

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.06.011

考虑航班重分配的航班计划网络鲁棒性评估

李善梅¹, 胡锦涛¹, 许思莹², 孙登江¹, 韦正昊³

(1. 中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300; 2. 中国民用航空局运行监控中心, 北京 100710;
3. 中国民用航空华北地区管理局大兴空管中心, 北京 100621)

摘要:为提升航班计划的鲁棒性,提出基于航班重分配策略的航班计划网络鲁棒性的评估方法。首先,提出航班计划网络的构建方法,分析航班计划网络的无标度和小世界特性。给出航班计划网络鲁棒性的定义,以及航班重分配策略,重分配方式包括延迟起飞、取消起飞和转移起飞。基于复杂网络理论,从功能和结构两方面构建鲁棒性指标,并进行综合计算。最后以2019年上半年我国航班计划为例,采用本文方法分别对随机攻击和蓄意攻击下每小时航班计划网络的鲁棒性进行动态计算,分析航班计划网络鲁棒性与攻击时段、攻击机场数量、容量损失率和指标权重的关系。结果显示,随机攻击下,攻击机场数在20以内时,航班计划鲁棒性变化不大。蓄意攻击下航班计划网络鲁棒性较随机攻击有大幅下降,尤其对于高峰时段内机场容量损失率达10%及以上时,鲁棒性下降更为明显,并挖掘出使网络综合效率下降较快的7个关键机场。不同权重设置对鲁棒性较差时段的识别影响较小。结果表明,本文方法能实现不同时段航班计划网络鲁棒性的动态评估,并能挖掘出对航班计划编制和实际运行具有重要意义的规律。

关键词:空中交通;鲁棒性;复杂网络;航班计划

中图分类号:V355.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2023)06-1044-11

Evaluation of Flight Plan Robustness Based on Flight Redistribution

LI Shanmei¹, HU Jinbiao¹, XU Siying², SUN Dengjiang¹, WEI Zhenghao³

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Operation Supervisory Centre, Civil Aviation Administration of China, Beijing 100710, China; 3. Daxing Air Traffic Control Center, CAAC North China Regional Administration, Beijing 100621, China)

Abstract:An evaluation method of flight plan robustness based on flight redistribution strategy is proposed in order to improve the robustness of flight plan. Firstly, the method of building flight plan networks is proposed, and the characteristics of non-scale and small world are analyzed. Secondly, the robustness of flight plan and the flight redistribution strategy are defined. The ways of flight redistribution are delay, cancel and transfer. Then based on complex network theory, the robustness indicators are proposed from the aspects of traffic function and network structure. The robustness of China's flight plan is analyzed by using the national flight plan in the first half of 2019. The relationships between flight plan robustness and attack intervals, number of attacked airports, capacity loss rate and different weight under random and intentional attacks are studied. The results show that within 20 attack airports the robustness changes a little under random attacks, while it decreases sharply under intentional attacks. Especially in rush hours, the robustness decreases faster when capacity loss rate is larger than 10%, and seven key airports making the comprehensive efficiency

基金项目:国家自然科学基金(71801215);中央高校基本科研业务费专项资金(312202YY02);天津市应用基础多元投入基金(21JCZDJC00780);民航局安全能力建设资金(SKZ49420220027)。

收稿日期:2022-11-05;**修订日期:**2023-02-07

通信作者:李善梅,女,副教授,E-mail:sm-li@cauc.edu.cn。

引用格式:李善梅,胡锦涛,许思莹,等.考虑航班重分配的航班计划网络鲁棒性评估[J].南京航空航天大学学报,2023,55(6):1044-1054. LI Shanmei, HU Jinbiao, XU Siying, et al. Evaluation of flight plan robustness based on flight redistribution[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(6):1044-1054.

decline faster are discovered. Different weight settings have little impact on the identification of periods with poor robustness. The results indicates that the method proposed in this paper can dynamically evaluate the flight plan robustness in different time periods, and discover some meaningful laws for flight plan compiling and practical operation.

Key words: air traffic; robustness; complex network; flight plan

空中交通系统是一个由人(如飞行员、管制员和签派员等)、机(如航空器、通导设备等)、空域(如航路、扇区等)和环境(如天气等)构成的复杂动态系统。随着中国航空运输需求的不断上升、航路航线结构越发复杂,空中交通运行的随机性日益增强。尽管全国有统一的航班计划,但由于天气、军事活动和交通拥挤等不确定因素的影响,部分计划航班不能按原计划执行,易引发蝴蝶效应,导致大面积航班延误,严重威胁空中交通运行的安全与效率。

航班计划是指航空营运人为达到其飞行活动目的,预先制定的包括运行安排和有关飞机、航路、航线、空域、机场和时刻等内容的飞行活动方案^[1]。目前有关航班计划的编制,主要是航空公司编制各自的计划,然后报至民航局批复,而批复时主要考虑最大化使用机场容量,未从网络的角度考虑全国范围内航班计划的鲁棒性,导致航班计划抵御外界不确定性因素影响的能力较差,严重制约空中交通运行的效率。因此,如何对航班计划网络的鲁棒性进行有效评估,以指导航班计划的科学编制,成为提升中国空中交通运行有效性的关键。

复杂网络理论为现实生活中复杂系统的结构特性分析和鲁棒性分析提供了强有力的理论基础^[2-5]。基于复杂网络理论分析运输网络的鲁棒性,已经成为研究热点,如铁路网络^[6-7]、水路网络^[8-9]和道路网络^[10-11]等。随着民航运输的发展,国内外学者开始关注航空网络的鲁棒性问题,并取得一定的研究成果。网络鲁棒性是指网络对外界破坏具备的抗干扰能力。强鲁棒性的网络在受到扰动后,网络整体结构特性仍能保持较好状态;弱鲁棒性的网络则极易受到扰动和破坏的影响,使网络发生大面积瘫痪。Lordan等^[12]针对全球航空运输网络,提出了一种基于网络鲁棒性分析的关键机场识别方法。Chen等^[13]对1975—2017年间中国航空网络的鲁棒性进行分析,发现介数中心性排名前20的机场,对整个网络的鲁棒性起着主导作用。陈娱等^[14]通过研究中国航空网络的鲁棒性,提取严重影响网络运输效率的主干网络,并探讨枢纽机场对网络鲁棒性的重要影响。王世锦等^[15]基于优先配置关键节点保护连边的方法来探测关键节点,优化航路网络拓扑结构鲁棒性。Sun等^[16]以地理

