文章编号:1673-0291(2026)01-0015-20 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250109

综合交通系统韧性研究综述

石谨诚[a,b],李瑞敏[a,b]
(清华大学a.土木工程系,b.恒隆房地产研究中心,北京 100084)

摘 要:为系统性了解当前综合交通系统韧性研究的主要内容、方法与成果,分析当前研究存在的不足,为未来研究方向提供借鉴与参考,对综合交通系统韧性相关的研究进行综述.通过国内外期刊数据库检索得到百余篇相关文献,从研究对象与目的、韧性评价指标、综合交通网络建模方法、破坏恢复场景与韧性提升策略等角度进行了梳理.当前研究主要可分成城市间和城市内两大尺度,研究目的主要有韧性评价、关键组件识别与韧性提升.在韧性评价指标方面,主要采用了基于网络分析、出行者视角两大类指标,也有整合式指标与对综合交通的特殊考虑;在综合交通网络建模方面,按多层网络、破坏恢复场景的设置及网络的动态性3个角度进行整理与分析;在韧性提升策略方面,当前研究主要有破坏前预防、破坏后响应、优化恢复策略3种类型.研究结果表明:韧性指标可更多考虑需求侧、进一步引入综合交通特性;破坏场景与乘客应对行为可进行更准确的建模并充分考虑慢行交通;未来的动态性研究应着重考察信息真实性及其对出行的引导效应;综合交通系统内在的复杂性、不同交通方式的异质性等也需深入探讨.

关键词:综合交通;多式联运;交通网络;韧性评价;韧性提升;运筹优化;轨道交通
中图分类号:U111 **文献标志码**:A

A review of research on the resilience of comprehensive transportation systems

SHI Jincheng[a,b], *LI Ruimin*[a,b]
(a. School of Civil Engineering, b. Hang Lung Center for Real Estate, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To systematically summarize the main themes, methods, and findings in current research on the resilience of comprehensive transportation systems, identify existing gaps, and provide insights for future research, this study conducts a detailed review of relevant literature on the resilience of comprehensive transportation systems. More than one hundred articles are retrieved from major Chinese and international academic databases. The review synthesizes existing work from several perspectives, including research objectives and scopes, resilience evaluation indicators, integrated transportation network modeling approaches, disruption and recovery scenario design, and strategies for enhancing system resilience. Current research can be broadly categorized into two spatial scales, intercity and intra-urban, with primary objectives focusing on resilience assessment, identification of critical components, and resilience enhancement. Regarding resilience evaluation indicators, existing studies pre-

收稿日期:2025-07-04;**修回日期**:2025-10-29
基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2600500);国家社会科学基金(21ZDA029)
Foundation items: National Key R&D Plan (2021YFB2600500); National Social Science Fund Project(21ZDA029)
第一作者:石谨诚(2001—),男,浙江绍兴人,博士生.研究方向为交通运输规划与管理.**email**:sjc24@mails.tsinghua.edu.cn.

引用格式:石谨诚,李瑞敏.综合交通系统韧性研究综述[J].北京交通大学学报,2026,50(1):15-34.
SHI Jincheng, LI Ruimin. A review of research on the resilience of comprehensive transportation systems[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(1): 15-34.(in Chinese)

dominantly adopt two categories: network-analysis-based indicators and traveler-oriented indicators, alongside some integrated indicators and metrics tailored to multimodal transportation. For modeling integrated transportation networks, the literature is reviewed from the perspectives of multilayer network structures, disruption and recovery scenario configurations, and network dynamics. In terms of resilience enhancement, current strategies typically fall into three groups: pre-disaster prevention, post-disaster response, and optimized recovery planning. The results demonstrate that future research should place greater emphasis on demand-side factors and incorporate multimodal transportation characteristics more thoroughly. Disruption scenarios and passenger behavioral responses require more accurate modeling, with fuller consideration of slow modes of travel. Dynamic analyses should pay closer attention to realism and the influence of travel information guidance. Additionally, the complexity of integrated transportation systems and the heterogeneity across different transport modes warrant further investigation.

Keywords: comprehensive transportation; multimodal transport; transportation network; resilience evaluation; resilience enhancement; operation optimization; rail transit

交通运输系统是社会经济正常运行的重要支撑.当下,我国综合立体交通网络不断发展完善,在不断方便人们出行的同时,也更加容易受到各种异常突发事件的影响.极端天气、设备故障等事件可能造成高铁[1-2]、民航[3]、公路[4]、地铁[5-6]等不同交通方式大面积的交通延误甚至中断,导致严重的损失[7],由此对综合交通运输系统的韧性提出了相应的要求.文献[8]将交通韧性概括为交通系统抵抗、降低、吸收扰动的影响,维持可接受程度的服务,在合理的时间和成本下恢复到正常水平的能力.韧性能够相对综合地反映交通系统应对突发事件的能力水平,与其他领域的韧性研究相比,交通运输领域起步相对较晚,进入21世纪后才逐渐展开[9-10].

目前,交通运输系统韧性的研究以面向单一交通方式的研究为主,对跨多方式的综合交通系统的韧性研究较少.而交通系统无论在城市内部还是城市之间,又是一个由多种交通运输方式构成的有机整体,不同交通方式之间有着复杂而紧密的联系.只研究某种交通方式则无法很好地捕捉到综合交通网络的复杂特征.因此,在对单一交通方式的韧性研究基础上,多种交通方式构成的综合交通系统的韧性研究更值得关注.我国2019年发布的《交通强国建设纲要》明确指出综合交通系统应当“增强系统弹性”[11];2021年发布的《国家综合立体交通网规划纲要》提出要“提升交通网络系统韧性和安全性”[12],它们为综合交通系统的韧性研究提供了政策层面的支持.

目前,已有大量学者针对交通韧性进行了文献综述,例如文献[13]从韧性的定义、主要指标等角度进行了综述,而文献[14]侧重于韧性破坏类型与评价方法,文献[15]对韧性研究需要关注的重点问题进行了详细说明,但几乎没有研究者专门针对综合交通系统的韧性研究进行综合分析.综合交通系统相关的韧性研究内容多样、方法不一,例如文献[16]提出一种高效的多模式城市交通出行评估算法来计算多模式交通网络中的覆盖率,进而实现韧性评价;文献[17]提出一种综合考虑节点连通性、多模式交通及服务能力的加权多层网络节点重要性评估方法,用于识别网络中的关键节点,从而可以针对性地进行韧性提升.当前已有一定数量的相关研究,但在综合性、研究深度与实际结合等方面仍有不足,值得系统性整理并为未来的相关研究提供一定参考.

