策略包括随机攻击、蓄意攻击和级联失效。

2.1 考虑节点失效的网络效率分析

由于现有研究很少考虑节点失效后在网络中产生的孤立点对整体网络鲁棒性的影响, 因此采用惩罚因子来虚拟网络中的失效节点, 从而避免出现节点失效但连通性增强的反常现象。参考文献[17]引入惩罚因子来探究网络加权平均路径长度的变化趋势, 本文以网络效率来测量网络的鲁棒性。

现有关于网络鲁棒性的测量指标一般为网络效率、最大连通子图、最大三元组数量等, 但因加入惩罚因子使得整体网络不会分裂成互不连通的子网络, 因此不需要分析因为连边断裂或节点孤立而发生变化的指标。

网络效率为加权平均路径长度的倒数, 表达式为

$$\lambda_w = \frac{1}{L_w} \quad (12)$$

网络效率越高, 则整体网络从一个节点到另一个节点的运输最短距离就越短。假设网络中两个节点之间的距离为 t , 当其中任意节点失效后, 该节点对应的所有直接连边都失效, 此时加入惩罚因子 F , 这个节点的所有连边长度变为 $t + F$, 从而导致网络整体效率降低。

2.1.1 国内网络中的关键节点识别

首先以节点在网络中的节点度来识别网络中的关键节点, 然后基于点度中心度、接近中心度、中介中心度, 通过熵权法进行赋值, 最后运用转移矩阵得出 PageRank 值, 从而得到基于节点度、综合度及 PageRank 值的节点排名, 列出国内排名前 10 的节点所对应的

城市和相应的值,如表 1—表 3 所示。

表 1 基于节点度对国内网络中的关键节点识别

Tab.1 Identifying key nodes in the domestic network based on node degree

排名	城市	节点度	排名	城市	节点度
1	杭州	44	6	广州	22
2	南京	41	7	武汉	22
3	深圳	31	8	郑州	19
4	北京	30	9	成都	16
5	上海	25	10	重庆	15

表 2 基于综合度对国内网络中的关键节点识别

Tab.2 Identifying key nodes in the domestic network based on composite degree

排名	城市	综合度	排名	城市	综合度
1	广州	1.000	6	郑州	0.626
2	成都	0.962	7	天津	0.590
3	深圳	0.794	8	重庆	0.587
4	上海	0.724	9	武汉	0.536
5	杭州	0.650	10	南京	0.503

表 3 基于 PageRank 值对国内网络中的关键节点识别

Tab.3 Identifying key nodes in the domestic network based on PageRank value

排名	城市	PageRank 值	排名	城市	PageRank 值
1	杭州	0.199 3	6	上海	0.046 5
2	南京	0.170 5	7	广州	0.039 1
3	深圳	0.084 8	8	郑州	0.037 7
4	北京	0.083 5	9	天津	0.028 5
5	西安	0.052 9	10	成都	0.024 1

从以上 3 种指标对关键节点的识别结果不难看出,除综合度排名中北京没有排到前 10 名以外,北京、上海、广州、深圳均位列前 10 名,且杭州、郑州分别作为中国的电商之都和航空货运枢纽基地,也排进了前 10 名,大体符合中国航空货运枢纽在各大城市的分布情况;节点度和 PageRank 值在识别国内关键节点上表现出高度的相似性,而综合度在关键节点排名结果上与其他方式具有较大差异。

2.1.2 国际网络中的关键节点识别

与国内网络的关键节点识别类似,同样列出国际网络中节点度、综合度和 PageRank 值排名前 10 的机场所在城市及其对应的值,如表 4—表 6 所示。

从以上 3 种指标对关键节点的排名结果可以得到,国际网络中,国外机场节点在以上 3 种指标的排名中差异性很大,前 10 名机场所在城市主要分布在欧美地区和周边发达国家,如日本、韩国、泰国等,这