距离和乘客数量为权重,构建加权世界机场网络,并分析了不同攻击策略和鲁棒性评估方法下该网络的鲁棒性。Zhou等^[17]分析了不同网络权重的计算方法对航空运输网络鲁棒性的影响。姚红光等^[18]采用“随机攻击”和“蓄意攻击”两种策略,对中国航空网络进行了鲁棒性分析,并挖掘出影响中国航空网络鲁棒性的5大重要机场。HE等^[19]研究了节点度与网络鲁棒性的相关关系,提出度值高节点的失效更易造成网络瘫痪。LI等^[20]从机场网络的拓扑结构和交通功能角度,构建机场网络的鲁棒性指标,并提出基于模糊软集合理论的机场网络鲁棒性综合评价方法。朱星辉等^[21]从机型指派的角度对航空公司航班计划的鲁棒性进行研究。Wang等^[22]构建空中交通物理网络模型,对网络节点进行排序,并对其脆弱性进行研究。通过对现有研究进行分析,发现主要存在以下几个方面的不足:

(1)现有研究多从航空网络的拓扑结构入手,分析攻击事件对静态网络结构的影响,而忽略了交通系统的动力学特性,如未考虑动态交通分配问题,即网络攻击后航班的重分配问题。实际运行中,航空网络失效节点上的航班,有可能转移到其他节点或延迟运行,并不会全部取消。因此应该考虑交通运行中的动态变化特性。

(2)传统的网络鲁棒性研究,大多直接将受攻击的节点或连边从网络中移除,进而分析网络的效率,但在航空网络中,受攻击节点或连边往往并不会完全失效,仍然保留部分运输能力。例如机场网络上某机场出现恶劣天气,该机场不一定完全关闭,只是其起降容量有所下降。

(3)现有航空网络鲁棒性研究,多针对某个航空公司航班计划的鲁棒性进行研究,有关全国航班计划的鲁棒性研究较少。空中交通是多航空公司的航班同时运行而产生的,不同公司航班之间会相互影响,计划阶段交通网络的低鲁棒性会严重影响运行阶段交通网络的运行效率。

因此,本文将动态交通分配的思想引入到航班计划网络鲁棒性问题分析当中,以全国航班计划为研究对象,构建不同时段的航班计划网络模型,在分析网络结构特性的基础上,进一步考虑受攻击机场部分容量受限的情况,建立航班重分配策略,提出航班计划网络的效率指标及其评估方法,通过仿

真模拟分别对随机攻击和蓄意攻击两种模式下航班计划网络鲁棒性进行分析计算,挖掘航班计划网络鲁棒性的时空演化规律。该研究对具有高鲁棒性的航班计划编制及实际运行中的航班计划调整提供了理论参考。

1 航班计划网络构建及特性分析

1.1 航班计划网络构建

不同时段下航班计划的差异,导致航班计划网络的鲁棒性具有时变特性。因此,以机场为节点,机场间的连线为边,构建各小时的航班计划网络。每个网络表示为图 $G=(V, E, W)$, 其中: V 为节点,代表有航班起降的机场; E 为连边,代表研究时段的航班计划里该边连接的机场对之间有航班通行; W 为边的权重,代表研究时段内,该边连接机场对之间的航班数量。同时考虑到航班在机场对之间飞行的方向性,所构建的航班计划网络为有向加权网络。该网络对应的加权邻接矩阵用 $A=[a_{ij}]$, $(i, j=1, 2, \dots, n)$ 表示, n 为网络节点数,即航班计划网络的机场数量, a_{ij} 为从 i 机场到 j 机场连边的权重,其值为 i 机场到 j 机场的航班数量; $a_{ij} \geq 1$ 表示 i 机场到 j 机场有航班;反之, $a_{ij}=0$, 表示 i 机场到 j 机场无航班,即 i 到 j 无连边。

本文采用2019年上半年全国航班计划数据(不含港澳台地区),每条航班记录包含航班号、机型、起飞机场、着陆机场、预计/实际起飞时刻和预计/实际着陆时刻,共有2 282 748条航班数据。基于每小时航班计划数据,分别构建航班计划网络,共构建4 344个航班计划网络,网络的边权为该边所连接两机场之间的航班数量,这些网络的平均节点数为159,边数为1 115。

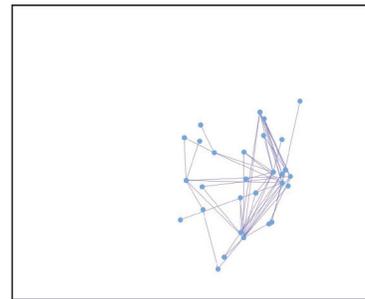
图1给出了2019年1月1日部分小时的航班计划网络拓扑结构图,节点的不同颜色代表不同等级的进离场航班数量。可见,不同时段的航班计划网络具有不同的拓扑结构特征,网络节点个数和连边情况均有明显变化。

1.2 航班计划网络的拓扑特性分析

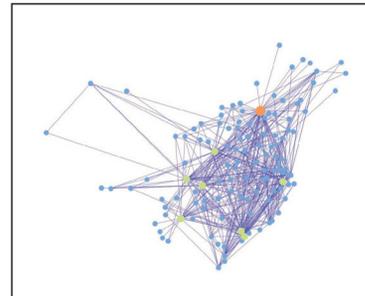
基于复杂网络理论,对航班计划网络的拓扑统计特征进行分析,主要对其无标度特性和小世界特性进行实证研究。

(1) 无标度特性

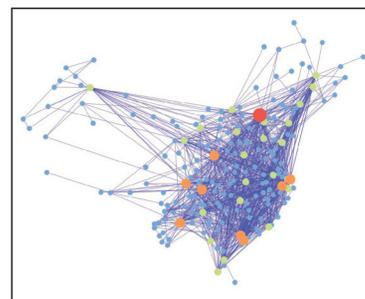
网络的无标度特性一般通过网络的点度或点强度是否服从幂律分布来判断。机场 i 的点度为与该机场通航的机场数量,点强度则为机场 i 的进离场航班架次数。这里使用点强度进行分析。