本文检索了发表时间在2014年至2025年(截至2025年4月30日)的综合交通网络韧性相关研究成果.筛选的原则是研究应当涉及2种或以上交通方式之间的相互关联,且与韧性相关.在文献检索平台Web of Science和中国知网中按照相同的逻辑检索与筛选.最终的筛选结果包括近90篇外文文献与30余篇中文文献.年份分布方面,2015年及以前综合交通系统韧性研究很少,在筛选结果中不足5篇.综合交通系统韧性的研究成果近年来总体呈逐年增加的趋势,与单方式交通韧性研究的趋势基本一致[18],但由于研究数量较少,呈现出更明显的波动特征.本文主要从研究对象与目的、韧性表征指标、网络构建方法、破坏场景设置等方面,针对筛选得到的综合交通系统的韧性研究成果进行总结与分析,并提出了当前研究存在的不足与未来的研究方向.

1　研究对象与目的

1.1　研究对象

综合交通系统被视为两种及以上交通方式组成的交通系统.根据不同交通方式在服务范围方面的差异,研究对象可以主要划分为两类.

第1类:城市间综合交通网络.城市与城市之间的综合交通网络韧性的研究范围,可以是城市群范围,例如京津冀[19]、呼包鄂[20]等,也可以是更大范围,例如全省[21]、全国[22].在交通方式方面,铁路(常为高速铁路)几乎是必然考虑的交通方式,公路和民航常作为另一种交通方式.

第2类:城市内综合交通网络.主要聚焦单个城市内部的不同交通方式,对应的交通方式主要包括汽车(驾车、出租车)、公交车、轨道交通(地铁、有轨电车、市域(郊)列车等),也有自行车[23]、渡轮[24]等特殊的交通类型,低空航空器作为新兴的公共交通方式也开始被一些研究所考虑[25].针对两种交通方式的研究较多,在城市内综合交通网络中,轨道交通几乎是必然被考虑的一种交通方式,地铁与公交的关系被研究得最多,此外也有一些研究考虑地铁与一般道路、出租车的关系,或者多层次的轨道交通[26].还有研究考虑了3种及以上的交通方式[17, 27-29].

在一些研究中,城市间交通和城市内交通的关系被模糊化了.例如,Zhao等[30]研究西安都市圈的多层次轨道交通,同时考虑了城市内的地铁与连接都市圈各城市的高铁、城际铁路等.事实上,城市间与城市内综合交通系统的主要差异在于不同交通方式的特性、出行的特征等,它们在研究主题、研究方法等方面并没有本质的区别.

在对不同交通方式的关系处理中,各研究不尽相同[31].在综合交通系统的韧性研究中,最多的类型是按照各种交通方式完全等价的地位建立综合交通网络,而不是进一步分析交通方式之间的关系;少量研究考虑了主要交通方式失效时,另一种交通方式提供的替代或接驳等[32-35].通常而言,不同交通方式之间的关系具体可以分为替代、互补与合作3种.Hong等[36]提出了竞争与互补的关系,但没有作深入讨论.Li等[37]对相互依赖交通系统的韧性进行了系统的综述,并展开介绍了多模式交通系统研究当中的互补和替代,其中,“合作”被纳入了“互补”.

1.2　研究目的

当前对综合交通网络韧性的研究目的通常包括3个方面.

方面1:系统韧性评价.研究者提出评价指标,一般着眼于完整的交通系统,对其韧性作出衡量.通常,韧性评价需要基于破坏场景,根据破坏前后的交通网络特性、出行特征等的变化,定量分析交通系统的韧性.这也是交通系统韧性研究最常见的类型.

方面2:关键组件识别.部分研究通过针对综合交通网络中各部件的特性指标,识别关键的网络部件,让这些部件得到更多的重视,做更好的准备,从而相对不易被破坏,或是在破坏后可以更快地恢复,以此提升交通网络的韧性水平.例如,孙小慧等[38]提出了均方差-理想解距法(Mean Square Error-Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, MSE-TOPSIS)综合评价方法识别城市地铁与常规公交关键站点与线路;Feng等[39]使用圆形最大覆盖集的方法识别关键区域;Du等[40]通过运筹方法求得衡量网络储备容量的指标,通过删除某条连接的差值衡量连接的重要性.

方面3:系统韧性提升.主要应用运筹方法,在破坏发生前设计一定的预防措施,或是在破坏发生后采用特殊的策略缓解网络压力、修复受损的网络组件.

2　韧性评价指标

综合交通网络韧性相关研究的一个重要基础就是韧性评价指标的构建,而如何定量地衡量韧性,目前并没有广泛认可的标准.不同学者按照不同的维度提出了许多不同的衡量指标[8, 41].通常,这些指标在破坏前后会发生变化,而具体的变化特征就可以用来衡量交通系统的韧性.许多研究使用这些指标变化量随时间的积分来计算破坏-恢复全过程的韧性,即韧性三角形图中性能曲线与正常性能水平线围成的面积[42],如图1所示.图1中:t_0、t_1、t_2分别是系统开始受到破坏的时间、系统性能下降到最低的时间(通常是开始恢复的时间)、系统完全恢复至正常性能水平并保持稳定的时间(特殊条件下恢复并稳定时的性能可能低于或高于100%);$P(t_0)$、$P(t_1)$、$P(t_2)$分别是3个时间点对应的系统性能.

不过,在已有研究中,并非所有的指标都是基于性能构建,例如将节点特征的分布特性作为指标、用层次分析法确定整合指标[19]等.这些指标主要可以分成基于网络分析和基于出行者视角两类,还有将不同指标整合而成的新指标及针对综合交通特点特殊设计的指标.

