

考虑互补效率的城市群综合客运网络 可靠性研究*

赵雅宁¹, 孟庆虎², 李成兵¹, 刘曙瑄¹, 韩佳¹

(1. 内蒙古大学交通学院, 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古自治区交通运输事业发展中心, 呼和浩特 010020)

摘要:分析城市群客运网络中不同交通模式在面对攻击时互补效应对网络可靠性的影响。首先,采用复杂网络理论中的Space L建模方法构建综合客运网络模型,考虑时间与流量标定网络边权与点权。然后,提出考虑时间加权的网络相对时间效率与流量加权的最大连通子图的相对大小作为网络可靠性评价指标。引入引力模型计算节点失效之后其他网络节点产生的互补功能,并计算动态互补强度来量化交通网络间的互补作用。最后,以呼包鄂乌城市群为实例进行仿真研究。结果表明,考虑互补效应的网络在面对攻击时能够保持更高的性能水平;普铁网络在节点攻击中断后能够从其他网络中获得较强的互补网络相对时间效率,约为56.76%;高铁网络在节点攻击中断后能够从其他网络中获得较强的互补最大连通子图的相对大小,约为35.17%。

关键词:城市群;综合客运网络;可靠性;互补效应

中图分类号:U113 **文献标志码:**A

城市的快速发展使得客运交通网络变得越来越复杂,城市之间的联系变得紧密,在全球化和区域一体化的大趋势下,城市群是未来城市发展的主要形态。然而,网络越复杂,遭遇自然灾害、人为破坏或公共卫生危机等突发事件时的维护工作就越难,因此,对城市群客运网络可靠性的研究越来越重要。

近年来,学者以复杂网络理论为基础,对网络可靠性开展了十分广泛的研究。曾俊伟等^[1]依据复杂网络理论,建立城市公共交通网络连通可靠性的分析模型,表明网络拓扑结构与节点脆弱性对系统稳定性的影响颇为显著。马书红等^[2]基于复杂网络框架,整合公路、铁路和航空三大运输系统的拓扑属性,通过模拟风险扩散过程,揭示网络韧性随节点失效时的变化规律。吕文红等^[3]系统解析复杂网络理论在运输系统可靠性研究中的演化情况,构建多维指标衡量体系,为后续研究给出示范样本。马敏等^[4]和杨吉凯等^[5]将Space L建模方法与客流的时空分布特点相结合,全面探究不同攻击策略下城市轨道交通网络的抗毁能力。李成兵等^[6-7]通过多节点耦合提出基于容量-负荷理论的路网级联失效模型,探讨动态负载再分配策略。吴志龙等^[8]构建加权双层城市交通网络模型,将复杂网络理论与非线性负载-容量模型相结合,引入失效阈值量化节点失效概率,结果表明不同攻击方式和失效阈值显著影响网络可靠性。另外,一些学者对可靠性模型^[9]、韧性优化^[10]、节点重要度^[11]和时间特性^[12]等指标进行了深入研究。

* 收稿日期:2025-04-12; 修回日期:2025-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(62063023);内蒙古自然科学基金项目(2023MS05036);内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT22099)

作者简介:赵雅宁(2001—),女,河北张家口人,2023级硕士研究生。E-mail:1785221839@qq.com

通信作者:李成兵(1982—),男,安徽安庆人,教授,博士。主要从事交通运输系统仿真与优化研究。E-mail:bingbingnihao2008@126.com

在已有研究的基础上,本文进一步研究交通网络中的互补效应,即不同交通网络之间通过提供替代服务以保持网络的正常运作。以公交-地铁^[13]和高铁-航空^[14-15]双层网络为例,实证说明在各种灾害情景下双层网络比单一网络的性能损失更小。Yang等^[16]通过构建公交轨道协同运作网络模型,揭示多模式交通网络协同的规律。Hong等^[17]提出基于乘客换乘偏好的多模式交通互补模型构建方法,阐明了异质性攻击策略对网络脆弱性的影响机制。Feng等^[18]从灾前应对角度出发,构建一个三级模型用于优化预防资源配置,将高铁与航空系统视为一体化运输网络进行有限预防资源的分配,旨在最小化最严重故障情景下无法满足的出行需求。Ouyang等^[19]针对我国陆空联运构建互补网络系统,提出互补量化指标,揭示不同攻击模式下交通系统的脆弱性变化。肖明辉^[20]基于级联失效模型揭示区域攻击下的互补效应,但其影响程度大小的问题没有解决。对此,马飞等^[21]创新提出互补强度指标,为多模式协同优化提供量化方法。汤洪霞等^[22]运用复杂网络理论,明确网络互补规则,构建城市群多模式交通网络模型,深入探究节点失效对网络性能的影响机制。

在现有研究中,针对客运网络的建模方法、复杂网络理论应用以及可靠性分析等,大多集中于对网络拓扑结构的研究。在客运网络模型构建方面,现有研究多从复合视角出发,较少深入探讨不同运输方式之间的异质性与互补性,与实际情况不符。在城市群的实际出行场景中,出行者的核心诉求在于实现跨城市出行,城市内部的换乘是达成该目标的手段,城内换乘线路与城际交通线路存在本质区别,二者属于不同的层级范畴。因此,本文创新性地构建一个分层综合客运网络模型,在层间建立连边(连边代表城市内部换乘),旨在深入分析不同运输方式之间的互补效应。引入动态互补强度的概念,以精准量化不同交通网络之间的互补作用。通过模拟随机攻击和蓄意攻击策略,评估网络在不同攻击情境下的效率变化和连通性表现。该研究方法能够有效揭示不同攻击方式下各类网络受影响程度的显著差异,并据此识别最脆弱的交通方式,最终为城市群客运网络的优化与可靠性提升提供新的理论依据和实践指导。

1 城市群综合客运网络模型构建

1.1 客运子网模型构建

交通网络模型的构建一般采用Space P和Space L两种建模方法。对于Space P方法,若两个站点处于同一路线之上,即使它们之间不存在直达关系,网络中也存在一条边连接。而对于Space L方法,仅在两个站点之间存在直达线路时才会生成一条边。以铁路系统为例,构建并绘制基于两种不同建模方法的网络结构示意图,如图1所示。

