

空铁综合运输网络互补作用分析

王飞¹, 伍加伟², 黄宝军¹

(1. 中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300; 2. 四川机场集团西昌青山机场分公司, 四川 西昌 615013)

摘要:为更好地发挥航空运输和高铁运输的优势, 本文研究了空铁综合运输网络的互补作用。首先, 以城市为节点, 以航线/高铁线路为边, 以单日航班频率/高铁班次频率为权值, 构建了航空网络、高铁网络和空铁综合运输网络。其次, 采用枚举法和遗传算法, 基于网络加权效率研究了网络的鲁棒性, 并识别出网络关键节点组合。再次, 针对随机节点失效和关键节点失效两种情况, 分别从鲁棒性、互补强度两个方面研究了高铁网络和航空网络的互补作用。结果显示: 空铁综合运输网络的加权效率为 0.317, 明显高于航空网络 0.268 和高铁网络 0.209, 当独立的高铁网络不连通时, 空铁综合运输网络仍然连通; 当随机节点和关键节点失效时, 高铁子网络对航空子网络的互补强度平均值分别为 0.072 和 0.435, 航空子网络对高铁子网络的互补强度平均值分别为 0.217 和 0.368, 关键节点失效时的互补作用更强。结果表明, 空铁综合运输网络结合了航空网络和高铁网络的优势, 具备更好的鲁棒性, 航空网络和高铁网络能够发挥互补作用, 且当关键节点失效时, 互补作用更为明显。

关键词: 综合运输; 空铁综合运输网络; 加权网络; 鲁棒性; 互补强度

中图分类号: U113 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2024)05-0083-06

Analysis of the complementary effect of air-rail integrated transportation network

WANG Fei¹, WU Jiawei², HUANG Baojun¹

(1. College of Air Traffic Management, CAUC, Tianjin 300300, China; 2. Xichang Qingshan Airport, Sichuan Airport Group Co., Ltd., Xichang 615013, Sichuan, China)

Abstract: To better leverage the advantages of aviation and high-speed rail transportation, the complementary effect of air-rail integrated transportation network was studied. Firstly, the aviation network, high-speed rail network, and air-rail integrated transportation network were constructed with cities as nodes, airline/ high-speed rail route as edges, and daily flight frequency/high-speed rail frequency per day as weights. Secondly, using enumeration method and genetic algorithm, the robustness of the network was studied based on network weighted efficiency, and critical node combinations of the network were identified. Thirdly, the complementary effect of the high-speed rail network and aviation network was investigated from two perspectives of robustness and complementary strength under two scenarios of random node failure and critical node failure. The results showed that the weighted efficiency of the air-rail integrated transportation network was approximately 0.317, which is significantly higher than that of the aviation network (0.268) and the high-speed rail network (0.209). When the independent high-speed rail network was not connected, the air-rail integrated transportation network remained connected. Under random node failure and critical node failure, the average complementary strength of the high-speed rail sub-network to the aviation sub-network is 0.072 and 0.435, respectively and the average complementary strength of the aviation sub-network to the high-speed rail sub-network is 0.217 and 0.368, respectively, with stronger complementary effect observed under critical node failure. The results indicated that the air-rail integrated transportation network combined the advantages of the aviation network and high-speed rail network, with better robustness. Aviation network and high-speed rail network can play complementary effect and its complementary effect is more pronounced under critical node failure.

Key words: integrated transport; air-rail integrated transportation network; weighted network; robustness; complementary strength

收稿日期: 2023-10-30; 修回日期: 2024-02-06

基金项目: 天津市应用基础研究多元投入基金重点项目(21JCZDJC00840); 中央高校基本科研业务费专项(3122019129)

作者简介: 王飞(1982—), 男, 安徽凤阳人, 副教授, 博士, 研究方向为空中交通管理。

随着中国国民经济的快速发展,人民群众对出行的需求呈现出跨区域、多方式、高品质、个性化、便捷性的趋势特征,单一的交通方式已不能满足这种日益增长的多层次需求。对于中长途运输来说,相较于公路运输,航空运输和高铁运输在便捷性、舒适性等方面具有明显优势,是中长途运输中最具代表性的两种运输方式。结合两者优势构建的空铁综合运输网络,是国家综合立体交通网络的重要组成部分,将极大地便捷旅客出行,具有重要的战略意义和现实作用。