2.1　基于网络分析的指标

指标完全基于网络的拓扑特性建立.在韧性研

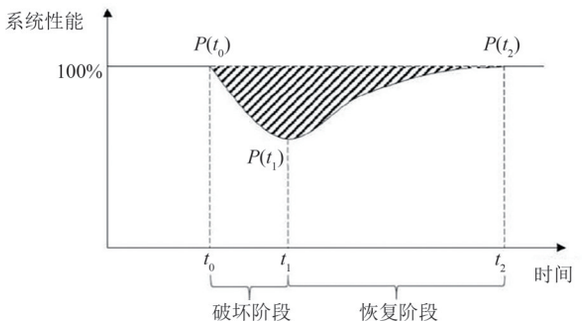

图1 韧性三角形[10]

Fig.1 Resilience triangle

究中,交通网络通常被抽象为加权图,然后就可以利用图的节点、边等相关的参数来定义用于韧性评价的指标.目前的综合交通系统韧性研究中,采用基于网络分析的指标最常见.

2.1.1 最大连通子图

最大连通子图(The Maximal Connected Subgraph),有时也称为最大连通组件(The Largest Connected Component),一些研究直接采用或在整合指标时采用了这一指标[38,43-49].交通网络受到破坏后,网络可能会被拆分成多个相互不连通的部分,其中最大的部分即为最大连通子图.该指标通常用来衡量破坏的影响,具体的定量方法一般为最大连通子图的节点数占整个网络的比例[46].最大连通子图存在一些变体.例如,Ma等[47]将最大连通组件客流的变化作为衡量指标,而Xu等[24]则将鲁棒性指标表示为最大强连通组件大小对移除节点分数的积分.

最大连通子图的优点在于使用起来非常方便,它是图最基本的特征之一.然而,它的应用范围有明显的限制,对破坏场景有一定的要求.它需要用在存在较大破坏场景的研究中,因为较小的破坏往往不会发生网络的分解,最大连通子图的规模也就没有任何变化,因此它是级联故障研究中常用的指标[46-48].有的研究中的蓄意攻击会产生较大的网络破坏,也会采用该指标[44-45,50-54].

2.1.2 平均网络效率

平均网络效率指网络中所有节点对之间最短路径长度倒数的平均值,其表达式为[55]

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

式中:E是平均网络效率;N代表网络的节点数;V代表网络中全部节点的集合;d_{ij}代表节点i与节点j之间的最短路径长度,它可以是距离,也可以是时间.

破坏前后网络效率的变化,可以用来衡量综合交通网络的韧性[45,50,55-57].也有直接使用平均最短路径长度的,且通常伴随着其他指标一起使用[17,29,45,56].距离本质上是边的权重,因此也可以使用最短通行时间来计算网络效率[22,58].Hong等[36]研究计算了基于时间的可达性,采用了时间的倒数,本质上和网络效率也是同类指标.

网络效率计算也较为简便.不过,当一些网络组件脱离最大子图后,它将失去良好的定义,需要进行说明或是采用特殊的建模方法;而当OD存在明显的不均匀分布时,由于它直接对OD对数平均处理,可能无法较为准确地反映网络的运行情况.此外,对于综合交通网络,节点可能具有多重性,例如公交车站与地铁站的耦合,此时需要为网络效率作出更加细致的定义与说明.

2.1.3 网络部件的拓扑指标

复杂网络的拓扑指标包括度(Degree)、介数(Betweenness)、紧密性(Closeness)等,在此基础上,可以定义度中心性、介数中心性等指标[59].这些指标常用于评价节点或边的重要性,从而识别关键的网络部件[38,59-62].将其用作性能指标衡量韧性时,通常需要对全网进行求和、平均等操作.例如,Liu等[63]将性能定义为节点度的和,用节点度之和的相对变化衡量网络的结构韧性;Wang等[28]将网络平均节点度、平均介数中心性、平均邻近中心性作为系统供给指标.

目前,使用此类指标的综合交通研究相对较少,可能与多层网络的性质相对复杂、拓扑指标存在不同的计算方法有关,这其实与平均网络效率存在的问题类似,例如节点是否合并、换乘边不同的设置都会导致不同的计算结果.

同时,基于节点或边的网络指标的整合亦会被考虑,例如节点或边特征分布的均衡程度有时会用于韧性衡量.基尼系数是衡量均衡程度的常用指标,例如王永岗等[64]考虑网络中复合节点数量,用基尼系数衡量站点分布均衡度,以评估网络脆弱性;Xu等[24]计算了节点度或者介数中心性相关的基尼系数.类似地,强添纲等[27]将节点强度的分布作为加权复杂网络特性的度量指标.基尼系数通常是其他指标的进一步延伸,仅通过基尼系数本身并不能良好地反映交通系统的韧性.

熵也是将所有网络部件的指标值整合成网络特征的方法之一.熵的基本表示为

$$H=-\sum_{i=1}^{N}p(i)\log_a(p(i)) \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{N} p(i)=1 \tag{3}$$

式中:H是熵;a是底数;$p(i)$是网络部件i(通常是节点)的某种特征.

Zheng等[43]提出标准结构熵,底数a取自然对数e,$p(i)$是部件重要程度.马书红等[65]采用Shannon熵量化城市群节点的多样性特征,底数a取2,$p(i)$是节点i的度与网络总节点度之比;Chen等采用一样的$p(i)$定义,但将a取为e[66].此外,有时熵需要利用最大值与最小值进行归一化[43, 66].

2.1.4　其他网络相关指标

某些与网络特征相关的指标不符合最大连通子图、平均网络效率、网络部件的拓扑指标的特点,这些指标本身之间也没有特别显著的共性.例如,Sun[67]研究级联故障,将攻击后失效节点比例作为鲁棒性指标,Liu等[63]将剩余节点的承载能力之和用于衡量功能韧性,马书红等[68]用破坏前后节点强度(与节点相连边的权重之和)的变化量被作为功能韧性评价指标.Li等[69-70]有关高铁对航空网络互补效应的研究中,航空网络的性能被定义为航班数量与飞行时间的比值对所有机场对的平均,这两个变量事实上也反映的是网络特征.马书红等[65]在另一项研究中,将平均独立路径数量纳入韧性评价指标之中,考虑了网络部分破坏后替代路径的选择;类似地,Jia等[71]提出了路线多样性指标,以衡量节点在整个网络中的重要性,从而进行脆弱性分析.潘恒彦等[72]使用出行绕行系数衡量公交-地铁加权网络的鲁棒性.这样大量形式各异的指标也说明,当前对于交通韧性的衡量没有特别统一的准则,一般根据研究对象与需求确定合适的指标.