些城市的经济属于所在国家的一流水平,且与中国的贸易往来较为频繁。对比国内网络和国际网络中的关键节点可知,国内网络中节点间的互通性更好,而国外网络中节点较为分散,不同方法的识别结果差异性较大。

表 4 基于节点度对国际网络中的关键节点识别

Tab.4 Identifying key nodes in the international network based on node degree

排名	城市	节点度	排名	城市	节点度
1	大阪	11	6	曼谷	7
2	安克雷奇	10	7	仁川	7
3	布鲁塞尔	9	8	洛杉矶	7
4	法兰克福	8	9	新加坡	6
5	东京	8	10	亚的斯亚贝巴	6

表 5 基于综合度对国际网络中的关键节点识别

Tab.5 Identifying key nodes in the international network based on composite degree

排名	城市	综合度	排名	城市	综合度
1	阿拉木图	0.625 7	6	大阪	0.462 6
2	法兰克福	0.497 2	7	曼谷	0.430 9
3	东京	0.481 5	8	新加坡	0.422 6
4	安克雷奇	0.477 7	9	仁川	0.391 1
5	布鲁塞尔	0.463 6	10	马尼拉	0.371 9

表 6 基于 PageRank 值对国际网络中的关键节点识别

Tab.6 Identifying key nodes in the international network based on PageRank value

排名	城市	PageRank 值	排名	城市	PageRank 值
1	大阪	0.018 2	6	法兰克福	0.007 3
2	东京	0.011 2	7	仁川	0.006 4
3	安克雷奇	0.010 5	8	曼谷	0.006 1
4	布鲁塞尔	0.008 7	9	河内	0.006 0
5	洛杉矶	0.008 3	10	新加坡	0.006 0

在得到国内网络和国际网络的关键节点后,按照节点在网络中所处的地位逐步删除,以模拟机场在遭受突发事件后临时关闭的状况,分别得到国内网络和国际网络的效率变化趋势,如图 5 所示。

根据图 5 可知,从 3 种关键节点的识别效果来看,在国内网络中,PageRank 算法与节点度法在识别关键节点上没有显著差别,在攻击节点数为 20 时达到网络效率的崩溃阈值 0.335,但综合度法的识别效果相对较差,在攻击节点数为 30 时才达到阈值;在国际网络中,3 种关键节点的识别效果相当,且均在攻击节点数大于 50 后达到网络效率的崩溃阈值 0.225。

对比国内网络和国际网络的崩溃阈值可以看出,国内网络的阈值要高于国际网络,主要原因是国内机场节点之间的联系更为密切,而国内与国外机场的连

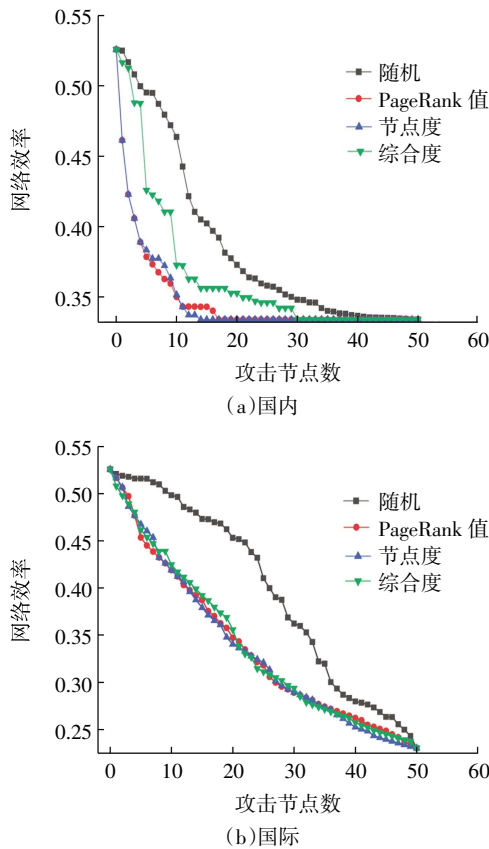


图 5 国内与国际节点在不同攻击策略下网络效率变化趋势
Fig.5 Changing trends of network efficiency of domestic and international nodes under different attack strategies