空铁综合运输系统最突出的优势在于航空和高铁两个交通系统的互补作用。Miller^[1]指出交通系统的互补作用就是在一个系统中断或失效的情况下,另一个系统可以提供替代服务,将乘客和货物运送到其所期望的位置。交通系统互补作用的研究方法主要有两种:基于经济学的方法和基于交通网络的方法。基于经济学的方法主要从提高服务频率、减少交通拥堵等角度进行研究。Albalade^[2]以航空公司的服务频率和可用座位数为目标函数构建模型,研究表明高铁的互补作用可以为枢纽机场的长途航线提供补充服务;Takebayashi^[3]分别通过理论分析和数值模拟对航空公司和高铁运营商的合作行为进行了研究,提倡建设多级枢纽系统来强化高铁网络与航空网络的互补作用,以减少枢纽拥堵;Zhang^[4]采用计量经济学方法量化高铁对航空运输的互补作用,并指出高铁对中国内地较远距离(1 000 km 以上)市场的航空交通有积极影响。基于交通网络的方法主要从网络拓扑结构、网络脆弱性和鲁棒性等角度进行研究。如对于地铁、公交、轻轨等组成的城市公交系统,以地铁站和公交站为节点,公交线路和地铁线路为边来构建交通网络,通过不同情况下网络性质的变化来研究公交网络和地铁网络的互补作用。Berche^[5]通过分析全球 14 个主要城市的公交系统和地铁系统在随机故障和蓄意攻击下的脆弱性,来研究公共交通系统的互补作用;Cats^[6]通过分析由地铁网络、主干线公交网络和轻轨列车网络组成的公共交通系统的脆弱性,研究了地铁网络、轻轨网络和公交网络三者之间的动态互补作用;Yang^[7]基于复杂网络研究了北京地铁网络和公交网络互补作用下的级联故障和统计学特性;Hong^[8]基于拓扑可达性构建公交子网络和地铁子网络组成的城市交通网络,来研究二者的互补作用。在借鉴公共交通系统研究成果的基础上,针对空铁综合交通系统的互补作用,部分学者进行了探索性研究。Ouyang^[9]以火车站和机场为节点,构建无向无权网络,以脆弱

性指标量化铁路网络和航空网络的互补作用,用以识别综合运输网络的关键节点;Jiang^[10]构建以城市为节点的无向无权网络,通过分析成本函数指出,由于高铁对航空的互补作用,航空网络将从完全连接型转变到轮辐型;Li^[11]提出了以城市为节点,两地旅行时间为权重的加权网络,通过网络弹性来研究高铁系统和航空系统的互补作用;彭小晗^[12]基于节点可达性和网络脆弱性来研究长三角城市群和主要一线城市的空铁综合运输网络的互补作用。

基于经济学的方法侧重于宏观分析高铁和航空的竞合关系,进而指出两者可互为补充;基于交通网络的方法能定量计算交通系统的互补作用,更好地体现综合运输系统本身的特征。因此,本文采用基于交通网络的方法进行分析。

目前,对于空铁综合运输系统互补作用的研究还不充分,主要是构建无权或以旅行时间为权值的网络。无权网络侧重于通过分析网络覆盖范围来优化机场或高铁站布局,以旅行时间为权值的网络更适用于最优出行路径的选择,这两种网络都不能反映旅客对于高铁或航班中转便捷性的本质性要求。本文以有高铁站/机场的城市为节点,两城市间高铁线路/航线为边,以两城市间单日高铁班次频率/航班频率为权值,分别构建高铁运输网络和航空运输网络,并复合而成空铁综合运输网络,然后基于加权效率来分析网络鲁棒性,最后基于鲁棒性计算互补强度,来定量分析航空网络和高铁网络的互补作用。

1 空铁综合运输网络构建

空铁综合运输系统的互补作用主要体现在旅客出行的便捷性,距离、时间、航班/车次频率等都是重要的影响因素,因此加权网络更为适用。本文以单日航班频率/高铁班次频率为权值,可以更为直观地表现两城市交通运输联系的紧密程度。通常来说交通网络的路径是双向的,因此本文构建的网络是无向加权网络。