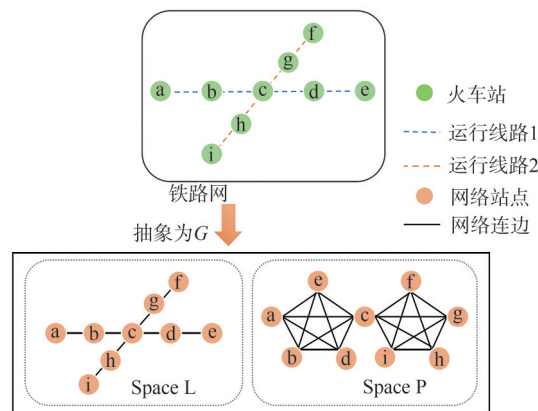


图1 Space P和Space L模型构建示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of Space P and Space L model

城市群间主要有4种公共交通方式:铁路、公路、航空和水运。客运网络由火车站、汽车站、机场和港口等客运场站及铁路、公路、航线和水运等连接线路组成。采用多层网络建模方法,以复杂网络理论中Space L建模方法为基础,将城市群内的火车站、汽车站、机场和港口等作为网络节点,并按类

型进行编号。当两个节点间有查询到的实际客运路线时,认为两个节点之间存在一条边。采用上述方法,构建4种交通方式的无向加权客运子网络。

客运子网络 G_s 如图 2 所示。其中 $G_s = [N_s, E_s, H_s, W_s]$, $s = 1, 2, 3, 4$ 分别代表铁路、公路、航空和水运 4 种客运子网络。 N_s 表示子网络中节点的编号集合; E_s 表示子网络中边的 0—1 变量集合; H_s 表示子网络中节点权重的集合,节点权重由车站间的日均客运班次确定; W_s 表示子网络中边的权重集合,由节点间的出行时间确定。

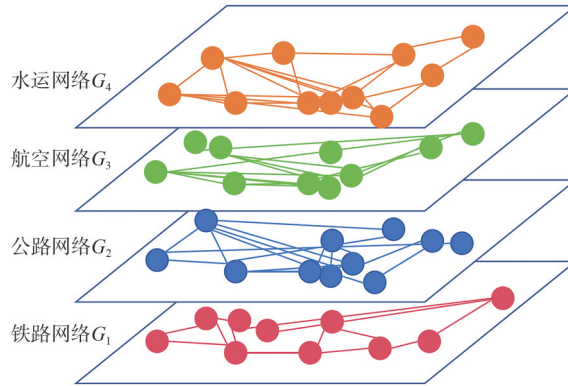


图 2 客运子网模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of passenger transport sub-network model

1.2 城市群综合客运网络模型

在一个区县级行政单位内,如果存在两种或两种以上不同类型的交通枢纽(如公路、铁路、航空和水运等),其空间集聚特征会形成互补节点集群,这种集群关系即互补关系(Complementary effect, CE)。而集群内部不同交通方式之间能够实现功能协同,这种协同作用即互补效应。基于 1.1 节建模方法,根据各客运子网间的互补关系,建立各层间的连边,将位于同一区县级行政单位的站点连接起来,构建综合客运网络模型,如图 3 所示。

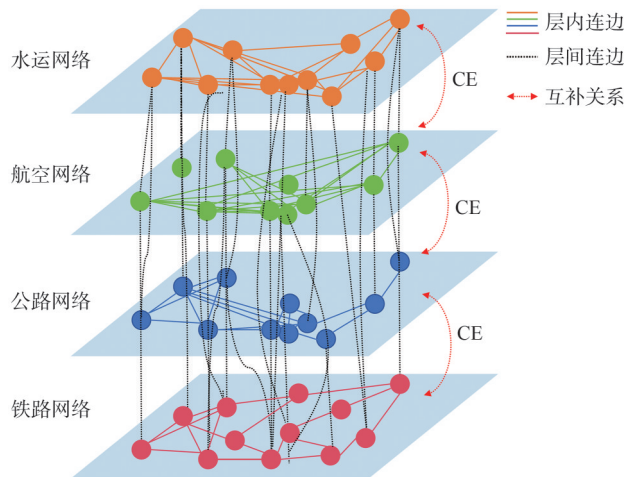


图 3 城市群综合客运网络模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of comprehensive passenger transport network model in urban agglomerations

将综合客运网络模型抽象为图 $G = (N, E, H, W)$, 采用分层建模方式,充分考虑实际中的换乘问题,以反映城市间的交通流动关系。该模型在面对不同攻击方式时,可以准确地反映失效网络的类型,更真实地描绘出城市群综合客运网络的特征;其提供的分析框架更加贴近现实,可以为城市群交通优化提供更加深入的见解。

2 城市群综合客运网络可靠性评估

2.1 网络权重属性标定

(1) 节点权重

节点权重通过节点的客流量来确定。鉴于数据获取的可行性,采用节点之间每日平均客运班次次数来计算^[23],节点权重公式为

$$H_i = \sum_{j=i}^n f_{ij},$$

式中, f_{ij} 表示节点间日平均班次运行次数, n 表示子网节点的个数。

(2) 连边权重

连边矩阵表示节点*i*和节点*j*间的边权。获取两节点间直达车次中出现的所有运行时间,运行时间平均值构建的时间边权函数 $T(w_{ij})$ 公式为

$$T(w_{ij}) = \frac{\sum_{k=1}^{k_{\max}} w_{ij}^k}{k_{\max}},$$

式中, k 表示相邻节点间的运行班线(若某节点对存在5列班次,则 $k_{\max} = 5$)。当无有效班次信息时,则时间边权函数记为0。

2.2 可靠性评价指标

城市群综合客运网络的可靠性评估聚焦于突发事件下功能的持续性,本文采用网络相对时间效率^[24]和最大连通子图的相对大小^[25]构建双维度量化指标。

(1) 网络相对时间效率

网络效率一般用来衡量整个网络的平均性能,综合体现网络中各节点彼此间的平均接近程度以及网络整体的可靠情况,传统网络效率主要借助无权图结构刻画网络连通性,未引入权重参数,导致网络实际特征与理论模型存在误差。本文采用时间加权方法对网络效率评估模型予以优化,若网络平均恢复值不变,网络进入最优工作模式,网络可靠性与最优状态中的平均恢复值呈显著负相关。

定义网络效率*R*的公式为

$$R = \frac{1}{n(n-1)} \sum \frac{1}{T(w_{ij})} = \frac{1}{n(n-1)} \sum \frac{k_{\max}}{\sum_{k=1}^{k_{\max}} w_{ij}^k},$$