通性并不高, 在连通的机场中, 与中国直接连通超过 10 个城市的机场对应城市仅有安克雷奇和大阪, 大多数的国外机场所在城市与中国的连通机场城市数不足 5 个, 因此, 删除部分国际连通机场对应节点并不会导致整体网络效率的迅速下滑。

2.2 考虑连边失效的网络效率分析

与节点失效不同, 连边失效是指按照一定的规则删除网络中的连边, 从而探究随着连边删除网络效率的变化趋势。本文采用 3 种删除连边策略: 随机删除 (随机), 即随意选择网络中的连边删除; 按照连边的货运量进行删除 (蓄意); 按照连边的货运量进行可传递性删除 (级联), 即被删除连边的直接连边将会以概率 P 失效, 这在以往的研究中很少被提及, 但现实中有段航程时, 前一段航程取消必然直接影响下一段航程, 因此有一定现实意义。删除连边也可能出现孤立点, 因此引出惩罚因子 F , 与删除节点不同, 删除连边只在对应被删除的连边上引入惩罚因子, 删除后的连边仍然出现在网络中, 网络的连边长度变为 $t+F$ 。下面列出中国国内和国际全货运航线中货运量排名前 10 的航线及估计货运量, 如表 7 所示。

表 7 中国国内和国际货运量排名前 10 的航线及估计货运量
Tab.7 Top 10 domestic and international air cargo routes of China by estimated freight volume

排名	国内		国际	
	航线	估计货运量/kt	排名	航线
1	广州—台北	62.06	1	上海—墨尔本
2	青岛—杭州	56.97	2	上海—雅加达
3	深圳—台北	48.84	3	上海—利雅得
4	沈阳—香港	38.14	4	上海—纽约
5	厦门—福州	37.78	5	上海—旧金山
6	上海—台北	35.21	6	成都—以色列
7	重庆—香港	34.24	7	上海—洛杉矶
8	成都—香港	31.22	8	昆明—卡拉奇
9	广州—苏州	26.70	9	上海—东京
10	上海—宁波	24.07	10	上海—多伦多

从表 7 可知, 中国国内的全货运航线主要以一线城市对为主, 香港和台湾地区与大陆之间的货运量也占据着很大的市场份额; 而国际航线中, 前 10 对全货运航线上海占据了 8 对, 体现出上海在国际航空货运枢纽中不可动摇的地位。进一步按照国内和国际货运量排名顺序进行删除连边的操作并记录, 可得到网络效率的变化趋势, 如图 6 所示。

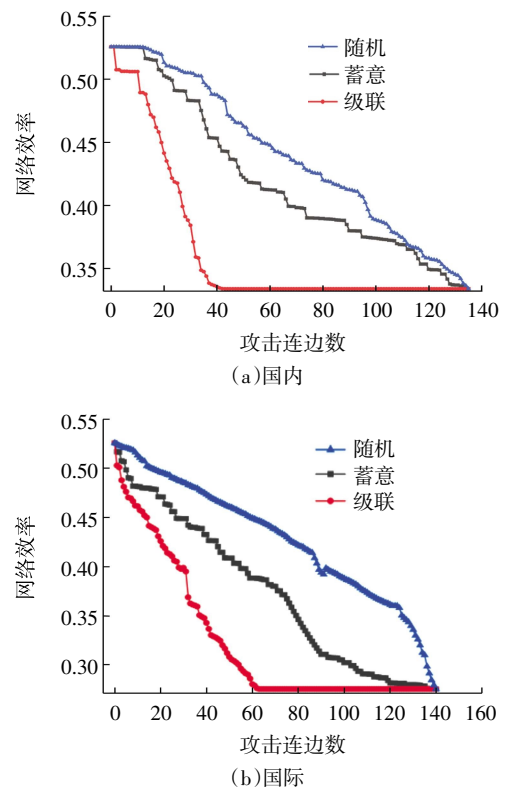


图 6 国内与国际连边在不同攻击策略下网络效率变化趋势
Fig.6 Changing trends of network efficiency of domestic and international edges under different attack strategies