2.2　基于出行者视角的指标

提高交通系统韧性的目的之一就是提高出行成功率、节约出行成本,即尽可能减少破坏对出行者的影响.因此,从出行者的角度出发,往往能更真实地反映交通系统的服务水平.不过,它通常要求研究者使用真实的OD数据,而这样的数据可能并不容易获得,并且从出行者角度计算韧性指标可能对算法设计、计算设备有更高的要求,因为数据量的大幅增加可能会导致计算时间的显著延长.

从出行者角度提出的韧性评价指标,一般都与交通系统的性能相关,即通过破坏前后的差异反映韧性.

2.2.1　需求满足水平

在一些研究中,研究人员使用综合交通系统满足交通需求的水平来衡量系统韧性,但在具体指标上存在不同的定义方法,有成功的出行所占比例、未受破坏影响的出行所占比例、未转移到其他交通方式的出行所占比例等类别.潘恒彦等[72]用出行失败率衡量公交-地铁加权网络的鲁棒性;马壮林等[73]认为乘客出行会因为车辆跨越客流饱和车站而受影响,因此将车站失效后出行未受影响的客流的比例作为韧性的指标之一.在Gong等[32]的研究中,性能被定义为某一时刻下轨道交通网络内的通勤者总数与正常情况下的比值,因为减少的乘客是往公交网络转移的,因此这个指标实际上就是地铁网络满足需求的比例.Jiang等[74]研究了铁路-航空复合网络,采用的鲁棒性指标为剩余有效OD流量之和,而流量使用运筹方法求得.Hua等[75]将网络的生存性(Survivability)定义为公交网络承接的因地铁中断受影响的客流比例.他们研究轨道交通中断后公交的接驳,采用线性规划方法,先最大化未受影响的需求,然后在受影响需求中,最大化转移到公交网络的乘客需求以衡量网络的生存能力.

2.2.2　出行总成本

时间与费用是出行成本的主要组成部分,而舒适度、环境等因素也存在一定影响[76],它们可以结合起来形成广义出行成本指标,例如网络受到破坏可以等价于乘客的广义出行总成本增加.因此不同于从时间角度定义的网络效率,出行总成本可以用作从需求角度来衡量交通网络韧性的指标.常见的方法是将总出行时间作为性能指标,用破坏后性能的下降率,或者一段时间内性能相比正常水平的总下降程度(积分)衡量韧性[21, 77].例如:使用破坏前后乘客总出行时间或总广义出行成本的比值来衡量脆弱性[60, 78];将系统功能量化为城市间的加权最快旅行时间后,用破坏前后的时间差衡量功能损失[79];将时间差进一步积分以得到韧性指标[21];将时间和票价的相对变化加权作为乘客需求指标,与系统供给指标加权得到韧性指标[28].而马文欣等[80]将总出行成本的倒数作为性能指标,在出行成本的优化计算中考虑了出行方式选择与传统的使用者均衡原则.

使用出行成本来衡量综合交通网络韧性存在一些局限性.例如,如果出行者改用其他的交通方式,其出行成本的变化将无法很好地量化.如果交通网络的破坏太严重,则出行者可能取消出行,或者因为不存在可行的路径导致无法出行,出行失败导致的损失同样很难被量化.此时,可能需要作出一定的假设来计算出行成本的变化,例如将出行失败看作出行时间的大幅增加.

2.2.3 可达性

可达性一般衡量出行能否顺利、高效地进行，但其具体含义较为广泛，不同研究对其存在不一样的定义，通常由其他类型的指标处理得到．其中，对网络相关指标进行处理是常见的定义方法之一．例如，肖明辉[81]将节点的可达性定义为其可以到达的节点比例，对网络平均后用于衡量脆弱性．崔欣等[34]提出网络效率可达性指标，是客流量与时间的比值对OD求和，再用总客流平均．另一种定义方法是通过一定时间之内可以到达的区域范围来衡量可达性．例如，Zhang等[82-83]的研究，采用一定时间阈值内的可达性作为性能指标，可达性被定义为可以到达区域的人口与总人口的比值；Lee等[84]采用随机漫步模型，利用平均首次通过时间衡量网络的可达性．

还有一些研究在传统的可达性模型上进行优化．传统模型中，交通小区x到交通小区y的可达性可以表示为

$$A_{yx}=\left(\frac{h}{h+m}\cdot\frac{z_h\left(t_{xy}\right)}{z_{0h}\left(t_{xy}\right)}+\frac{m}{h+m}\cdot\frac{z_m\left(t_{xy}\right)}{z_{0m}\left(t_{xy}\right)}\right)^{-k} \tag{4}$$

式中：h和m代表两种不同交通方式的交通量；$z_{0h}\left(t_{xy}\right)$和$z_{0m}\left(t_{xy}\right)$代表两种交通方式在网络发生故障前从$x$到$y$的阻抗总和；$z_h\left(t_{xy}\right)$和$z_m\left(t_{xy}\right)$代表网络发生故障后的阻抗总和，阻抗通常考虑为时间、广义成本；k代表出行成本衰减参数．

式(4)对所有出发小区y进行加权、求和等操作之后(不同模型可能有一些差别[85-86])，可以计算得到小区x的可达性指标A_x．路庆昌等[85]在可达性模型的基础上进行改进，以评估地铁公交竞争合作关系对公共交通网络可达性的影响；赵桂红等[86]在传统的汉森整体可达性指数基础上，改进了效用和分担率函数，提出联运节点可达性指标，通过可达性损失反映脆弱性．

2.3 整合式指标

鉴于单一性能指标无法从多个角度衡量综合交通系统韧性，有些研究整合了多种不同的性能指标以得到系统韧性衡量指标．其中，最简单常见的方法就是采用平均或人为指定参数的方式来加权，例如Ju等[87]将网络异质性、相关系数、平均路径长度、加权网络效率4个指标作归一处理后加权，得到系统韧性指标；Zheng等[43]对网络效率、最大连通子图、标准结构熵3个指标加权(实际研究中权重全部取1/3)，得到合成指标；Wang等[46,88]将节点度、相邻边权重、介数中心性3个指标以乘积形式加权，衡量节点的重要性；鞠艳妮等[89]采用熵权法(Entropy Weight Method，EWM)，整合吸收能力、适应能力、恢复能力3个维度的性能相关指标，得到韧性指标．