式中, n 表示节点总数量, $T(w_{ij})$ 表示网络中节点*i*到*j*的平均用时,不可达节点对 $T(w_{ij})$ 赋值为0。

为表征网络效率的动态演化规律,定义网络相对时间效率公式为

$$R(e) = \frac{R_t}{R_0},$$

式中, R_t 、 R_0 分别对应第*t*次迭代与初始状态的网络效率值。

(2) 最大连通子图的相对大小

传统最大连通子图虽能表示网络结构的退化程度,但未考虑节点异质性。本文提出流量加权因子,以此来定义最大连通子图的相对大小公式为

$$S = \frac{\sum_{i \in \Omega} H_i}{\sum_{i \in \Phi} H_i},$$

式中,节点*i*的权值参数记为 H_i , Ω 为网络受到攻击后的最大连通分量节点集, Φ 为未受到攻击时网络中节点的集合。

2.3 攻击策略

交通网络攻击主要分为随机攻击和蓄意攻击两类,前者随机移除网络元素,后者优先将高中心性节点或关键连边消除。节点失效将引发拓扑连接中断,以及其连边的同步移除,而边失效仅影响局部区域的连通性,因此,节点失效在网络方面的影响更明显。本文采用混合失效模拟,随机攻击(RA)即随机选择攻击目标;蓄意攻击(IA)分为3种模式,分别为度值攻击(IA-D)、按权重排序移除(IA-W)以及逐一攻击。其中逐一攻击通过量化节点失效的边际效应,可识别网络结构脆弱性阈值。

3 研究方法

3.1 网络节点失效情景下网络性能计算规则

在城市群综合客运网络中,若某一节点被攻击失效,导致其连接的边中断,互补效应即体现在为旅客出行提供的替代服务上。旅客将按照到达目的地重新选择交通工具,不同运输方式承担的客流量比例由所在区域的年客运总量决定。这种互补效应提升了综合客运网络应对突发问题的能力,有利于保证城市群客运系统稳定持续地运行。

以轨道交通与道路交通网络为例,当轨道节点发生功能性中断时,将通过道路交通替代功能实现客流再分布。该过程转移的客流量取决于城市之间的空间吸引强度,其量化表征可使用引力模型,公式为

$$\theta_{ij} = a \frac{\sqrt{u_i v_i} \sqrt{u_j v_j}}{d_{ij}^2},$$

式中, θ_{ij} 为节点*i*和*j*所在城市之间的引力; u_i 、 u_j 为城市*i*、*j*的人口规模; v_i 、 v_j 为城市*i*、*j*的地区生产总值; d_{ij} 为两者之间的距离; a 为常数,取值为1。

使用标准化方法确定客流再分布系数 $\bar{\theta}_{ij}$,转移的客流实际通过公路出行,但用铁路列车频次与转移比例的乘积表示,因此定义为间接列车需求指数, $\bar{\theta}_{ij}$ 公式为

$$\bar{\theta}_{ij} = \frac{\theta_{ij} - \min(\theta_{ij})}{\max(\theta_{ij}) - \min(\theta_{ij})}.$$

$t_{ij}^{G_1 \leftarrow G_2}$ 和 $f_{ij}^{G_1 \leftarrow G_2}$ 分别表示当 G_1 中节点*i*失效时,考虑 G_2 中节点的互补效应时可以到达节点*j*的出行时间和列车频次,公式为

$$\begin{aligned} t_{ij}^{G_1 \leftarrow G_2} &= t_{ij}^{G_2} + 0.5, \\ f_{ij}^{G_1 \leftarrow G_2} &= f_{ij}^{G_1} \bar{\theta}_{ij}, \end{aligned}$$

式中, $t_{ij}^{G_2}$ 为 G_2 中节点*i*和节点*j*的出行时间,统一换乘时间为0.5 h^[26]; $f_{ij}^{G_1}$ 为 G_1 中节点*i*和节点*j*之间的列车频次。当节点发生失效时,若没有替代交通方式,则无互补效应。

3.2 互补强度计算规则

在交通网络韧性评估中,动态互补强度(Dynamic complementary strength,DCS)被定义为多模式客运系统在节点失效时,通过子系统替代服务维持效能的能力水平。本文基于城市群综合客运网络及其互补效应的分析,对网络节点间的互补强度进行量化,计算公式为

$$\begin{aligned} DCS_{R_{G_2 \rightarrow G_1}} &= \frac{R_{G_2 \rightarrow G_1} - R_{G_1}}{R_{G_1}}, \\ DCS_{S_{G_2 \rightarrow G_1}} &= \frac{S_{G_2 \rightarrow G_1} - S_{G_1}}{S_{G_1}}, \end{aligned}$$

式中, R_{G_1} 、 S_{G_1} 分别表示不考虑互补效应时 G_1 的网络相对时间效率与最大连通子图的相对大小, $R_{G_2 \rightarrow G_1}$ 、 $S_{G_2 \rightarrow G_1}$ 分别表示考虑互补效应时 G_1 的网络相对时间效率与最大连通子图的相对大小, $DCS_{R_{G_2 \rightarrow G_1}}$ 、 $DCS_{S_{G_2 \rightarrow G_1}}$ 分别表示网络相对时间效率动态互补强度和最大连通子图的相对大小动态互补强度。

4 实例分析

4.1 呼包鄂乌城市群数据源

呼包鄂乌城市群研究范围包括呼和浩特市、包头市、鄂尔多斯市及乌兰察布市,共包括12个区、1个县级市、1个矿区、10个县和14个旗。公路和铁路在城市群客运交通中占据主导地位,本文着重分析这两种交通方式。铁路运输细分为高速铁路与普通铁路,高铁和普铁在运行时间和费用上存在较大差异,基于中国铁路12306官网获取时间与费用信息,公路数据根据车次网与内蒙古公路客票网获取。

4.2 呼包鄂乌城市群综合客运网络模型构建

各个县级行政区域的客运中心作为站点,每个行政区域选取一个不同形式的站点,涉及呼包鄂乌城市群高铁站点10个,普铁站点16个,汽车站点27个。利用Python对每个站点的经纬度坐标进行获取和记录,以呼包鄂乌的排列顺序对站点进行编号,结合节点矩阵,利用Python与Arcgis分别构建高铁网 G_{1-1} 、普铁网 G_{1-2} 和公路网 G_2 ,基于互补关系,通过拓扑重构生成25条跨层连接边,实现呼包鄂乌城市群综合客运网络 G_c 的拓扑建模,得到客运网络如图4所示。