由图 6 分析可知,在国内网络和国际网络删除 140 条航线过程中,级联失效下的国内网络的网络效率首先达到崩溃阈值,且国内网络的崩溃阈值低于国际网络。这是因为国内城市之间开通全货运航线的机场数量较少,当航线因突发事件引起中断后,在级联失效下会产生连锁反应,从而引起航线的大范围中断;而在国际网络中,因为节点较为分散,所以级联失效下全货运航线很难引起大面积失效。在蓄意攻击中,国际网络较先达到阈值,这是因为在特定航线失

效情况下,国内机场之间的连接会更为紧密,故相比国际网络删除单条连边,网络效率的变化幅度较小。

2.3 国内与国际网络鲁棒性分析

分别对国内网络和国际网络中的节点基于Page-Rank 值、节点度及综合度进行删除攻击,并记录每次攻击后的网络效率,得到网络效率变化趋势如图 7(a)—图 7(c)所示。然后对国内网络和国际网络基于货运量进行删除连边操作,并记录每次删除后的网络效率,得到网络效率变化趋势图如图 7(d)所示。

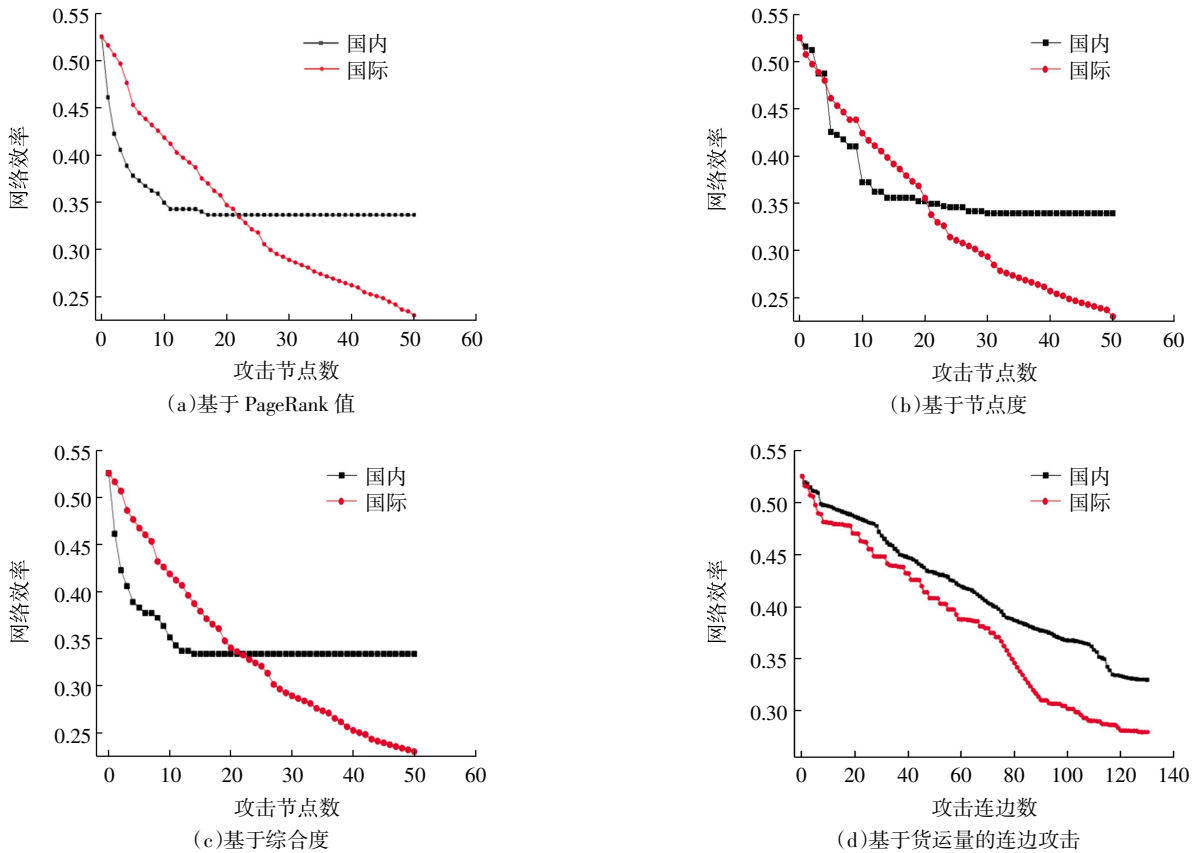


图 7 节点和连边在不同攻击策略下的网络效率变化趋势

Fig.7 Changing trends of network efficiency of nodes and edges under different attack strategies

由图 7(a)—图 7(c)可知,在不同的节点攻击策略下,国内网络更快达到崩溃阈值。这是由于国内网络节点之间连通度更高,因此,当其中一部分机场受到干扰导致暂时关闭后,会造成更大范围航线中断。但国际网络的节点数更多,一部分与中国国内通航的机场受到干扰后,几乎不会影响到网络中的其他航线。由图 7(d)可知,在连边攻击策略下,国际网络的效率下降更快。这是由于在全货运航线失效后,国内机场相互之间的连通性更强,因此有其他可替代的货运航线作为中转选择,但国际航线的可替代性不高,因此航线中断会使网络整体效率受到更大的冲击。

3 结语

本文以 2023 年中国全货运航空网络为研究对象,通过 PageRank 算法、节点度法和综合度法对国内网络和国际网络的关键节点进行识别,并根据估计的货运量对航线重要性进行排序,最后以不同的攻击策略对全货运航空网络的网络效率进行探究,得到如下结论:①在方法上,PageRank 算法在国内网络关键节点识别上优于综合度法,但与节点度法识别效果相当,通过加入惩罚因子的方式能够提高网络效率评估的