在是否对客流加权、如何加权方面，不同研究也有差异性．总体而言，除了将出行总成本相关指标作为韧性衡量指标的研究之外，在指标中考虑客流因素的研究很少，而且通常只对效率这一指标进行加权．Ju等[77,87,90]的研究中，网络效率对客流进行了加权；Chen等[91]采用时间倒数，并对乘客数量进行加权得到性能指标．这可能是因为并非所有研究都能获取到所研究交通网络的客流OD数据，因此许多研究并未进行加权．

2.4 综合交通网络特殊指标

综合交通网络较为特殊的一点在于不同交通方式的异质性，这使得它们之间的关系会显著影响到网络的性能．考虑综合交通网络的特殊性，许多研究提出了专用于多层网络的指标．Ju等[87]采用网络异质性的指标，考虑了多层网络间的相连边．Lu等[92-93]提出了拓扑依赖性与功能依赖性，以评价相互依赖网络的韧性．王永岗等[64]提出子网敏感度，以评价某一种交通方式节点被破坏后对复合交通网络的功能影响程度，并在另一项研究中提出耦合强度、控制度、协同度3个指标衡量交通网络的耦合脆弱性[94]．刘志勇等[95]提出层间关联性指标并给出了构造方法，分析地铁网络与公交网络耦合节点的关系．张琳等[96]提出复合网络效率与复合网络最大连通率，认为应当分别计算子网络的指标后，求和得到复合网络的指标值．Ouyang等[97]提出动态互补强度，以表示破坏事件下互补效应对韧性提升的作用．不过，提出特殊指标的研究总体上比较少，这些指标之间也没有比较明显的共通性．

3 综合交通网络建模方法

综合交通网络韧性研究的重要基础是综合交通网络建模．支撑综合交通网络韧性研究的网络建模通常需要解决两个方面的问题：一是如何将综合交通基础设施抽象构建为可供分析使用的网络模型，包括基本结构与破坏恢复过程中的变化；二是在研究过程中交通网络属性是否动态可变．

3.1 基本网络抽象建模

与单一交通方式网络建模不同，由于不同交通方式存在不同的网络形态且需要实现不同的单一交通网络之间的互联互通，由此对综合交通网络建模提出新的要求．

3.1.1　基本建模方法

交通网络常用的建模方法主要有L空间、P空间、R空间(Space L, Space P, Space R)3种.3种建模方法各有其适用场景,目前在综合交通网络韧性研究常用L空间和P空间建模方式.

L空间是实际的物理空间,交通工具的停靠点作为节点,运行线路作为边(道路、铁路、航线等)[29, 98],因此,边的权重往往有非常清晰明确的含义,可以是边的通行成本(时间、费用)[44, 73]、边的通行能力[99]、边的实际客流承载量[63]等,这是其他建模方式无法做到的.

P空间的节点与L空间一样,为现实中的站点,但是,只要两个节点之间有任意班次的交通工具直达,就在两个节点之间连边[98].P空间忽略了线路上的车站顺序,它能够直观地表征可达性[69],可以在边权重上反映两个节点之间的通行成本与直达客流;它还可以更加方便地计算换乘相关的内容,如换乘次数[100].

P空间与L空间节点或边的拓扑特征可能代表不同的含义,可用于评价网络部件不同角度的重要性[101].但当涉及破坏时,P空间不如L空间网络直观.对于直达为主的交通方式,例如民航,L空间和P空间没有明显的区别,但对于公交、地铁等一条线路串起多个车站的交通方式,网络建模方式需要仔细考虑.整体而言,L空间比P空间具有更好的适用性,因此使用L空间建模的研究明显更多.

3.1.2　多方式网络整合方法

为表征不同的交通方式,通常情况下研究者会建立多层交通网络,不同的交通方式分别占据不同层,由此引出如何整合多层网络的问题.

研究城市间的交通时,可以把不同交通方式的邻近站点合并为一个节点,例如把一个城市的多个高铁站和机场合并,作为城市的唯一节点[22].但是,在城市内的尺度中,换乘的影响往往不能忽略,因此不同层之间的邻近节点会用换乘边相连,如图2所示.两种不同交通方式的站点能否换乘,通常由它们之间的距离(或换乘时间)所决定.换乘距离一般采用欧几里得距离[71],也可根据城市形态特征采用曼哈顿距离,而最准确的距离计算方式是调用地图API,例如高德地图[76, 102].不同的研究设置了不同的极限换乘距离,通常位于100~500 m区间[47, 54-55, 63, 90, 92, 102-103],准确地确定这个数值可能需要通过问卷调查的方式[99].此外,这个距离和广泛采用的慢行交通方式有关,显然,如果某个城市有大规模的公共自行车或共享单车服务,在价格方面具有竞争力,且道路布局对非机动车友好,那么该城市的极限换乘距离可以增加[29].

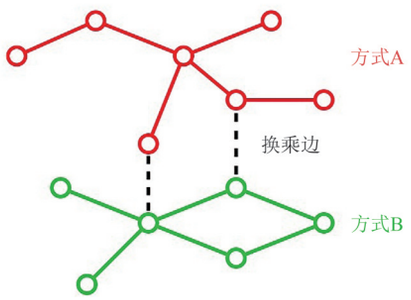

图 2　引入换乘边的多层交通网络示意图

Fig.2　Schematic diagram of a multilayer transportation network with transfer edges

此外,根据不同的研究需要,也有特殊的网络建模方式.例如,Liu等[104]将不同交通模式分为控制层与不可访问的其他层,某一层的节点失效会导致其他层的对应节点一起失效.但是,控制层的节点在失效时,如果其他层的节点能够保持连接,则可以添加自适应连接来重新接入最大连通子图,从而实现鲁棒性的提升.