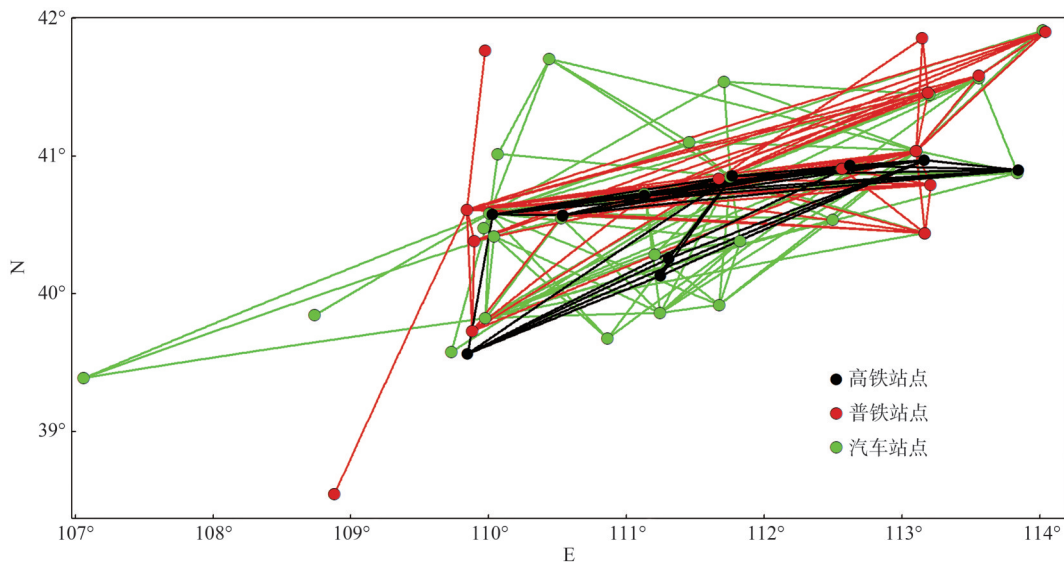


图4 呼包鄂乌城市群初始客运网络

Fig. 4 Initial passenger transport network of Hu-Bao-E-Wu urban agglomeration

4.3 单节点失效客运网络可靠性分析

4.3.1 单节点失效客运网络相对时间效率及动态互补强度分析

按照攻击策略,首先进行逐一攻击,确定网络中节点重要程度。利用Python软件依次对3个客运网络节点实施序列化攻击,初始网络相对时间效率为1,最终依据网络相对时间效率由低到高进行排序,结果如表1所示。

由表1可以得到, G_{1-1} 网络中站点的失效对网络相对时间效率的影响较其他网络更大,减少的量大多在20%以上。当呼和浩特东站与乌兰察布站失效时,网络相对时间效率分布为0.7145和0.7480,降幅分别为28.55%与25.20%。原因在于城市群中高铁运输方式所占比例较小,覆盖范围较小,只有向首都方向开行的列车,呼和浩特市和乌兰察布市位于城市群东部方向,对网络相对时间效率产生影响较大; G_{1-2} 网络中集宁南站对网络相对时间效率的影响最大,该站点失效后网络相对时间效率下降30.55%,为所在网络的最小值。在呼包鄂乌城市群普铁网络中,集宁南站可以连接其中81.25%的站点,且到各站点的平均时间较少,该站点失效时网络相对时间效率急速下降; G_2 网络中站点的失效对网络相对时间效率的影响较其他网络较小,除集宁长途汽车站、包头长途客运总站、呼

和浩特长途汽车站和薛家湾汽车站这 4 个站点网络相对时间效率影响较大之外,其他站点的影响相对较小,大多小于 10%。总的来说,乌兰察布市客运站点的失效对所在客运网络的相对时间效率产生了显著的影响,其原因在于乌兰察布市地理位置位于城市群的关键枢纽,其客运站点一旦失效,将对网络的连接关系造成严重冲击,进而可能引发整个客运网络的广泛瘫痪。

表 1 城市群单节点失效客运网络相对时间效率

Table 1 Relative temporal efficiency of single-node failure transport network in urban agglomeration

G_{1-1}		G_{1-2}		G_2	
站点	$R(e)$	站点	$R(e)$	站点	$R(e)$
呼和浩特东站	0.7145	集宁南站	0.6945	集宁长途汽车站	0.8314
乌兰察布站	0.7480	包头站	0.7286	包头长途客运总站	0.8409
卓资东站	0.7685	萨拉齐站	0.8170	呼和浩特长途汽车站	0.8420
托克托东站	0.7716	卓资山站	0.8329	薛家湾汽车站	0.8799
萨拉齐站	0.7782	呼和浩特站	0.8331	武川汽车站	0.9011

基于构建的动态互补强度(DCS)模型,对城市群综合客运网络中各节点的网络相对时间效率互补强度进行计算,结果如图 5 所示。

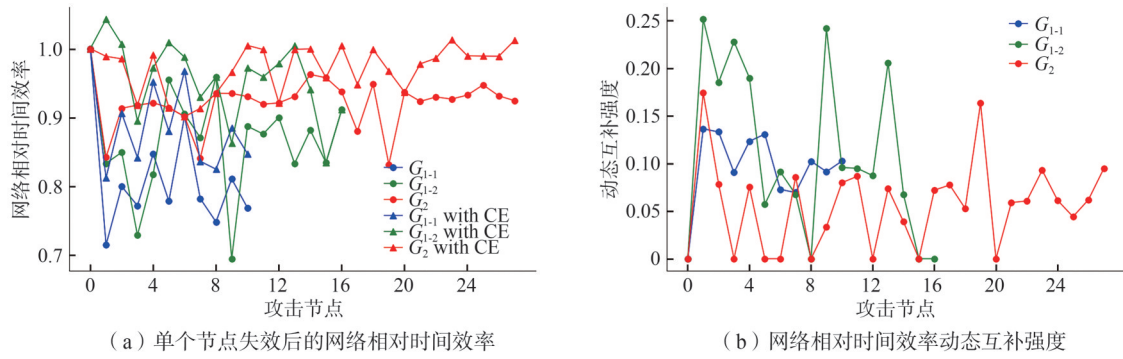


图 5 单节点失效网络相对时间效率及其动态互补强度

Fig. 5 Dynamic complementary strengths of relative temporal efficiency in single node failure network