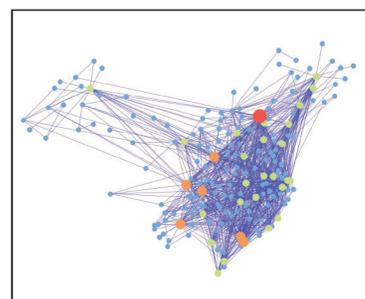
(a) 2:00~3:00



(b) 6:00~7:00



(c) 12:00~13:00



(d) 18:00~19:00

● 航班量>75架/h ● 50架/h<航班量<75架/h
● 25架/h<航班量<50架/h ● 0<航班量<25架/h

图1 航班计划网络拓扑结构图

Fig.1 Topology structure of flight plan network

一个机场的点强度越大,它在网络中的重要性就越高,其计算公式为

$$k_i = \sum_{j \in N} a_{ij} \quad (1)$$

式中 a_{ij} 为航班计划加权网络邻接矩阵 A 中的元素。

点强度分布是指网络中所有点强度的概率分布函数 $P(k)$,表征整个网络最基本的拓扑特性,有

$$P(k > k') = \sum_{k=k'}^{\infty} p_k \quad (2)$$

式中 p_k 指网络中点强度大于等于 k' 的概率。

基于上述概念,对 1.1 节所构建航班计划网络的点强度分布进行计算,绘制其双对数坐标图,如图 2 所示。可见,点强度服从双段幂律分布,弯折点大约在 $k=67$ 处,拟合函数如下

$$P(k > k') \sim \begin{cases} k^{-2.9263} & k' \leq 67 \\ k^{-0.1040} & k' > 67 \end{cases} \quad (3)$$

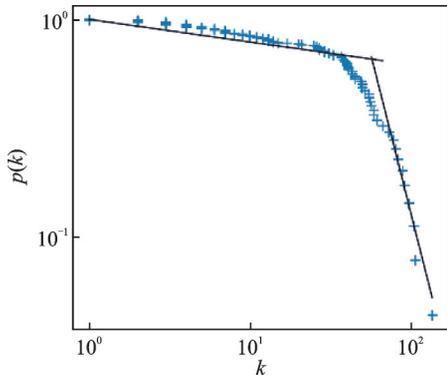


图 2 航班计划网络的点强度分布

Fig.2 Point intensity distribution of flight plan network

点强度的幂律分布,说明航班计划网络是一个无标度网络,具有较强的异质性,各机场之间的连接状况具有严重的不均匀分布性。即网络中存在少数关键机场拥有较多连接,而大多数机场只有少量连接。这些关键机场对航班计划的执行情况起着主导作用。

(2)小世界特性

衡量复杂网络小世界特性的指标主要有两个:平均路径长度和集聚系数。

(a)平均路径长度:指网络中所有机场对之间的平均最短距离,机场间的距离为从一个机场到另一机场所经过边的最小数目。平均路径长度的计算公式为

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

式中: d_{ij} 为机场 i 和 j 之间的最短距离; N 为网络节点数量。

通过对第 2 节所构建的各航班计划网络的平均路径长度进行计算,共获取 4 344 个平均路径长度数值,其平均值为 2.435 6,这说明如果从这 159 个机场中任何一个机场出发,平均只需要中转两次就可以到达另外任何一个机场。相对于网络的规模,159 个机场而言,这个平均路径长度是相对较短的,说明中国航班计划网络是一个小世界网络。

(b)集聚系数:指某一节点的邻居节点之间连接的紧密程度,集聚系数越大,表明网络的小世界

特性越强,其表达式为

$$c_i = \frac{2}{k_i(k_i - 1)} \sum_{j,h} e_{ij}e_{ih}e_{jh} \quad (5)$$

式中: e_{ij} 代表机场 i 和 j 之间连边的存在性, $e_{ij}=1$ 表示机场 i 和 j 之间有连边;反之, $e_{ij}=0$ 表示两机场之间无连边。

节点的加权集聚系数的表达式为

$$c_i^w = \frac{2}{s_i(k_i - 1)} \sum_{j,h} \frac{\omega_{ij} + \omega_{ih}}{2} e_{ij}e_{ih}e_{jh} \quad s_i = \sum_{j=1}^N e_{ij}\omega_{ij} \quad (6)$$

式中 ω_{ij} 表示机场 i 和 j 之间连边的权重。

经计算,2.1 节所构建航班计划网络的平均集聚系数是 0.403 1,平均加权集聚系数为 0.410 1。

图 3 给出了 2019 年某一周航班计划网络平均路径长度、集聚系数随时间的变化情况。为便于对比,图中还给出与各时段网络规模相当的随机网络图的平均路径长度与集聚系数。可以看出,平均路径长度和集聚系数呈负相关,其变化具有较强的日周期性。全天航班计划网络的集聚系数较高,尤其白天的集聚系数远高于随机网络的集聚系数。夜间的平均路径长度小于随机网络,白天的平均路径长度略高于随机网络,这可能是由于白天高峰时段(如 10:00~12:00)网络中存在较多偏远机场,如图 1(c)中东北地区 and 西部地区的一些机场,它们通常只与个别机场相连,导致整个网络的平均路径长度有小幅增长。总体来说,航班计划网络呈现出明显的小世界特性。

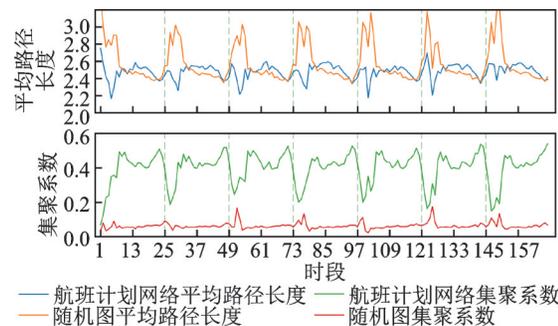


图 3 某一周航班计划网络特征变化图

Fig.3 Changes of flight plan for a certain week

航班计划网络的无标度特性和小世界特性,表明航班计划网络中存在少数关键机场。当这些关键机场遭受攻击时,会使得大量航班运行受到影响,引发大面积航班延误等现象。而当非关键机场遭受攻击时,对整个网络上的航班运行影响较小,因此,有必要对航班计划网络的鲁棒性进行深入分析。

2 航班计划网络鲁棒性定义及航班重分配策略

2.1 航班计划网络鲁棒性定义

鲁棒性通常用以表述具有一定组织的系统抵御无法预测风险的能力^[5]。航班计划网络鲁棒性是指航班计划实施过程中,在受到不确定因素扰动时,网络的连通性影响较小,航班延误或取消不会大面积发生,仍具有较强的网络运输效率。由于不同时段航班计划的差异性,基于航班计划所构建不同时段的网络结构会有所差别,不同时段航班计划网络的鲁棒性也不一样。若恶劣天气、飞机故障、交通管制等意外状况发生在航班计划网络鲁棒性较差时段,容易引发大面积航班延误和航班取消,严重影响空中交通运输的效率。因此,航班计划网络的鲁棒性具有时效性的特点。