3.1.3　网络的有向性和多重性

网络的有向性和多重性通常根据不同的研究需求来确定.如果涉及交通边的流量,尤其是存在单向过载中断、单向排队等有方向的特征,则有向图比无向图更为合理,例如,Ju等[87]的研究考虑了边上的客流,采用有向图研究重庆周边各种轨道交通的韧性.如果以拓扑特征作为研究的主要内容,则无向图基本可以满足研究需求[20, 58].另外,可能出现某种交通方式上下行通行特征明显不同的情况,例如普速铁路不同时期建设的上下行线、轨道交通不同结构的换乘通道存在不同的通行时间,道路单方向通行等.如果需要更准确地求解交通网络模型,需要考虑这些因素.

多重性也类似,研究精确到线路层面的流量或考虑并行边中断时,建立多重边的网络可能更合理;如果不研究流量或不同边的流量可以合并,则可以不设置多重边[45],此方法可降低网络的复杂性,可能有利于提高计算效率.事实上,很多研究采用不同交通方式边不合并、同一交通方式边合并的建模方式[28, 63].当然,如果按最精确的建模方式,不同线路的共用站点也进行拆分,用换乘边相连,则网络中一般不会出现多重边[44].

当然,并非所有综合交通相关的韧性研究都要建立完整而复杂的交通网络.有的研究着眼于一种

交通方式中断后另一种交通方式的临时接驳，在这种情况下，研究中断的线路及少量相关的线路即可，例如Zheng等[33]研究了地铁线路区间中断的情况下，从附近枢纽站调度接驳公交的运营策略，并以广州地铁的一次中断为例说明了提出策略的可行性.

3.2 网络的破坏与恢复建模

韧性评价必须经历破坏的过程，由此才能通过交通网络前后状态的变化实现对韧性的衡量，而韧性指标如果是通过积分计算，则通常也需要考虑恢复过程.破坏与恢复相当于外界对交通网络施加影响，使得网络的结构、状态等发生变化，破坏使得网络部件性能下降或失效，而恢复则让这些部件重新执行其功能.

3.2.1 破坏类型

破坏主要存在两种类型：①基础设施失效导致的破坏，例如边、节点的中断等，在现实中，这可能是自然原因、非故意的人为原因，也有可能是故意的破坏和管制措施等，目前的大部分研究是以此类破坏为主.例如，Zhang等[82]研究了2021年郑州暴雨对综合交通网络的影响.②因为客流大于节点或边的承载能力导致的破坏.在这种情况下，对应的节点或边可以保持运营，但剩余的客流会出行失败，或是转移到其他节点和边完成出行[47]；过多的客流涌入也有可能导致节点关闭，所有进出该节点的客流都需要转移[73].异常客流导致的破坏多见于动态韧性研究中.

具体到某类方式的基础设施，则其破坏场景通常各具特点.例如，地铁主要存在两种破坏方式：第1种是线路运营中断，线路中某一个区间出现故障，导致该线路无法折返的多个连续路段，不再提供服务，而中断点两侧仍可以通过折返的方式维持一定的运营能力[105]；第2种是车站关闭，乘客无法在该车站进出，列车通过不停靠[63,90].如果换乘站被破坏，换乘功能可能取消[72]，但也有可能在取消进出站的同时维持站内换乘功能.因此，对于不同的交通基础设施，需要根据研究场景选择合理的一种或几种破坏方式.

不同强度的破坏会造成不同程度的影响，强度可以从两个维度来衡量：第1种是破坏的范围，破坏的节点与边越多，造成的影响一般会更加显著；而对于不同重要性的节点或边（例如交通量不同），破坏造成的影响通常也不一样；第2种是破坏的持续时间，时间越长则越容易造成更为严重的影响.

3.2.2 破坏模式

大部分研究从理论上主要考虑了随机破坏与蓄意破坏两种模式.随机破坏通常是按照随机的顺序选取节点并删除，而蓄意破坏则通常挑选某种指标最高的节点进行，按照该指标由高到低的顺序依次进行破坏.这些指标通常是2.1节中的节点或边的拓扑指标.例如，Aparicio等[106]的研究考虑了按初始度、初始介数中心性（移除之前计算完成）、更新度、更新介数中心性（每移除一个节点后重新计算）4种方式依次删除节点的主动破坏策略；刘志勇等[62]将节点的入度、出度、聚类系数、邻近中心性、介数中心性5个指标整合成重要性指标，通过正序、倒序攻击的方法评价鲁棒性.蓄意攻击也可以按一定规则攻击特定区域，而非简单地删除节点或边，如Chen等[107]将原始网络划分为社区，并改进了已有研究中基于社区的攻击策略.

针对实际场景，所考虑的破坏模式则是相对随机且具有一定影响范围的破坏（例如自然灾害），通常有以节点为中心的破坏、圆形破坏、基于区域的破坏模式[108].在破坏场景建模中，应当根据研究需要与破坏类型，选择合适的破坏模式.例如，Fang等[109]研究高铁-航空网络在台风下的韧性特征，选择了以省份作为影响区域.

3.2.3 恢复

目前对恢复阶段作出详细研究的文献较少，大部分研究只是简单地指定了恢复速度、顺序等参数，或采用临时增大道路容量等方式[80]进行韧性计算，这与当前难以获取恢复期的真实数据有关.例如，Zhu等[110-111]提出了基于逻辑斯谛（Logistic）曲线的韧性恢复曲线，研究了飓风影响下道路（出租车）和地铁网络的恢复行为.不同交通方式受破坏的性能下降情况与破坏后的恢复速度有一些差异，Fang等[109]聚焦于此，展开空铁互补网络应对台风韧性的研究.

此外，即使采取类似的恢复策略，网络在执行策略后实际的恢复过程也可能会因破坏强度、位置等因素的不同而表现出差异性，这通常会出现在使用动态型网络建模的研究中，例如，马壮林等[73]在多个场景下分别测试了4种不同的恢复策略，研究网络公交-地铁网络的韧性.

3.3 网络模型动态性

网络模型的动态性主要指在韧性评价的时间段内，网络的状态（流量、节点和边的状态等）是否会随时间发生变化.

3.3.1 静态型网络建模

目前，大部分有关综合交通网络韧性的研究都是相对静态网络的研究.静态研究更多地着眼于网

络拓扑结构,对客流在交通网络中移动特征的考虑相对较少.静态韧性研究通常考虑鲁棒性维度,通过破坏前后系统性能的变化进行韧性评价.