图 5(a)表示攻击单个节点失效后网络相对时间效率变化值,考虑互补效应的网络能够通过其他交通模式的补充服务来维持更高的效率,从而增强网络的可靠性。由仿真结果可知,不考虑互补效应时, G_{1-1} 、 G_{1-2} 、 G_2 平均网络相对时间效率分别为 0.792 1、0.858 4、0.918 2;考虑互补效应时, G_{1-1} 、 G_{1-2} 、 G_2 平均网络相对时间效率分别为 0.875 1、0.954 0、0.970 6。无论是否考虑互补效应,单个节点失效后,公路网平均网络相对时间效率最高,应对突发事件时的可靠性最强。图 5(b)表示网络相对时间效率动态互补强度的变化,表示在节点失效时,网络中其他节点对网络互补作用的大小。总体来看, G_{1-2} 网络相对时间效率动态互补强度最大, G_2 最小,原因在于公路交通网络因其站点密集,几乎覆盖每一个县级行政单位,可作为普铁和高铁两种交通方式的替代选择。在高铁、普铁与公路这 3 种交通方式中,高铁以最快的运行速度占据优势地位,普铁次之。当出行方式转向公路时,其节点在路径选择上能提供更多的灵活性和替代性,但行驶时间会增加,因此,公路网络中其他节点对普铁网络互补作用的大小更明显。

4.3.2 单节点失效最大连通子图的相对大小及动态互补强度分析

基于攻击策略,通过 Python 软件对 3 个客运网络节点实施序列化攻击。采用最大连通子图的相对大小作为评估指标,具体量化结果如表 2 所示。

在 G_{1-1} 网络中,当呼和浩特东站、乌兰察布站和包头东站这 3 个高铁站点失效时,网络最大连通子图的相对大小受到显著影响。特别是呼和浩特东站,最大连通子图的相对大小下降至 0.7500,降幅达 25%。因为呼和浩特东站连接着 100% 的高铁站点,该站点失效,网络连通性直线下降;在 G_{1-2} 网络中,当呼和浩特站发生故障时,网络最大连通子图的相对大小下降至 0.8230,降幅达 18%。这是因为呼和浩特站能够连接到 86.67% 左右的站点,且节点权值大,该站点的失效会显著降低网络的连通性; G_2 中呼和浩特长途汽车站、集宁长途汽车站的失效对网络最大连通子图的相对大小影响较大,除这两个站点外,其他站点的失效对网络最大连通子图的相对大小影响小于 10%。

表 2 城市群单节点失效最大连通子图的相对大小

Table 2 Relative sizes of largest connected subgraphs for single node failure in urban agglomerations

G_{1-1}		G_{1-2}		G_2	
站点	S	站点	S	站点	S
呼和浩特东站	0.7500	呼和浩特站	0.8230	呼和浩特长途汽车站	0.7477
乌兰察布站	0.7957	集宁南站	0.8287	集宁长途汽车站	0.8799
包头东站	0.8811	包头站	0.8624	鄂尔多斯客运总站	0.9144
兴和北站	0.8994	化德站	0.8989	包头长途客运总站	0.9322
卓资东站	0.9177	商都站	0.9157	和林格尔长途汽车站	0.9422

基于构建的动态互补强度(DCS)模型,对城市群综合客运网络中各节点的最大连通子图的相对大小进行计算,结果如图 6 所示。

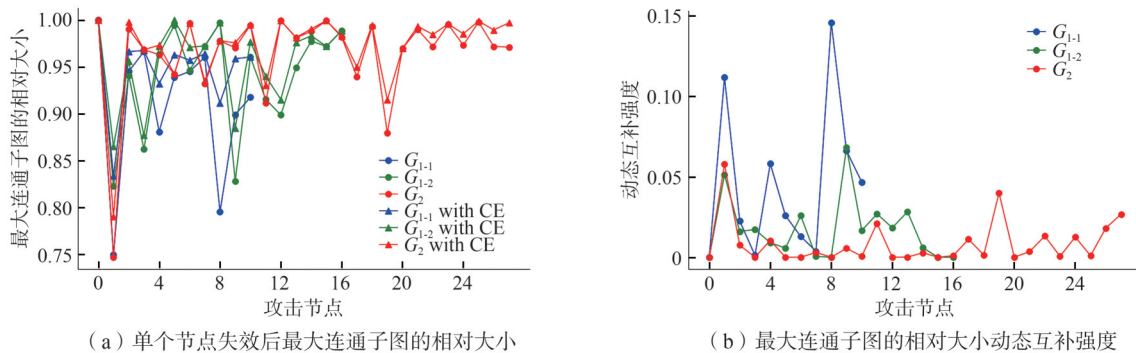


图 6 单节点失效最大连通子图的相对大小及其动态互补强度

Fig. 6 Dynamic complementary strengths of relative sizes of largest connected subgraphs in single node failure network

图 6(a) 表示攻击单个节点最大连通子图的相对大小变化趋势,由仿真结果可知,不考虑互补效应时, G_{1-1} 、 G_{1-2} 、 G_2 的平均最大连通子图的相对大小分别为 0.9000、0.9370、0.9629;考虑互补效应时, G_{1-1} 、 G_{1-2} 、 G_2 的平均最大连通子图的相对大小分别为 0.9416、0.9513、0.9708。无论是否考虑互补效应,单个节点失效后,公路网平均最大连通子图的相对大小最大,应对突发事件时的可靠性最强。图 6(b) 表示最大连通子图的相对大小动态互补强度的变化,总体来看, G_{1-1} 动态互补强度最大, G_2 动态互补强度最小,原因在于高铁网络与公路网络节点权重存在显著差异。高铁站点多坐落于经济发达城市,这些城市间经济联系紧密,使得高铁站点引力值较大。因此,在客流量转移分配时,高铁站点能吸引较大比例的客流量,使其节点权重较高。公路网络多位于经济规模较小、人口和 GDP 水平较低的地区,故公路网络节点权重普遍较小。这种现象反映了不同交通网络在区域经济发展中

的不同作用和影响,高铁网络在促进经济发达地区之间的联系中发挥着重要作用,而公路网络则在更广泛的区域范围内提供基础的交通连接。

4.4 多节点失效客运网络可靠性分析

4.4.1 多节点失效网络相对时间效率分析

城市群综合客运网络中,多个节点可能因突发事件,如自然灾害、人为破坏或公共卫生危机,而同时出现失效情况。应用Python软件对4个客运网络节点进行攻击,网络相对时间效率仿真结果如图7所示,RA with CE、IA-D with CE和IA-W with CE分别表示考虑互补效应时的RA、IA-D和IA-W攻击策略。