空铁综合运输网络是由高铁子网络和航空子网络复合而成。高铁加权网络由 $G_h = (N_h, E_h, W_h)$ 表示, N_h 表示有高铁站的城市集合, E_h 表示高铁线路集合, W_h 表示两城市间单日高铁班次频率的集合。航线加权网络由 $G_a = (N_a, E_a, W_a)$ 表示, N_a 表示有机场的城市集合, E_a 表示航线集合, W_a 表示两城市间单日航班频率的集合。

本文应用 python 在网上抓取了 2023 年 3 月 4 日的 17 901 条数据(不含香港、澳门、台湾地区),包括

183 个城市间的 11 781 条航线数据, 以及 157 个城市间 C、D 和 G 系列的 6 120 条高铁数据(不含海南环岛高铁), 从而构建高铁网络、航空网络和空铁综合运输网络, 如图 1—图 3 所示。

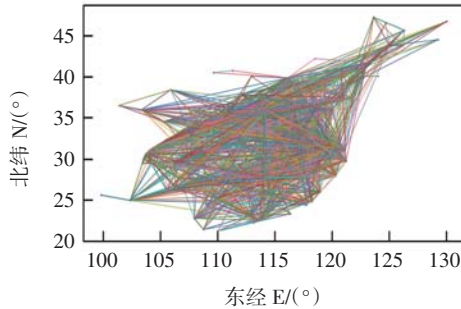


图 1 高铁网络图

Fig.1 Diagram of high-speed rail network

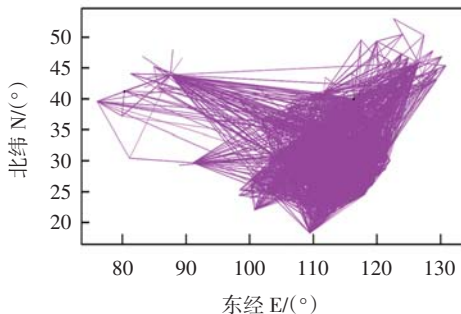


图 2 航空网络图

Fig.2 Diagram of aviation network

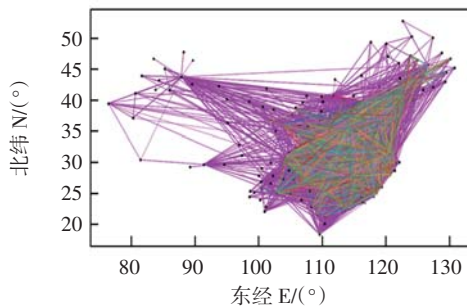


图 3 空铁综合运输网络图

Fig.3 Diagram of air-rail integrated transportation network

从图 1 可以看出, 中国的高铁网络主要联通了东部和中部地区的中小型城市, 西部地区极为稀疏, 说明中国高铁“八纵八横”布局虽已初具规模, 但仍需要进一步完善。从图 2 可以看出, 中国的航空网络覆盖了全国大型城市和省会城市, 尤其在东部和中部地区更为密集, 在西部地区也具有一定规模。从图 3 可以看出, 中国的航空网络相对于高铁网络覆盖范围更广。此外, 有些城市间只通高铁, 如成都至眉山, 而有些城市只有航线, 如成都至拉萨, 因此眉山至拉萨则必须换乘。总的来说, 中国高铁网络和航空网络都存在区域性聚集, 在覆盖范围上达到了高铁和航空的互

补, 使得更多城市能够互联互通, 旅客出行更加便捷。

2 基于鲁棒性的关键节点识别

当空铁综合运输网络被破坏时, 互补作用会使一个系统网络帮助另一个系统网络正常运行。而当网络被破坏时, 其维持原有性能的能力就是网络的鲁棒性。且当网络的关键节点被破坏时, 网络性能下降最为显著, 而互补作用作为维持综合运输系统性能的重要因素, 在关键节点被破坏时也最能得到体现。因此, 互补作用的研究可以从网络的鲁棒性和关键节点入手。