准确性;②在实际指导层面,国内网络的连通性相较于国际网络更为紧密,在突发事件导致国内机场关闭时会对整体网络效率造成更大的影响;与中国连通的国外机场数量较多,但大量连通的航线与少量航点连接,多数国际航线若发生突发事件导致航线中断,难以选择可替代的航线。

根据研究结果提出以下建议:①增加一线城市的国际全货运航线比例,为突发事件下国际航线在国内进行中转提供预备方案;②加强国际全货运航线中的关键机场和航线抗风险能力,如在机场周边城市增设国际通航机场,或增加不同时刻的航班频率。

本研究在模型构建时未考虑航班频率不同产生的差异,也未考虑不同航线及机场在受到攻击时失效程度的差异,这些因素在未来的研究中可以被纳入考虑范围,以提高模型的合理性。

参考文献:

[1] 王兴隆,张淑婷. 航空网络影响力节点识别与鲁棒性分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(8): 297-302.

[2] 王世锦,苏思雨,李海云,等. 基于 PCNC 的航路网络拓扑结构鲁棒性优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(6): 756-762.

[3] DU W B, ZHOU X L, LORDAN O, et al. Analysis of the Chinese airline network as multi-layer networks[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 89: 108-116.

[4] YAO H G, XIAO H H, WEI W. Study on the hierarchical structure of the "Belt and Road" aviation network based on K-core analysis[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2022, 2022(1): 2349523.

[5] 谭伟,陆百川,黄美灵. 神经网络结合遗传算法用于航迹预测[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(1): 147-150.

[6] 冯霞,孙琦琦,左海超. 基于 Informer 的客机长时 4D 航迹预测方法[J]. 交通信息与安全, 2023, 41(4): 111-121.