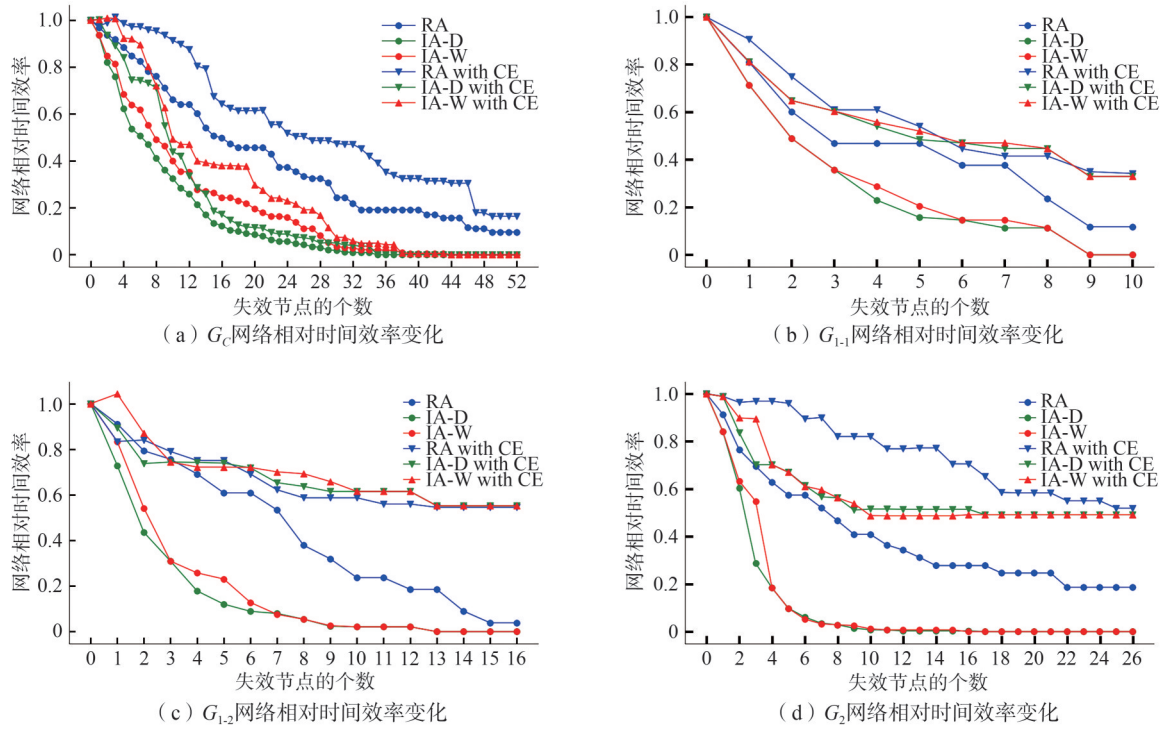


图7 不同攻击策略下城市群网络相对时间效率变化

Fig. 7 Changes of relative temporal efficiency in urban agglomeration networks under different attack strategies

对比分析图7中的随机攻击(RA)、基于度值的蓄意攻击(IA-D)和基于权重的蓄意攻击(IA-W)3种攻击方式,可以得出结论,蓄意攻击对网络相对时间效率的危害远超随机攻击,可能导致网络彻底失效。蓄意攻击通过有针对性地移除网络中的关键节点,能够迅速破坏网络结构,致使网络相对时间效率急剧下降,随机攻击虽然也会造成影响,但因其缺乏目的性,网络相对时间效率的下降相对较缓。分析图7(b)—(d)可知,在IA中,度值攻击与权重攻击相差不多,由于 G_{1-1} 网络中节点数量较少,节点失效的比例为90%时,网络失去所有的性能; G_{1-2} 网络中当节点故障比例达到56%时,网络系统功能几乎崩溃,网络相对时间效率接近于0; G_2 网络中节点失效的比例为36%时,网络几乎失去所有的性能。

考虑互补效应时,单一客运网络遭遇全节点蓄意攻击时,互补系统可通过提供替代服务维持基础能力,其保底性能可达到原系统正常运营状态的30%以上。如图7(a)所示,当考虑互补效应时,城市群综合客运网络 G_c 的相对时间效率有所提升;然而,当 G_c 所有节点均失效且无法获得其他节点的补充服务时,该网络的相对时间效率将降至0, G_{1-1} 、 G_{1-2} 、 G_2 均处于瘫痪状态。从图7(b)—(d)可知,考虑互补效应时, G_{1-1} 、 G_{1-2} 、 G_2 网络在节点全失效的场景下,网络相对时间效率保留率为0.3297、0.5676、0.4738,分别维持初始运营性能的32.97%、56.76%、47.38%。结果表明,在呼包鄂乌城市群中,对网络相对时间效率进行分析,普铁网和公路网在节点中断后,可借助其他运输网络获得显著的互补效应支撑,而高铁

网络在这一情景下的互补能力明显不足。这一现象的原因可以从客运网络的服务特性来理解,当评估指标侧重出行时效性时,高铁网络因其速度优势形成的时间效率,即使存在其他交通模式作为替代,其下降幅度仍然较为显著。

4.4.2 多节点失效最大连通子图的相对大小分析

最大连通子图的相对大小仿真结果如图8所示,RA with CE、IA-D with CE和IA-W with CE分别表示在考虑互补效应时的RA、IA-D和IA-W攻击策略。