2.2 航班重分配策略

传统的静态鲁棒性分析方法,直接将受攻击机场及其相关航班进行移除,进而分析网络效率的变化情况,此种做法缺乏一定的合理性。实际上,攻击时段内的航班可延迟到后续时段起飞。另外,随着中国综合交通运输的快速发展,将来不同交通运输方式,尤其是高铁和航空、公路与航空,能够实现很好的无缝衔接,可将受攻击影响航班的旅客,通过公路、轨道等交通方式转移到附近不繁忙机场,临时在该机场增加航班,执行受攻击航班的运输任务。

2.2.1 假设条件

起飞航班重分配策略的假设条件如下:

(1)恶劣事件只攻击网络节点(机场),不考虑网络连边(航线)的受攻击情况;

(2)相邻机场之间的道路交通及轨道交通等发达,实现无缝衔接;

(3)航空公司在各机场的航空器、机组等运力充足;

(4)假设航路容量充足,只考虑机场起飞容量对航班运行的限制;

(5)航班最多只能延误一个小时起飞。

2.2.2 重分配形式及流程

起飞航班的重分配形式主要有3种:延迟起飞、转移起飞和取消起飞。

(1)航班延迟起飞:若机场在受攻击后起飞容量下降,且机场后续时段的计划起飞航班量小于机场起飞容量,则在不影响下一时段计划航班正常起飞的情况下,令攻击时段的超容量航班延迟到下一时段起飞。

(2)航班转移起飞:若受攻击机场属于某机场

群,该机场受影响航班的旅客及货物,可通过道路交通或轨道交通(如高铁)提前转运至机场群其他容量未饱和机场,在转移机场于原计划时段内,执行原机场受影响航班的运输任务。

(3)航班取消起飞:若机场攻击后,其后续时段的计划航班量已经达到该机场的起飞容量,且该机场附近没有其他机场能够接收转移航班,或者可转移机场的起飞容量已达饱和,则对该航班实施取消策略。

具体重分配流程如图4所示。

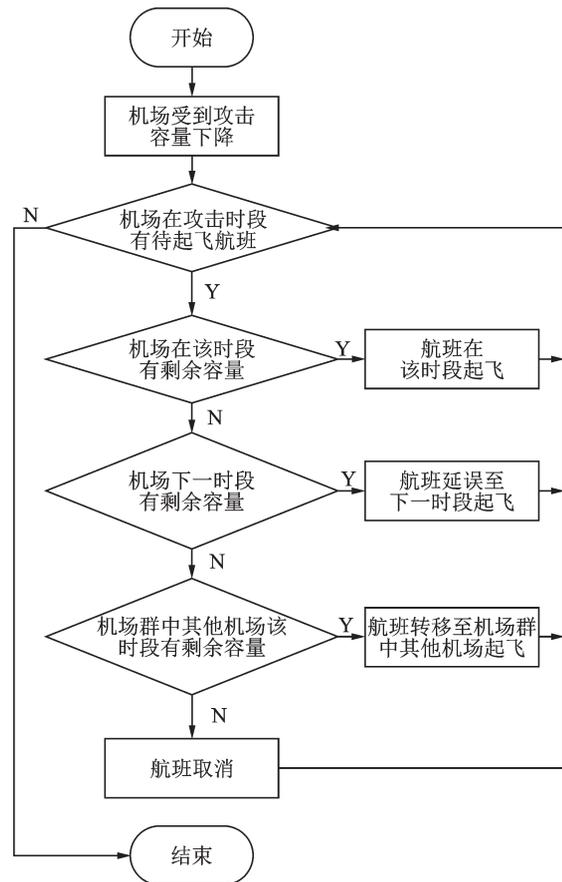


图4 航班重分配流程图

Fig.4 Flow chart of flight reassignment

3 航班计划网络的效率指标

传统的鲁棒性分析,主要是从结构的角度,通过分析复杂网络效率的变化情况来评估网络的鲁棒性,而结构和功能是复杂网络的两大要素,结构决定功能,功能决定特性。因此,本文从网络结构和运输功能两个角度构建航班计划网络的效率指标。

3.1 基于网络结构的效率指标

2001年,Latora等^[23]在研究小世界网络时,提出用网络中节点之间的最短路径长度作为网络效率的评估指标,具体计算公式为

$$E = E(G) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (7)$$

式中: d_{ij} 为机场对 (i, j) 间最短路径的距离,若 i 与 j 之间没有路径连通,则 $d_{ij} \rightarrow +\infty$;网络效率 E 的取值范围为 $[0, 1]$, E 值越大,网络的连通性越好,网络效率越高,则网络的抗攻击能力越强。 n 为网络节点数量。

本文基于航班计划网络的最短路径及机场之间的航班量,提出用单位路径长度上的交通量来评估航班计划网络的网络效率指标。航班计划网络攻击后网络效率下降越大,网络鲁棒性越差,有

$$\varepsilon = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{q_{ij}}{d_{ij}} \quad (8)$$

式中: ε 为航班计划网络的效率, d_{ij} 为机场对 (i, j) 间最短路径的距离,若 (i, j) 不连通则 $d_{ij} \rightarrow +\infty$, q_{ij} 为机场对 (i, j) 间的航班量。

考虑到航班计划网络的动态性,进一步定义网络效率变化率 $\eta_{E,t}$,表征网络遭受攻击后,维持原效率的能力。

$$\eta_{E,t} = \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_a}{\varepsilon_b} \quad (9)$$

式中: $\eta_{E,t}$ 为 t 时段航班计划网络效率变化率; ε_b 为攻击前航班计划网络的效率; ε_a 为攻击后航班计划网络的效率。 $\eta_{E,t}$ 值越高,表明网络攻击后网络效率下降越大,网络鲁棒性越差。

3.2 基于交通功能的效率指标

本部分主要从航班延误情况、航班转移情况和航班取消程度 3 个角度,构建基于交通功能的效率指标。

3.2.1 航班延误率

由 2.2 节航班重分配策略可知,若机场在受攻击的后续时段有剩余起飞容量,则该时段受影响航班便会延误至后续时段起飞。延误航班的数量越多,运输效率越低,航班计划网络的鲁棒性越差。因此,构建延误率指标,有

$$\eta_{D,t} = \frac{\sum_i \min \{ \max \{ x_{i,t} - b_i, 0 \}, \max \{ b_i - x_{i,t+1}, 0 \} \}}{\sum_i x_{i,t}} \quad (10)$$

式中: $\eta_{D,t}$ 为时段 t 的航班延误率; n 为机场总数; $x_{i,t}$ 为时段 t 中机场 i 的计划起飞航班数量; b_i 为机场 i 的起飞容量。