2.1 鲁棒性指标

表征鲁棒性的指标很多, 本文采用 Zhou 等^[13]提出的网络加权效率 (WE, weighted efficiency) 指标, 计算过程为

$$WE = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in N} \frac{1}{\sum_{l \in L_{ij}} \frac{1}{w_l}} \quad (1)$$

$$R = \frac{WE_d}{WE_n} \quad (2)$$

式中: n 表示节点总数; N 表示所有节点的集合; L_{ij} 表示节点 i 和节点 j 的最短路径集合; l 表示 L_{ij} 中的元素; w_l 表示 l 的边权; WE_d 表示网络节点被破坏后, 剩余网络的加权效率; WE_n 表示完整网络的加权效率; R 表示网络鲁棒性, R 值越大, 鲁棒性越强。

2.2 关键节点识别方法

关键节点就是当网络节点失效时, 造成网络鲁棒性下降最为严重的点。可以是 1 个节点失效, 也可以是多个节点同时失效。当节点数量较少时, 可以采用枚举法获得关键节点, 但当多个节点同时失效时, 枚举法存在节点组合数过多、搜索过慢的问题, 可以采用遗传算法来搜索关键节点, 具体步骤如下。

(1) 染色体设置: 染色体长度为节点数, 每个基因是节点编号, 基因编码为 0 或 1, 1 表示保留该节点, 0 表示删除该节点, 并删除相应的边。

(2) 适应度计算: 用 1 减去删除节点后网络加权效率与原始网络加权效率之间的商, 将这个差值作为个体的适应度。

(3) 选择: 根据个体的适应度, 从当前种群中选出两个父代染色体。

(4) 交叉: 采用单点交叉得到一个新的子代, 如果出现重复的染色体, 则重新交叉。

(5) 变异: 以一定概率改变染色体的某些基因, 使

其从 0 变为 1 或者从 1 变为 0。

(6)替换:用新的子代替换掉原有的父代,从而更新整个种群。

(7)迭代:不断重复步骤(2)~(6),直到达到预设的最大迭代次数,输出最优解。

本文设置种群大小为 100,迭代次数为 200,交叉概率为 0.8,突变概率为 0.1。按照上述步骤,可以识别出网络的关键节点。

2.3 结果分析

空铁综合运输网络未被破坏时,高铁网络 WE 为 0.209,航空网络 WE 为 0.268,空铁综合运输网络 WE 最高,为0.317,说明网络未被破坏时,空铁综合运输网络连通性更好,旅客在城市间的流动更为便利。当失效关键节点数量为 1~4 个时,采用枚举法获得关键节点,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,当 4 个以内的节点组合被破坏时,空铁综合运输网络的 R 都为最大,表明空铁综合运输网络相较于独立的高铁和航空网络具有更强鲁棒性。

表 1 失效关键节点的识别(1~4 个)

Tab.1 The identification of critical nodes failures (1-4)

节点数/个	指标	高铁网络	航空网络	空铁综合运输网络
1	失效关键节点	北京	乌鲁木齐	广州
	鲁棒性 R	0.988	0.969	0.993
2	失效关键节点	北京,深圳	乌鲁木齐,南宁	广州,上海
	鲁棒性 R	0.972	0.965	0.993
3	失效关键节点	北京,深圳,沈阳	乌鲁木齐,南宁,武夷山	上海,成都,沈阳
	鲁棒性 R	0.956	0.960	0.992
4	失效关键节点	北京,开封,沈阳,上海	乌鲁木齐,上海,淮安,绵阳	广州,上海,成都,北京
	鲁棒性 R	0.939	0.957	0.992

当失效节点超过 4 个时,采用遗传算法搜索关键节点,计算得到的网络鲁棒性变化情况,如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着失效节点的增加,3 个网络的鲁棒性整体上都呈下降趋势;当失效的关键节点数量相同时,空铁综合运输网络的鲁棒性最高,其次是航空网络,最后是高铁网络。高铁网络在失效的关键节点约为 75 个时鲁棒性降为 0;航空网络在失效的关键节点约为 85 个时鲁棒性降为 0;当失效的节点数量超过 85 个时,独立的高铁网络、航空网络的鲁棒性指标为 0,此时这两个网络已不是完全连通的网络,部分节点孤立不可达,而空铁综合运输网络的所有节点相互可达,这也说明高铁子网络和航空子网络的互补作用使得空铁综合运输网络具有更强的鲁棒性。