有些研究虽然从表面上看是动态过程的研究,但实际上采用了静态韧性的研究与评价方法:网络演变过程仍然是相对静态的,某个时间点的网络状态对之后的状态没有影响.这类研究通常考虑的是恢复阶段的韧性,例如Fang等[109]对高铁-航空复合网络在台风影响下韧性的研究中,指定了恢复速度,因此每个时间点的网络状态都是直接确定的,可以直接计算性能;实际案例研究中可能也会存在这样的情况,因为网络状态的变化全部来自真实数据,无需考虑前后状态的相互影响.本综述中的动态过程指当前的网络状态会对之后的网络状态产生影响,后续的网络状态无法直接确定;网络状态按确定方式随时间变化的研究场景不被视为动态.

3.3.2　动态型网络建模

动态韧性研究,最常见的即为对级联故障过程的研究.交通网络中的级联故障指网络中某个位置发生破坏,导致相互依赖的网络部件也发生故障,使得故障在网络中不断扩散,可能导致网络的崩溃[29].一些级联故障研究采用耦合映射格子(Coupled Map Lattice, CML)理论建模.它的基本原理是把时间分解成时间步,节点i在时间步t的状态(一般指饱和度,正常取0~1,大于1则发生故障)受它和邻近节点在时间步$t-1$状态的影响,采用耦合系数对本节点与相邻节点加权,用映射函数描述$t-1$时刻节点状态与t时刻状态的联系[29, 47, 73].

故障的扩散通常是客流的重新分配导致的,原失效节点的客流被分配到邻近节点,导致邻近节点因客流过载也发生故障.非线性负载容量模型(Nonlinear Load Capacity Model, NLCM)考虑了客流分配的特征,在该模型中,节点的初始负载是相连各边权重之和,节点容量是关于初始负载的非线性函数;故障后,客流按相邻节点容量大小加权分配到这些节点上,当新的负载大于容量时,则该节点失效,级联过程继续.一些研究均利用该模型研究了公交-地铁双层网络的韧性[28-29, 63, 112].研究客流的重新分配还有其他类似的方法.Sun[67]在传统方法上进行改进,通过节点度导出流量指标,然后定义节点初始负载,并确定分配比例;Wang等[46]的分配比例通过其定义的重要性指标来确定.在Guo等[55]研究中,饱和车站仍可以运作,而剩余客流参与分配,分配规则综合考虑了节点的剩余容量与中心性;赵成勇等[113]提出的负载重分配模型则考虑了节点间的运输效率和节点的综合重要度.Yang等[114]研究城际交通的级联故障,提出破坏后在城市内换乘和在一个新城市换乘两种方案,并考虑换乘站距离、时间成本等因素进行多路径客流分配.

除了常规的级联故障与客流分配外,马书红等[68]提出了一种风险扩散模型,给节点赋风险水平值,当风险水平高于一定数值时,风险增量按照一定的比例在网络内发生扩散;Gong等[32]提出了一个改进的通勤客流模型,正常运营时以最小化平均系统负载为优化目标,从而计算得到不同时间点网络的状态.

3.4　综合交通建模的特殊处理

针对综合交通网络的特殊性,一些研究提出了专门的方法用于反映其某些性质.

变更出行方式是综合交通网络研究的重要内容.如3.1.2节所述,大量研究采用简单地为换乘边赋权的方式来反映.仅有少量研究创新了研究方法与假设:有的研究采用限制换乘次数的方式考虑多层交通网络的性质,例如Feng等[57]研究高铁-航空复合网络,将换乘次数限制为2次以内,这符合人们的出行习惯;有的研究采用在不同网络层之间转移的概率来建模,例如Baggag等[16, 115]用随机游走模型模拟出行者在网络中的活动,用一定时间内随机游走的覆盖范围评价韧性,考虑了层间转移与层内转移的不同概率,以体现综合交通网络的性质.

公共交通是综合交通系统的重要组成部分,相对固定的时刻表是其重要特征之一,不同交通方式的班次密度、前后运行的时间关系会对韧性存在一定影响,因此将时刻表纳入交通网络建模有利于准确反映综合交通系统的特征.例如,Jiang等[74]针对高铁-航空复合网络,提出了一种新的K-最短路算法,考虑了时刻表与方式换乘,将K定义为换乘次数;Bocewicz[116]研究由环线公共交通组成的耦合网络,考虑了时刻表及节点车辆停靠能力限制,故障可能导致车站有轨电车和公交的服务顺序发生变化,进一步引发网络锁死的情况.

4　韧性提升策略研究

韧性提升覆盖交通系统破坏-恢复的全过程,在发生破坏前、恢复过程中等不同的阶段都可以实施策略,以提高系统的韧性.有关韧性提升策略的研究大多建立一层或多层运筹优化模型(如随机规划[117]、混合整数规划[57, 78]等),在成本、容量等方面作出限制,使用求解器[57]、遗传算法[86, 118-119]等方法计算,求出实现韧性最优的方案.韧性提升策略通

常是由运营者实施的，韧性最优一般代表尽可能满足出行者需求，而部分策略则可能需要相关部门单位的配合，例如，涉及基础设施的规划布局；出行者根据对相关交通方式的了解、运营者的引导等，在破坏发生时调整出行计划，一般由模型假定其行为．韧性提升策略主要可以分为破坏前预防、破坏后响应、优化恢复策略3种，其中破坏后响应、优化恢复策略都是针对恢复过程提升韧性的方式．

4.1 破坏前预防

在破坏发生前，对交通系统的基础设施、资源供给等进行优化，通常是通过模拟的攻击，判断出系统的薄弱位置并给出优化方案．Feng等[57]建立了3层模型，自外向内分别为防御者、攻击者、运营者．运营者的目标是使无法满足的流量需求最小化，而攻击者希望将此最小化的流量需求最大化，而防御者的目标是让攻击者的目标最小化．利用3层模型，他们研究了如何在高铁-航空网络中分配有限的预防资源．Cui等[60]建立了3层模型来确定交通枢纽的选址，第1层优化目标为最小化广义旅行成本，攻击者将旅行成本最大化，而外层模型优化综合交通枢纽的位置，并使用列约束(C&CG)算法求解．Zhang等[120]采用线性规划模型，优化乘客出行成本与连通性、平衡性、多样性3个韧性指标，进行运营线路规划．Liu等[121]提出一个两级框架，重新设计电动公交网络，以加强与地铁网络的整合，提高系统在中断情况下的韧性．