3.2.2 航班转移率

假设空铁联运发达并且各机场航空器、机组等运力充足,受攻击机场计划起飞航班的客货可以短

时间内转移至同机场群内其他机场,执行原航班的运输任务。与航班取消、航班延误起飞相比,虽然航班转移起飞降低了一定损失,但转移旅客前往其他机场会带来一定成本,且增加其他机场的运行压力。因此,机场群中转移航班越多,对机场群的局部运输效率影响越大,机场群的局部鲁棒性越差。

构建机场群航班转移率,作为衡量机场群内部运输效率的局部指标。机场群航班转移率为转移起飞的航班数量占机场群中所有机场起飞容量的总和的比例。具体计算公式为

$$B_{i,t} = \sum_j^{NA_i} \max \{ b_j - x_{j,t}, 0 \} \quad (11)$$

$$\eta_{M,t} = \frac{\sum_i (\min \{ x_{i,t} - D_{i,t}, B_{i,t} \})}{\sum_i \sum_j^{NA_i} b_j} \quad (12)$$

式中: $B_{i,t}$ 为时段 t 机场 i 所在机场群中其他所有机场接收机场 i 起飞航班的总能力,即机场群总的可用起飞容量; NA_i 为机场 i 所在机场群中机场个数,若机场 i 不属于任何机场群,则 $NA_i = 0$; $\eta_{M,t}$ 为时段 t 的机场群航班转移率; $D_{i,t}$ 为时段 t 中机场 i 的延误航班数,在延误率指标计算中得出; $x_{i,t} - D_{i,t} > 0$ 可表示在经历了延误后机场 i 仍然存在未处理的受攻击影响的航班。

基于文献[24],本文共考虑中国航班计划网络中的 4 个机场群,分别是京津冀机场群(北京首都机场、大兴国际机场、天津滨海国际机场、石家庄正定机场)、长三角机场群(上海浦东机场、上海虹桥机场、南京禄口机场、杭州萧山机场、合肥新桥机场)、珠三角机场群(广州白云机场、深圳宝安机场、珠海金湾机场)以及川渝地区机场群(成都双流机场、重庆江北机场、绵阳南郊机场)。

3.2.3 航班取消率

若某机场受攻击后,经过航班重分配策略后,不能在原机场延迟起飞或转移至其他机场起飞的航班,只能被取消。构建航班取消率,作为衡量网络运输效率的另一指标。网络受攻击后,航班的取消率增加越多,表明网络的鲁棒性越差,即有

$$\eta_{C,t} = \frac{\sum_i \max \{ x_{i,t} - D_{i,t} - M_{i,t}, 0 \}}{\sum_i x_{i,t}} \quad (13)$$

式中: $\eta_{C,t}$ 为时段 t 的航班取消率; $M_{i,t}$ 为时段 t 中机场 i 转移至机场群内其他机场起飞的航班数,由 3.2.2 节中计算得到。

3.3 航班计划网络的综合效率指标

由于上述4个效率指标具有不同的取值范围,为进行综合评价,需将其进行归一化处理,然后进行加权求和,各指标的权重总和为1。本文采用最大最小值归一化方法,即

$$\eta'_{X,t} = \frac{\eta_{X,t} - \eta_{X\min}}{\eta_{X\max} - \eta_{X\min}} \quad (14)$$

式中: $\eta_{X,t}$ 为某效率指标归一化前的值; $\eta'_{X,t}$ 为 $\eta_{X,t}$ 归一化后的值; $\eta_{X\min}$ 和 $\eta_{X\max}$ 分别为指标 $\eta_{X,t}$ 的原始数值中的最小值和最大值。

由于归一化后,4个指标加权求和后的值介于0和1之间,其值越小,航班计划网络的综合效率越高,因此,构建航班计划网络的综合效率指标,计算公式为

$$\eta_t = 1 - a\eta'_{D,t} - b\eta'_{M,t} - c\eta'_{C,t} - d\eta'_{E,t} \quad (15)$$

式中: $\eta'_{D,t}$ 、 $\eta'_{M,t}$ 、 $\eta'_{C,t}$ 、 $\eta'_{E,t}$ 分别为归一化后的时段 t 航班延误率、航班转移率、航班取消率和网络效率变化率; a 、 b 、 c 、 d 为各指标的权重,可通过专家打分法给出。具体地,通过发放问卷星给空管一线教员和空管专业资深教师进行打分,每位专家手中有100分,专家根据自己的理解对这7项指标分别打分,共收回问卷35份。然后,基于专家对各指标权重的打分值,计算各指标的平均得分,航班延误率、航班转移率、航班取消率和网络效率变化率的得分分别为10、15、25、50,归一化后,各指标的权重为 $a=0.1$ 、 $b=0.15$ 、 $c=0.25$ 和 $d=0.5$ 。

综合评价值 η_t 越大,表明该时段网络遭受蓄意攻击的影响程度越小,航班计划网络鲁棒性越强。

4 航班计划网络鲁棒性的实例分析

基于上述航班计划网络鲁棒性分析思路,对1.1节所构建各时段航班计划网络的鲁棒性进行仿真分析。分别针对随机攻击和蓄意攻击两种策略,分析航班计划网络鲁棒性与攻击时段、攻击机场数量、容量损失率和指标权重的关系。

4.1 航班计划网络鲁棒性攻击策略

本文主要考虑对航班计划网络的机场节点进行攻击,该攻击主要表现为突发性的恶劣天气、设备故障、人因差错、交通拥堵和军事活动等引发机场丧失部分或全部(即机场关闭)起飞容量。

复杂网络鲁棒性分析中常用的两类攻击模式:蓄意攻击和随机攻击。随机攻击就是网络上所有节点被攻击的概率相等,蓄意攻击则是按照节点的重要性从大到小依次进行攻击。

本文分别采用随机攻击和蓄意攻击两种攻击模式对航班计划网络中的机场节点进行攻击,并分析网络鲁棒性。其中,蓄意攻击下,网络节点的重要性主要依据2019年下半年各机场的实际航班放行量进行排序。本文通过统计机场上半年的小时交通量,并将其最大者作为该机场的航班放行量。在后续的重分配仿真中,将该值作为机场的起飞容量。表1给出了航班放行量排名前30的机场。