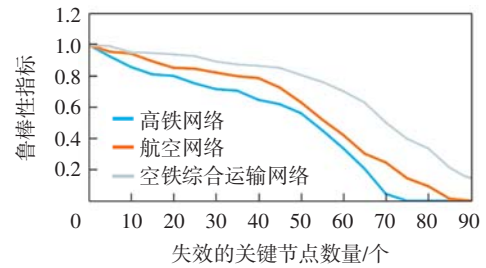


图 4 不同数量关键节点失效鲁棒性指标变化

Fig.4 The change of robustness indicators under different numbers of critical node failures

3 针对节点失效的互补作用分析

为了研究高铁子网络和航空子网络在空铁综合运输网络中的互补作用,本文在鲁棒性基础上引入了互补强度指标,用以定量分析互补作用。

根据互补作用,一个同时具有高铁和机场的城市节点,其航空子网络节点失效时,与该节点相连的所有航线边被删除,其高铁边代替航线边进入航空子网络;同理,其高铁子网络节点失效时,与该节点相连的所有高铁边被删除,其航线边代替高铁边进入高铁子网络。

通常来说,网络存在随机攻击和蓄意攻击两种情况,蓄意攻击的目的是使得网络性能迅速下降,本文中的关键节点失效会严重降低网络性能,因此本文中的蓄意攻击对象假定为网络的关键节点。本文基于随机节点失效和关键节点失效,分别计算互补作用下的网络鲁棒性和互补强度,来分析两个子系统的互补作用。

3.1 基于鲁棒性的互补作用分析

图 5 表示随机节点失效时,互补作用对高铁子网络和航空子网络鲁棒性的提升。图 6 表示关键节点失效时,互补作用对高铁子网络和航空子网络鲁棒性的提升。

从图 5 可以看出,当高于 10%的随机节点失效时,互补作用下的高铁子网络鲁棒性开始明显高于独立高铁网络;互补作用下的航空子网络鲁棒性提升不显著,但保持不低于独立航空网络的态势。高铁网络和航空网络的节点分别被删除 80%和 85%时,鲁棒性降为 0,整个网络存在互不可达的节点。而在互补作用下,这一比例分别被提升到了 85%和 90%,说明互补作用可以使得不连通的网络变得重新连通,节点间重新相互可达。

从图 6 可以看出,在关键节点失效的情况下,互补

作用对高铁网络鲁棒性的提升始终比较明显;当 40 个关键节点失效后,互补作用对于航空网络鲁棒性有明显提升。当高铁网络和航空网络分别有 70、85 个关键节点失效时,鲁棒性降为 0,网络不再连通。而在互补作用下,高铁子网络和航空子网络失效关键节点数量分别提升至 85、90 个时,鲁棒性降为 0,同样说明互补作用使得不连通网络重新连通起来。

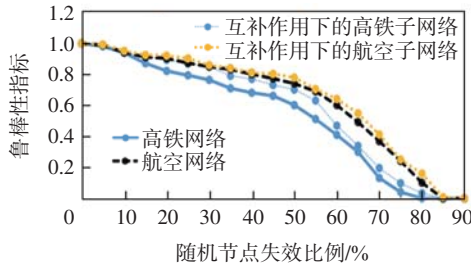


图 5 随机节点失效时网络的鲁棒性变化

Fig.5 Variation of network robustness under random node failure

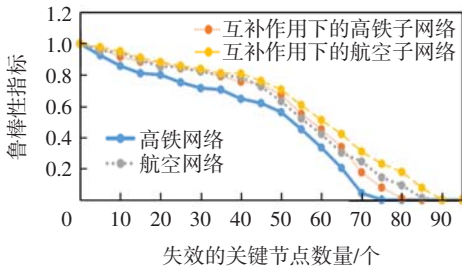


图 6 关键节点失效时网络的鲁棒性变化

Fig.6 Variation of network robustness under critical node failure

对比图 5 和图 6 可以看出,相较于随机节点失效,关键节点失效时,无论是高铁网络还是航空网络,互补作用对鲁棒性提升都更为明显。

3.2 基于互补强度的互补作用分析

Ouyang 等^[9]针对无权交通网络提出了基于脆弱性的互补强度指标。本文研究的是加权交通网络,并且考虑到互补作用指的是一个系统被破坏后另一个系统对其能力的维持和提升,即鲁棒性,因此,本文建立了基于鲁棒性的互补强度指标,计算过程如下