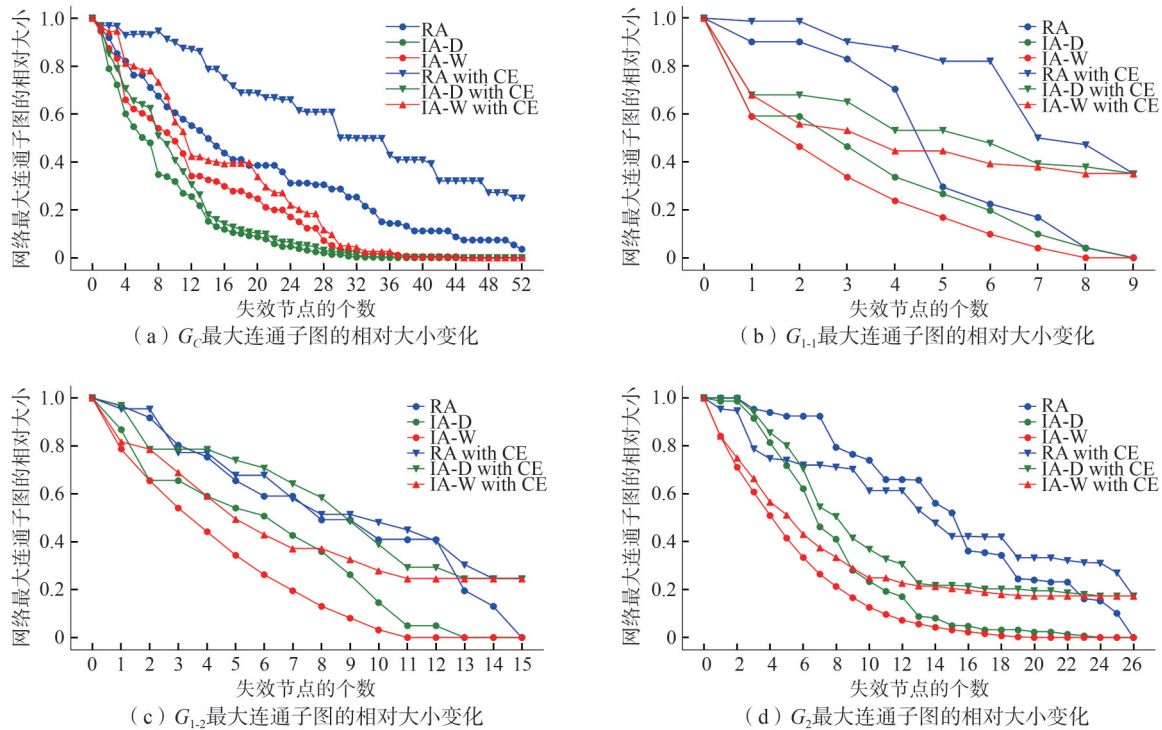


图8 不同攻击策略下城市群最大连通子图的相对大小变化

Fig. 8 Changes of relative sizes of largest connected subgraphs in urban agglomeration networks under different attack strategies

从图8(a)可知,考虑互补效应时 G_C 的最大连通子图的相对大小有所提高,当 G_C 中节点全部失效时,没有节点可提供补充服务, G_C 的最大连通子图的相对大小为0, G_{1-1} 、 G_{1-2} 、 G_2 均处于崩溃状态。分析图8(b)—(d)可知,对于权重攻击, G_{1-1} 网络中节点失效的比例为80%时,网络失去所有的性能; G_{1-2} 网络中当节点故障比例达到68%时,网络几乎不再连通,最大连通子图的相对大小接近于0; G_2 网络中节点失效的比例为70%时,网络几乎失去所有的性能。

在图8(b)—(d)中,当 G_{1-1} 、 G_{1-2} 、 G_2 中的节点全部失效时,考虑互补效应,网络最大连通子图的相对大小保留率分别为0.3517、0.2464、0.1732,说明这3个网络分别能够保持初始性能的35.17%、24.64%、17.32%。实证研究表明,呼包鄂乌城市群交通系统中,考虑最大连通子图的相对大小,高铁网络与普铁网络在遭遇关键节点故障时,能够从其他模式的客运网络中获得较强的互补效应,公路网获得的互补效应最弱。这一现象可基于节点数量分布进行深入分析,高铁网络通常连接经济发达地区,这些地区往往存在多个交通站点,其他交通站点可为其提供替代服务。公路网络作为基础交通设施,覆盖范围广泛,然而也存在一些地区仅设有汽车站而缺乏其他形式的交通站点,因此其他交通模式难以对公路网络形成有效的互补效应。

4.4.3 互补节点对城市群客运网络的影响

连续攻击时 G_{1-2} 在互补效应的作用下网络相对时间效率的提升最为显著,这表明 G_{1-1} 和 G_2 对

G_{1-2} 的互补强度最大。以 G_{1-2} 为例,探究互补网络节点失效规模与网络相对时间效率的动态关联性。当不考虑互补效应时, G_{1-2} 中56%节点失效后,网络相对时间效率几乎为0,其他节点对网络相对时间效率的影响不大。为了更显著地揭示客运网络间的相互影响,对客运网络 G_{1-1} 、 G_2 和 G_{1-2} 进行随机模拟攻击。失效节点比例为0.2时表示互补网络保留80%节点,仿真结果如图9所示。

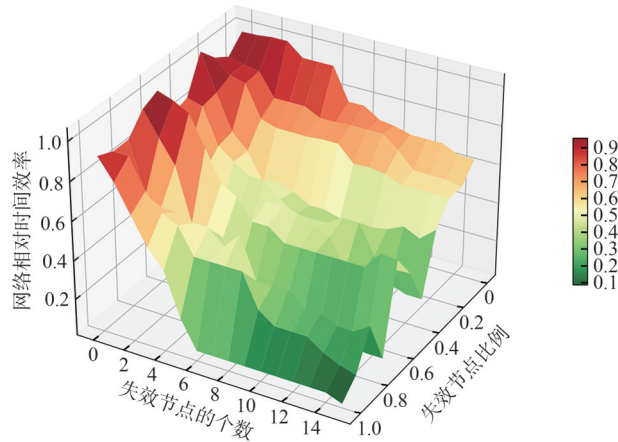


图9 随机攻击下失效节点比例对 G_{1-2} 网络相对时间效率的影响

Fig. 9 Impact of the proportion of failed nodes on relative temporal efficiency in G_{1-2} networks under random attacks

从图9可以看出,失效节点比例的变化对 G_{1-2} 网络相对时间效率产生了不同的影响。在 G_{1-2} 中的失效节点数量保持不变的情况下,随着失效节点比例的增大, G_{1-2} 的网络相对时间效率呈现下降趋势,这是因为失效节点比例的增大使得在节点失效等突发状况下,旅客可选择的替代路径数量减少;当城市群中 G_{1-2} 节点失效规模扩展时,需要互补网络中更高比例的可用节点以保持较高的网络相对时间效率。

5 结论

本文以呼包鄂乌城市群客运网络为研究对象,运用Python进行不同攻击策略下的仿真,建立可靠性评估模型,并对不同客运网络间的互补效应进行了深入探讨,得出以下结论。

(1) 客运网络可靠性因网络类型而异。在网络单节点失效时,公路网在应对突发事件时展现出较强的可靠性,而高铁网相对较低。其中具备多式联运功能的中心城市枢纽构成关键节点,当此类节点失效时,网络可靠性大幅下降;相比之下,非核心站点失效对系统整体效能的影响相对较小,这表明城市群客运系统的可靠性存在明显的空间差异。