表1 航班放行量排名前30的机场

Table 1 Top 30 airports in terms of flight clearance

| 机场 | 起飞容量/(架·h ⁻¹) | 机场 | 起飞容量/(架·h ⁻¹) | 机场 | 起飞容量/(架·h ⁻¹) |
|------|---------------------------|------|---------------------------|------|---------------------------|
| ZBAA | 71 | ZWWW | 30 | ZGHA | 23 |
| ZPPP | 49 | ZSAM | 29 | ZYTL | 23 |
| ZGGG | 49 | ZSNJ | 29 | ZSJJ | 23 |
| ZUCK | 47 | ZHCC | 27 | ZYHB | 22 |
| ZUUU | 46 | ZSQD | 27 | ZYCC | 22 |
| ZLXY | 43 | ZHHH | 26 | ZSFZ | 20 |
| ZGSZ | 37 | ZUGY | 25 | ZLLL | 20 |
| ZSPD | 37 | ZJHK | 24 | ZGNN | 19 |
| ZSSS | 35 | ZYTX | 24 | ZSCN | 19 |
| ZSHC | 33 | ZBTJ | 23 | ZBYN | 18 |

值得注意的是,网络没有受到攻击时,所有航班会按原计划进行,基于航班计划构建的网络结构不会发生改变,航班转移、延误、取消的情况也不会发生。因此航班计划网络的网络效率变化率、延误率、转移率、取消率的值均为零,则由式(14)可得,航班计划网络的综合效率值为1。

4.2 航班计划网络鲁棒性与攻击时段的关系

攻击实验过程中,假设受攻击机场损失80%的起飞容量,仍有20%的可用起飞容量,实际当中,容量损失值可根据不同机场受攻击严重程度进行有差异化的设定。分别采用随机攻击和蓄意攻击两种模式,对2019年1月所有时段进行网络攻

击,攻击节点的数量由 1 个逐渐增加至 10 个。针对每次攻击,进行航班重分配仿真,并基于第 4 节方法计算各时段航班计划网络的综合效率,进而评估网络的鲁棒性。

蓄意攻击时根据表 1 选择排名靠前的机场节点进行攻击,对同日相同时段进行攻击实验,取所有日效率的平均值作为该时段的航班计划网络的综合效率。

随机攻击情况下,对该月每个时段进行攻击前都会随机选择攻击节点,累计进行 50 次攻击实验,并将 50 次实验计算的网路综合效率的平均值作为该时段航班计划网络的综合效率。两种攻击模式下,各时段航班计划网络的综合效率如图 5 所示。图中不同颜色的线代表不同的攻击节点数。

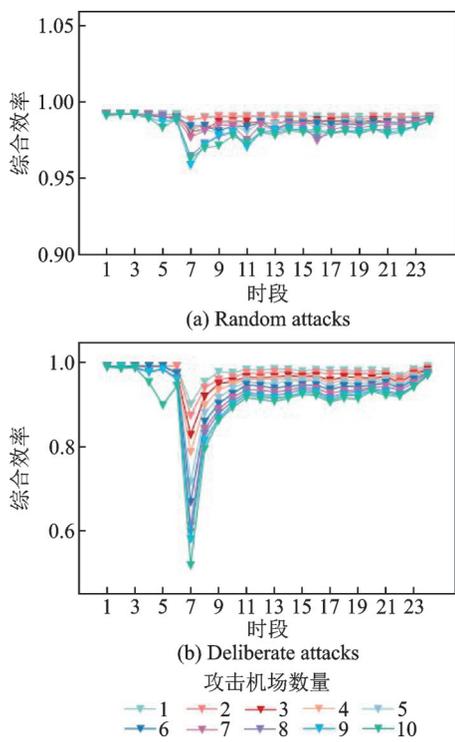


图 5 网络鲁棒性与攻击时段关系图

Fig.5 Relationship between network robustness and attack interval

由图 5 可见,随机攻击下,各时段网络的综合效率较高,且几乎没有较大波动,均在 0.95 以上,说明航班计划对于随机攻击有较强的抵抗能力,符合 2.2 节分析得出的无标度特性。蓄意攻击情况下,低峰时段,前一日 23:00 到次日 6:00,网络综合效率几乎不随攻击机场数的增加而改变,说明在该时段航班网络对蓄意攻击有较强的抵抗能力。平峰时期,如 8:00~23:00,每增加一个攻击机场都会使网络综合效率变低,9:00~10:00、12:00~13:00 和 16:00~17:00 为平峰时期中网络综合效率相对更低的时段。高峰时期,如 6:00~8:00,航班计

划网络的综合效率最低,每增加一个攻击机场都会造成明显的效率下降,尤其蓄意攻击会造成网络综合效率的大幅下降。这主要是由于航班计划中安排的 6:00~8:00 时段各机场起飞航班量较大,接近各机场的起飞容量。一旦某机场遭受恶劣天气等攻击,起飞容量下降,便会有较多航班需进行重分配,同时由于该机场后续时段以及临近机场的计划起飞航班较多,会导致较多航班取消,鲁棒性较低。因此,从鲁棒性的角度分析,尽管该时段航班计划充分利用了运输资源,但其编制仍然是欠妥的。航班计划在编制过程中,应避免连续几个时段,以及进场群内多个机场同时安排过多航班起飞,以提高航班计划网络的鲁棒性,进而提高航班计划的鲁棒性。

4.3 航班计划网络鲁棒性与攻击机场数量关系

为进一步清晰展示航班计划网络鲁棒性与攻击机场数量的关系,基于 4.2 节的实验结果,绘制航班计划网络鲁棒性和攻击机场数量的关系图如图 6 所示。

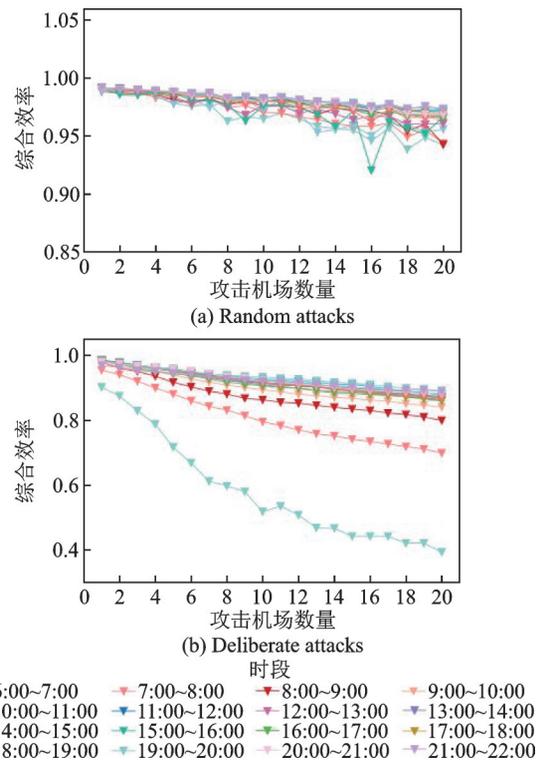


图 6 网络鲁棒性与攻击机场数量关系图

Fig.6 Relationship between network robustness and number of attacked airports

由图 6 可知,随机攻击模式下,攻击机场数在 20 以内时高峰时段和平峰时段网络综合效率均无显著变化,高峰时段和平峰时段没有明显差异,说明各时段航班计划网络对随机攻击均保持较强的鲁棒性。