$$S_{h \rightarrow a} = \frac{R_{ha,a} - R_a}{R_a} \quad (3)$$

$$S_{a \rightarrow h} = \frac{R_{ha,h} - R_h}{R_h} \quad (4)$$

式中: $S_{h \rightarrow a}$ 和 $S_{a \rightarrow h}$ 分别表示高铁子网络对航空子网络和航空子网络对高铁子网络的互补强度; $R_{ha,a}$ 和 $R_{ha,h}$ 分别表示空铁综合运输网络中航空子网络和高铁子网络的鲁棒性; R_a 和 R_h 分别表示独立航空网络和独立高铁网络的鲁棒性。

为了更为直观地量化互补作用的强弱,在鲁棒性

基础上根据式(3)和式(4)分别对两种情况下的互补强度进行计算。考虑到当高铁网络、航空网络不连通时,互补强度计算公式分子为 0,互补强度趋近无限大,因此,本文只对鲁棒性降为 0 之前的情况进行分析。计算结果如图 7、图 8 所示。

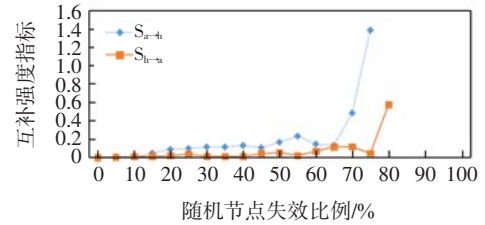


图 7 随机节点失效时的互补强度量化

Fig.7 Quantification of complementary strength under random node failure

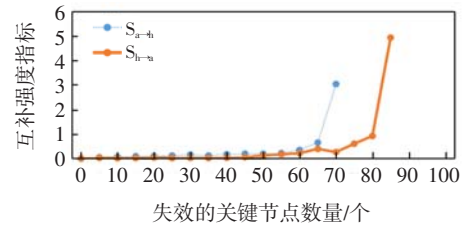


图 8 关键节点失效时的互补强度量化

Fig.8 Quantification of complementary strength under critical node failure

从图 7 可以看出,不同比例的随机节点失效时,高铁子网络和航空子网络的互补强度总体上都是呈上升趋势,并且都是在子网络接近不连通时达到最大,这是因为不连通的网络鲁棒性接近于 0,互补作用能将原本不连通的网络重新连通,对于网络鲁棒性的提升更为显著。 $S_{a \rightarrow h}$ 曲线明显高于 $S_{h \rightarrow a}$ 曲线,说明航空子网络对高铁子网络的互补强度更为显著,这是因为独立航空网络相较于独立高铁网络节点数量更大,节点间连接更丰富,加权效率更高,使得航空子网络对高铁子网络鲁棒性的提升更高。 $S_{a \rightarrow h}$ 最大值约为 1.4, $S_{h \rightarrow a}$ 最大值约为 0.6。

从图 8 可以看出,在少于 70 个关键节点失效时, $S_{a \rightarrow h}$ 都高于 $S_{h \rightarrow a}$,说明航空子网络对高铁子网络的互补强度更高;失效关键节点达到 70 个时,高铁子网络不连通,在航空子网络互补作用下 $S_{a \rightarrow h}$ 达到最大值约为 3.1。随着失效关键节点增加至 85 个,航空子网络不连通,在高铁子网络互补作用下 $S_{h \rightarrow a}$ 达到最大值约为 5.0。可以看出, $S_{h \rightarrow a}$ 最大值高于 $S_{a \rightarrow h}$ 最大值,这是因为航空网络本身的鲁棒性强,使得网络鲁棒性下降更为缓慢,导致当更多的关键节点失效时,高铁子网络对航空子网络还存在显著的补充作用。

对比图 7 和图 8 可以看出,关键节点失效的情况下, S_{h-a} 和 S_{a-h} 最大值增长显著,说明关键节点失效时,互补作用表现得更为明显。除最大值外,计算 2 种情况下互补强度的平均值,如表 2 所示。