[7] WEITZ L A. Derivation of a point-mass aircraft model used for fast-time simulation[R]. USA: MITRE, 2015.

[8] 王超,郭九霞,沈志鹏. 基于基本飞行模型的 4D 航迹预测方法[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(2): 295-300.

[9] 张军峰,蒋海行,武晓光,等. 基于 BADA 及航空器意图的四维航迹预测[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(3): 553-558.

[10] SCHULTZ C, THIPPHAVONG D, ERZBERGER H, et al. Adaptive trajectory prediction algorithm for climbing flights[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, August 13-16, 2012, Minneapolis, Minnesota. Reston, Virginia: AIAA, 2012: 4931.

[11] ALLIGIER R, GIANAZZA D, DURAND N. Learning the aircraft mass and thrust to improve the ground-based trajectory prediction of climbing flights[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*,

[5] 吴媛媛,刘向军. 考虑级联失效影响的复杂网络关键节点识别[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(4): 920-926.

[6] 王世瑞,吴薇薇. 基于航线网络结构特征的鲁棒性研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2022, 38(6): 714-722.

[7] QIAN B X, ZHANG N. Topology and robustness of weighted air transport networks in multi-airport region[J]. *Sustainability*, 2022, 14(11): 6832.

[8] 程擎,王德超,李怡恒. 新冠疫情影响下航线网络时序鲁棒性分析[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(12): 2710-2714, 2814.

[9] YANG R S, SUN W, LE M L, et al. The Chinese aviation network: an empirical temporal analysis on its structural properties and robustness[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(21): 11627.

[10] 赖强,马鑫,张宏昊,等. 航空网络结构鲁棒性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 106-111.

[11] 冯霞,贾宏臻. 考虑节点失效和边失效的航空网络鲁棒性[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(5): 84-92.

[12] 孙军艳,牛亚儒,吴冰莹,等. 西安公共交通系统的网络特性和鲁棒性分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 148-155.

[13] 张锦,张哲睿,洪治潮,等. 新冠疫情背景下航空物流网络的鲁棒性优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(9): 2218-2226.

[14] 杨文东,邵佳佳,郑文娟. 不确定需求下航空公司国际联盟航线网络优化[J]. 中国民航大学学报, 2020, 38(3): 34-39.

[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.

[16] 张光远,张帆,刘泳博. 成渝地区城际铁路网络特性与脆弱性分析[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(7): 36-42.

[17] 彭挺,张亚平,程绍武. 基于惩罚因子的层级式航线网络鲁棒性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(3): 187-193.

(责任编辑:明 月)

(上接第 9 页)

gation, and Control Conference and Exhibit, August 21-24, 2006, Keystone, Colorado. Reston, Virginia: AIAA, 2006: 6098.

[18] CHATTERJI G B. Fuel burn estimation using real track data[C]//11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, September 20-22, 2011, Virginia Beach, VA. Reston, Virginia: AIAA, 2011: 6881.

[19] THIPPHAVONG D P, SCHULTZ C A, LEE A, et al. Adaptive algorithm to improve trajectory prediction accuracy of climbing aircraft[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2012, 36(1): 15-24.

[20] EUROPEAN EXPERIMENTAL CENTER. User manual for the base of aircraft data (BADA): revision 3.12[R]. Brétigny: EEC, 2014.

[21] RENTEUX J L. Aircraft modelling standards for future ATC systems: Eurocontrol division E1 Document[R]. Brussels: Eurocontrol, 1987.

[22] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. *Nature*, 1986, 323: 533-536.

[23] KE G L, MENG Q, FINLEY T, et al. LightGBM: a highly efficient gradient boosting decision tree[C]//Advances in Neural Information Processing Systems 30: Annual Conference on Neural Information Processing Systems, December 4-9, 2017, Long Beach, CA, USA.

(责任编辑:刘雅婷)