蓄意攻击模式下,高峰时段攻击机场数小于等

于7个时,航班计划网络的综合效率变化较快,大于7个机场之后下降变缓,故将机场容量排名前七位的机场定义为航班计划网络的关键机场,即ZBAA、ZPPP、ZGGG、ZUCK、ZUUU、ZLXY、ZG-SZ。在平峰时段对网络的攻击,综合效率指标变化斜率较小,说明平峰时段的网络鲁棒性较好。因此,在实际运行中,尽量避免使7个以上航班量较大的机场同时受到攻击,或者在编制航班计划时,要重点考虑不确定因素对这些机场的影响。

4.4 航班计划网络鲁棒性与容量损失率的关系

由4.3可知,蓄意攻击下的关键机场节点数为7个。以4.3节识别出的关键机场节点为攻击目标,机场起飞容量损失率由10%逐渐增加到90%,研究航班计划网络鲁棒性与容量损失率的关系。对某一时段的鲁棒性分析,对每天该时段航班计划网络进行攻击实验,并基于每次实验结果计算航班计划网络的综合效率,然后将每天该时段的航班计划网络的综合效率值求平均,代表该时段航班计划网络的综合效率。绘制航班计划网络综合效率与时段的关系图,如图7所示。

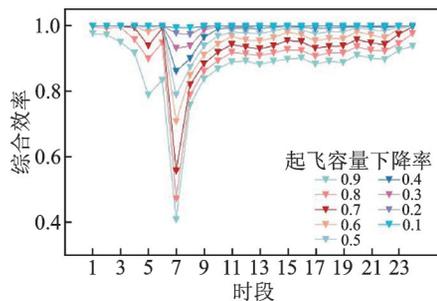


图7 网络鲁棒性与机场容量损失率关系图

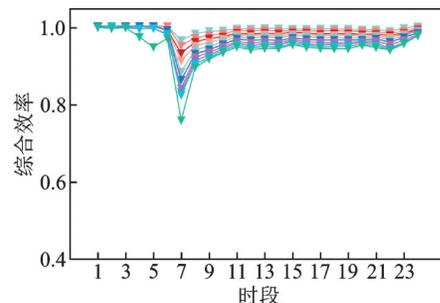
Fig.7 Relationship between network robustness and loss rate of airport capacity

由图7可以看出,对于平峰时段航班计划网络,攻击机场容量损失率为40%时,航班计划网络综合效率开始发生较大下降;对于低峰时段航班计划网络,攻击机场容量损失率一直到60%时,网络综合效率才开始出现较大下浮;对于高峰时段航班计划网络,攻击机场仅损失10%的起飞容量时,便会使得网络综合效率大幅下降。说明在损失率由60%变为70%时,网络鲁棒性变化最为明显,关键机场受影响幅度很大。另外,当受攻击机场的起飞容量损失率达90%时,高峰时段网络鲁棒性比平峰时段差得较多。这说明高峰时段航班计划的流量分布极不均衡,与1.2节得出的无标度特性相一致。因此,在高峰时段,即使机场受到轻微攻击,也可能造成严重的后果,要提高关键机场防攻击的能力。同时,在编制航班计划时,尽量提高航班量在

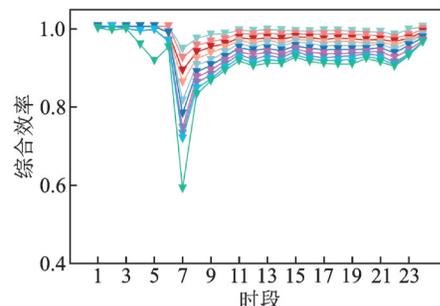
时间上分布的均衡性。

4.5 航班计划网络鲁棒性与指标权重的关系

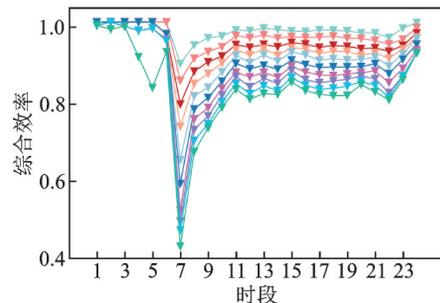
如3.3节所述,本文主要采用专家打分法确定航班计划网络各效率指标的权重,其中网络效率变化率的权值最大,为0.5。为进一步分析不同权值设置对航班计划网络鲁棒性的影响,另外进行3次蓄意攻击实验,每次实验采取不同的权值设置。图8中各子图分别给出不同实验下,航班计划网络的综合效率随时段的变化情况。其中,图8(a)对应实验中航班取消率的权重最大,图8(b)对应实验中航班转移率的权重最大,图8(c)对应实验中航班延误率的权重最大。图5(b)对应实验中网络效率变化率的权重最大。从这4幅子图中可以看出,尽管每次实验的指标权重均不一样,且权重最大的指标也均不相同,各时段的综合效率值也有所差别,但不同权重设置下,网络综合效率的变化趋势大体一致,6:00~8:00的综合效率最低,说明一天当中该时段网络的鲁棒性最差。因此,指标权重的



(a) $a=0.15, b=0.25, c=0.5, d=0.1$



(b) $a=0.25, b=0.5, c=0.1, d=0.15$



(c) $a=0.5, b=0.1, c=0.15, d=0.25$

攻击机场数量
1 2 3 4 5
6 7 8 9 10

图8 不同指标权重下的网络综合效率变化图

Fig.8 Diagrams of comprehensive efficiency of network robustness under different weights

不同设置对于挖掘鲁棒性较差的时段影响较小。同时可以发现,当延误率指标权重较大时,网络受到攻击后,综合效率值变化较大,说明延误率对综合效率值的变化影响最大。

5 结 论

本文将不同时段的航班计划建模成有向加权网络,从结构和功能的角度提出航班计划网络的综合效率指标,并构建基于航班重分配策略的航班计划网络动态鲁棒性的评估方法,对中国航班计划网络的鲁棒性进行分析。