(2) 城市群综合客运网络在随机攻击中表现出良好的抗毁能力,但在蓄意攻击下系统可靠性明显衰减。多节点失效时考虑互补效应,高铁网、普铁网和公路网的网络相对时间效率分别提升32.97%、56.76%和47.38%,最大连通子图的相对大小分别提升35.17%、24.64%和17.32%。通过互补协同机制,既增强单个网络的抗毁能力,又搭建起不同交通网络之间的替代路径,有效减少关键道路出现服务中断的风险。

(3) 实证分析表明,呼包鄂乌城市群客运网络分布呈现显著核心依赖特征,呼和浩特市、包头市及乌兰察布市的枢纽节点具有极大影响力,其他地区客运节点影响较小,这表明现有运输网络存在结构单一与覆盖度不足的双重制约。为实现区域高质量发展,需重点完善次级城市道路,增强边缘城市与中心节点的多方式衔接,形成层级分明的复合型客运网络结构。

参考文献:

- [1] 曾俊伟,张善富,钱勇生,等. 基于复杂网络的城市公共交通网络连通可靠性分析[J]. 铁道运输与经济,2017,39

- (6):93-97.
- [2] 马书红,杨磊,陈西芳. 风险扩散下城市群多模式交通网络的韧性演化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023,51(6):42-51.
- [3] 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.
- [4] 马敏,胡大伟,刘杰,等. 基于客流加权的城市轨道交通网络抗毁性分析[J]. 中国安全科学学报, 2022,32(12): 141-149.
- [5] 杨吉凯,李宗平. 基于客流加权的城市轨道交通网络抗毁性能分析[J]. 科技与创新, 2017(6):1-4.
- [6] 李成兵,张帅,杨志成,等. 蓄意攻击下城市群客运交通网络级联抗毁性仿真[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019,19(2):14-21.
- [7] 李成兵,郝羽成,高巍,等. 城市群交通网络级联失效建模与可靠性仿真[J]. 公路交通科技, 2018,35(5): 135-141.
- [8] 吴志龙,郑长江,郑树康,等. 级联失效下城市交通网络可靠性评价[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025,46(2): 82-89.
- [9] 孙超,尹浩为,张玮,等. 基于有限理性的交通网络可靠性均衡模型[J]. 西南交通大学学报, 2023,58(1):83-90.
- [10] 乔栋,李成兵,王佳琳,等. 基于加边策略的城市群客运网络韧性优化[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2024, 55(5):530-539.
- [11] 张玺. 基于网络效率的日变路网脆弱性识别方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017,17(2):176-182.
- [12] 李成兵,李云飞,吴鹏. 考虑时间特性的城市群客运网络抗毁性研究[J]. 系统仿真学报, 2022,34(9):2037-2045.
- [13] 路庆昌,崔欣,徐标,等. 公交接驳场景下轨道交通网络脆弱性研究[J]. 中国安全科学学报, 2021,31(8): 141-146.
- [14] TAO L, LI L R. Spatiotemporally complementary effect of high-speed rail network on robustness of aviation network[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2022, 155:95-114.
- [15] FANG C, CHU Y Z, FU H R, et al. On the resilience assessment of complementary transportation networks under natural hazards[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 109:103331.
- [16] 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.
- [17] HONG L, YAN Y, 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*, 2016, 158:58-72.
- [18] FENG X, HE S W, CHEN X C, et al. Mitigating the vulnerability of an air-high-speed railway transportation network: From the perspective of predisruption response[J]. *Journal of Risk and Reliability*, 2021, 235(3):474-490.
- [19] 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.
- [20] 肖明辉. 基于区域攻击的城市公共交通互补网络脆弱性分析[J]. 信息通信, 2018(8):1-5.
- [21] 马飞,委笑琳,孙启鹏,等. 考虑互补效应的城市群多模式客运网络鲁棒性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(2):388-398.
- [22] 汤洪霞,李亚,李梦笛,等. 互补效应下城市群多制式交通网络鲁棒性研究[J/OL]. 铁道标准设计, 2025:1-9

(2025-05-07)[2025-05-13]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202501030004>.

- [23] 侯兰功,孙继平. 复杂网络视角下的成渝城市群网络结构韧性演变[J]. 世界地理研究,2022,31(3):561-571.
- [24] 聂士达,李成兵,贺博威,等. 考虑城市内部服务网络的城市群综合客运网络抗毁性研究[J]. 系统仿真学报,2025,37(4):933-942.
- [25] HOLME P,KIM B J,YOON C N, et al. Attack vulnerability of complex networks[J]. Physical Review E,2002,65(5 Pt 2):056109.
- [26] LI T,RONG L L,YAN K S. Vulnerability analysis and critical area identification of public transport system: A case of high-speed rail and air transport coupling system in China[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice,2019,127:55-70.

Reliability Assessment of Comprehensive Passenger Transport Networks in Urban Agglomerations Considering Complementary Efficiency

ZHAO Yaning¹, MENG Qinghu², LI Chengbing¹, LIU Shuxuan¹, HAN Jia¹

(1. *Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China;*

2. *Inner Mongolia Autonomous Region Transportation Development Center, Hohhot 010020, China*)

Abstract: To analyze the influence of the complementary effects among different transportation modes on network reliability facing attacks in the passenger transportation network of urban agglomerations, a comprehensive passenger transport network model is constructed using the Space L method in complex network theory, within which edge weight and node weight are calibrated with time and passenger flow. Subsequently, two network reliability evaluation metrics are proposed: time-weighted relative temporal efficiency and flow-weighted relative size of the largest connected subgraph. A gravity model is introduced to calculate compensatory functions generated from other nodes resulted from a node failure. Simultaneously, dynamic compensatory strength is computed to quantify complementary interactions between transportation networks. Finally, taking the Hu-Bao-E-Wu urban agglomeration as a case to perform simulation. The results reveal that the networks with complementary effects can maintain higher performance levels under attacks; under node failure due to be attacked, the conventional rail network can obtain 56.76% of compensatory relative temporal efficiency from other networks, whereas the high-speed rail network achieve 35.17% of compensatory relative size of the largest connected subgraph.

Key words: urban agglomeration; comprehensive passenger transport network; reliability; complementary effect