表 2 2 种情况下互补强度平均值

Tab.2 Average complementary strength under two scenarios

情况	S_{a-h} 平均值	S_{h-a} 平均值
随机节点失效	0.217	0.072
关键节点失效	0.368	0.435

从表 2 可以看出,关键节点失效时,两种互补强度的平均值都明显高于随机节点失效时互补强度的平均值,说明关键节点失效虽然会导致网络鲁棒性下降加速,但互补强度提升也更为明显,这是因为一个子网络中的关键节点在另一个子网络中并不一定是关键节点,一个子网络的关键节点的失效对另一个子网络影响并不大。例如:根据遗传算法搜索的高铁网络的最关键的 5 个节点是北京、深圳、开封、沈阳、温州;航空网络最关键的 5 个节点是乌鲁木齐、南宁、淮安、武夷山、上海。所以,当高铁网络的 5 个关键节点失效时,对航空网络鲁棒性的影响并不大,可以发挥航空网络对高铁网络的补充作用,提升综合运输网络的鲁棒性。

4 结语

通过对空铁综合运输网络中高铁子网络和航空子网络互补作用的研究,可以得出以下结论。

(1)相较于独立高铁网络和航空网络,空铁综合运输网络具有更高的加权效率,并且当网络被蓄意破坏时,其鲁棒性更强。此外,在空铁综合运输网络中考虑了互补作用后,导致网络不连通的失效节点数量阈值被提升,体现了空铁综合运输网络在鲁棒性上的优势。

(2)综合运输网络中高铁子网络对航空子网络的互补作用低于航空子网络对高铁子网络的互补作用。关键节点失效时的互补作用十分显著,因此对关键节点的保护尤为重要。

本文中关键节点的识别方法完全基于网络结构的鲁棒性,并未考虑节点间的地理位置,即地域性。在现实中,往往外力破坏的是地理位置相近的区域机场/高铁,比如暴雪导致华东地区交通设施瘫痪。下一步将研究考虑网络结构和地理位置的关键区域节点识

别方法。

参考文献:

- [1] MILLER E. Twenty-first century urban mobility: multi-modal, inclusive and sustainable[J]. Journal of Transport Geography, 2009, 17(5): 343-350.
- [2] ALBALATE D, BEL G, FAGEDA X. Competition and cooperation between high-speed rail and air transportation services in Europe[J]. Journal of Transport Geography, 2015, 42: 166-174.
- [3] TAKEBAYASHI M. How could the collaboration between airport and high speed rail affect the market[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 92: 277-286.
- [4] ZHANG F N, GRAHAM D J, WONG M S C. Quantifying the substitutability and complementarity between high-speed rail and air transport[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 118: 191-215.
- [5] BERCHE B, VON FERBER C, HOLOVATCH T, et al. Resilience of public transport networks against attacks[J]. The European Physical Journal B, 2009, 71(1): 125-137.
- [6] CATS O, JENELIUS E. Vulnerability analysis of public transport networks: a dynamic approach and case study for Stockholm[C]//The 5th International Symposium on Transportation Network Reliability, Hong Kong, June 16, 2012.
- [7] YANG Y, HUANG A L, GUAN W. Statistic properties and cascading failures in a coupled transit network consisting of bus and subway systems [J]. International Journal of Modern Physics B, 2014, 28(30): 1450212.
- [8] HONG L, YAN Y Z, OUYANG M, et al. Vulnerability effects of passengers' intermodal transfer distance preference and subway expansion on complementary urban public transportation systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 158: 58-72.
- [9] OUYANG M, PAN Z Z, HONG L, et al. Vulnerability analysis of complementary transportation systems with applications to railway and airline systems in China[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 142: 248-257.
- [10] JIANG C M, ZHANG A M. Airline network choice and market coverage under high-speed rail competition[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 92: 248-260.
- [11] LI T, RONG L L. Resilience of air transport network with the complementary effects of high-speed rail network[C]//2019 IEEE 19th International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C), July 22-26, 2019, Sofia, Bulgaria. IEEE, 2019: 348-353.
- [12] 彭小晗. 互补高铁与航空交通系统的脆弱性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [13] ZHOU Y M, SHEU J B, WANG J W. Robustness assessment of urban road network with consideration of multiple hazard events[J]. Risk Analysis: an Official Publication of the Society for Risk Analysis, 2017, 37(8): 1477-1494.

(责任编辑:明 月)