(1)当蓄意攻击机场时,网络的综合效率大幅下降,尤其高峰时段航班计划网络的鲁棒性最差。对于高峰时段,尽管被攻击机场的起飞容量损失率很小,也会对全国航班运行产生重大影响。因此,高峰时段内关键机场出现较小故障也可能导致航空网络的大面积瘫痪。同时,不同指标权重的设置,对鲁棒性较差时段的识别影响较小。另外,蓄意攻击下,挖掘出7个关键机场,当其中机场遭受攻击时,航班计划网络的综合效率会大幅下降。因此,实际运行中,应避免超过7个关键机场同时被攻击。

(2)当随机攻击机场时,不同时段的航班计划网络均具有较强的鲁棒性,且变化不大,主要在6:00~7:00的鲁棒性最差。随机攻击下,攻击机场数在20以内时,各时段综合效率指标均无显著变化。当受攻击机场不是关键机场时,网络综合效率便不会遭受太大影响。因此,在非关键机场遭受小幅度的攻击时,不必采用过多的干预,航班计划网络具有一定的自身调节功能。

(3)以往有关鲁棒性分析,主要从静态角度将受攻击节点及其相关流量直接移除,缺乏一定的合理性。本文首次将动态交通分配的思想应用于航班计划网络鲁棒性分析过程中,后续将进一步对航班重分配策略进行完善。

(4)该鲁棒性分析方法可用于指导全国航班计划的编制,可构建以容量利用率和鲁棒性等为目标的航班计划多目标优化模型;所挖掘的航班计划网络鲁棒性的时空规律,可用于对实际运行中航班计划网络鲁棒性的预测,以便提前采取航班调整措施,避免大面积航班延误的发生。

参考文献:

[1] 陈娟. 联盟背景下国际航线网络与航班计划优化设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020: 3-11.

CHEN Xian. Research on optimal design of international airline network and flight schedule within airline alliances[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020: 3-11.

[2] 王哲, 李建华, 康东. 基于极大连通子图边界的复杂网络恢复研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(12): 2306-2316.

WANG Zhe, LI Jianhua, KANG Dong. Research on recovering of complex networks based on boundary nodes of giant connected component[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(12): 2306-2316.

[3] BWLLINGERI M, CASSI D. Robustness of weighted networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 489: 4755.

[4] 李昂, 聂党民, 温祥西, 等. 管制-飞行状态相依网络演化过程[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 324726.

LI Ang, NIE Dangmin, WEN Xiangxi, et al. Evolution process of control-aircraft state interdependent network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 324726.

[5] 李从东, 李文博, 曹策俊, 等. 面向级联故障的相依网络鲁棒性分析[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 538-548.

LI Congdong, LI Wenbo, CAO Cejun, et al. Robustness analysis of interdependent networks for cascading failure[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 538-548.

[6] 戢晓峰, 孔令帅, 陈方. 铁路大宗货物运输网络结构及流动空间格局——以云南省为例[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 21-29.

Ji Xiaofeng, KONG Lingshuai, CHEN Fang. Railway bulk cargo transport network structure and flow spatial pattern in Yunnan province[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(2): 21-29.

[7] 徐凤, 朱金福, 苗建军. 基于复杂网络的空铁复合网络的鲁棒性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015, 12(1): 40-45.

XU Feng, ZHU Jinfu, MIAO Jianjun. The robustness of high-speed railway and civil aviation compound network based on the complex network theory[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2015, 12(1): 40-45.

[8] 刘泽羲. 基于多层复杂网络的海运网络及其鲁棒性分析[D]. 天津: 天津大学, 2018.

LIU Zexi. Maritime network and its robustness analysis based on multilayer complex networks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

[9] PENG P, CHENG S F, CHEN J H, et al. A fine-grained perspective on the robustness of global cargo

- ship transportation networks[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(7): 881-899.
- [10] 余森彬. 交通网络重要点边识别方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 1-6.
YU Senbin. Identifying vital nodes and edges in transportation networks[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 1-6.
- [11] 田杭, 郭瑞军. 基于网络负载容量模型的城市路网级联失效研究[J]. *大连交通大学学报*, 2019, 40(6): 15-20.
TIAN Hang, GUO Ruijun. Study of urban road network cascading failure based on network load capacity model[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2019, 40(6): 15-20.
- [12] LORDAN O, SALLAN J M, SIMO P, et al. Robustness of the air transport network[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 68(68): 155-163.
- [13] CHEN Y, WANG J E, JIN F J. Robustness of China's air transport network from 1975 to 2017[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 539: 122876.
- [14] 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.
CHEN Yu, WANG Jiaoe, JIN Fengjun. Robustness and fragility of chinese air transport network[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(3): 59-64.
- [15] 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.
WANG Shijin, SU Siyu, LI Haiyun, et al. Robustness optimization of air route network topology based on PCNC[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 51(6): 756-762.
- [16] SUN X Q, GOLLNICK V, WANDEL T S. Robustness analysis metrics for worldwide airport network: A comprehensive study[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(2): 500-512.
- [17] ZHOU Y M, WANG J W, HUANG G Q. Efficiency and robustness of weighted air transport networks[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 122: 14-26.
- [18] 姚红光, 朱丽萍. 基于仿真分析的中国航空网络鲁棒性研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2012, 36(1): 42-46.
YAO Hongguang, ZHU Liping. Research on robustness of China's aviation network based on simulation analysis[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2012, 36(1): 42-46.
- [19] HE Z W, LIU S, ZHAN M. Dynamical robustness analysis of weighted complex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2013, 392(18): 4181-4191.
- [20] LI S M, XU X H. Vulnerability analysis for airport networks based on fuzzy soft sets: From the structural and functional perspective[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(3): 780-788.
- [21] 朱星辉, 朱金福, 高强. 基于航班纯度的鲁棒性机型指派问题研究[J]. *预测*, 2011, 30(1): 71-74.
ZHU Xinghui, ZHU Jinfu, GAO Qiang. The research on robust fleet assignment problem based on flight purity[J]. *Forecasting*, 2011, 30(1): 71-74.
- [22] WANG X L, HE M. Influential node ranking and invulnerability of air traffic cyber physical system[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 38(2): 288-297.
- [23] LATORA V, MARCHIORI M. Efficient behavior of small-world networks[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(19): 1-4.
- [24] 杨学兵. 我国世界级机场群聚类分析与精准施策研究[J]. *民航管理*, 2020(4): 48-54.
YANG Xuebing. Cluster analysis and precise strategy research of world-class airports group in China[J]. *Civil Aviation Management*, 2020(4): 48-54.

(编辑:刘彦东)