4.2 破坏后响应

常见的响应方式是在破坏发生后，灵活调整其他交通线路或交通方式实现临时接驳，以满足受影响的出行者需求．地铁出现故障后，利用公交车进行接驳是其中最常见的研究内容．Luo等[117]建立了两阶段随机模型以寻找最佳的公交接驳方案：在第1阶段中选择最佳的接驳线路与频率，从而最小化所有不确定因素场景下未满足需求的期望与分配的接驳公交总数之和；在第2阶段中最小化未满足的需求．Zhang等[35]研究公交接驳，在给定最大行程时间、候选线路数量等限制下，以最大化疏散地铁乘客数量为优化目标．Zheng等[33]研究接驳公交的设计，建立了一个两层模型．第1阶段的规划模型优化公交车总的响应时间，第2阶段确定公交车前往受影响车站的顺序，以最小化滞留乘客和常规公交乘客的总延误时间．Ren等[78]针对公交-地铁复合网络的韧性提升，提出了局部调整公交运行线路的优化策略，并建立两阶段优化模型．第1阶段最大化不同场景下韧性的期望，第2阶段最大化韧性指标，并在指标中考虑K-最短路来反映路径选择．除地铁公交外，赵桂红等[86]研究高铁-民航网络的修复，将联运网络修复总成本分为路线距离成本和节点拥堵成本两部分，用粒子群算法优化目标函数．

某些情况下，现有交通方式可以满足网络被破坏后的出行需求．但是，乘客如果从自身最优的角度出发选择出行行为(例如选择最短路)，可能会因为部分路段流量过大造成拥堵、排队等异常，无法达到系统最优．因此，在破坏发生后，对乘客及时进行合适的出行引导也有利于提升交通系统的韧性．Mo等[122]提出了一个路径推荐模型，为不同出发地、目的地和出发时间的乘客推荐不同的路径，使系统的总出行时间最小化．

4.3 优化恢复策略

通过比选不同的恢复策略(例如选择不同的节点恢复顺序)，计算韧性指标并选出其中的最佳方案，以实现恢复阶段韧性的提升．例如，马壮林等[73]比选了随机恢复、最大介数恢复、最大效率恢复、网络韧性最大化恢复4种失效车站的恢复顺序，发现最后1种策略在不同破坏场景下均能实现韧性最优．具体而言，他们建立了一个时序优化模型，将积分而来的韧性指标作为优化函数．王淑良等[123]使用熵权法和理想解距法，从常见拓扑指标中导出新的综合指标，对节点的重要性进行排序，从而确定节点的恢复顺序，并通过武汉市交通网络的案例分析证实其恢复效率较其他策略更优．

5 优化与未来的研究方向

虽然近年来众多学者对综合交通网络的韧性相关的内容开展了多方面的研究，但从面向未来支撑综合交通系统建设、运营等角度考虑，受制于数据支撑、软硬件能力等因素，亦存在进一步研究与提升的空间．

5.1 韧性指标的进一步优化

目前已有众多研究对综合交通网络的韧性衡量指标进行了研究，未来综合交通网络韧性指标的研究还应加强对两个方面的考虑．

方面1：增加从需求侧构建韧性衡量指标．当前大量研究所采用的韧性指标和网络拓扑性能相关，而对需求侧的韧性衡量相对偏少．由于出行者是交通网络的使用方，满足出行需求、降低破坏给出行者带来的损失是提高交通网络韧性的目的，因此，从需求侧衡量交通韧性有很大的意义．当前常用的指标为满足需求的比例和出行成本的损失，未来，可以在这两个指标的基础上进行优化或创建新的指标，例

如对出行失败进行成本方面的量化,以更好地反映交通网络状态变化对出行者的影响.另一方面,需求指标有时相对不易计算,而网络结构与需求满足之间必然有着一定的联系.寻找这种联系,设置更能全面反映网络特性的拓扑指标,对评价韧性有积极意义.

方面 2:构建反映综合交通网络特性的韧性指标.当前综合交通网络韧性研究的指标大多与单一方式的交通网络无异,很少采用特殊的指标,而实际上综合交通网络与单一方式的交通网络存在一定差异,例如复合节点与换乘边,这可能导致常规的节点度、节点中心性等指标需要进一步做出解释,失去了清晰明确的含义.当前,缺乏一些广泛使用与普遍认可的描述综合交通网络的指标.与此同时,研究者提出综合交通相关特殊指标的目的更多为反映综合交通网络的某些耦合特征,而非韧性的直接评价;事实上,这些指标与交通系统韧性很少有直接关联,当需要评价韧性时,研究者还是会使用常见的一些指标,而将这些特殊指标作为辅助评价的工具.因此,需要寻找更合适的指标以描述综合交通网络的特征,并设法实现韧性的直接衡量.

5.2　破坏场景与乘客应对行为的深入研究

目前研究中综合交通网络的破坏场景建模与一般的单一方式交通网络没有太大的区别,因此存在着场景不够真实的问题[18].而综合交通系统韧性的研究应当对破坏场景提出更准确、更高的要求,例如破坏类型需要更精确,不应局限于节点和边的简单中断,而应更加具体地考虑多层网络的不同部位、不同交通方式的特殊特征等,3.2 节中介绍了多种不同的破坏方式,但在当前的综合交通韧性研究中尚未得到充分的认识与研究,有进一步深入挖掘的空间.

对于出行者,在城市环境中,破坏场景下慢行交通的重要意义并未得到充分的关注,仅有少数研究者(例如 Xu 等[29])将其作为研究重点.当前对于慢行交通的考虑,基本上局限于换乘边的设置及研究自行车与其他公共交通的耦合关系上.但是,在特殊情况下,步行或骑行的距离可以较长,超过站间距或研究者设定的换乘极限距离是普遍存在的情况.慢行交通几乎不会发生因拥堵导致的交通中断,对路径的选择也可以更加灵活,因此在破坏场景下,用慢行交通覆盖中断运营的路段是合理的选择,有时可能优于选择替代路径或变更出行方式,值得深入研究.不过,当使用较长距离的慢行交通时,可能会使出行费用的计算变得更加复杂,例如在中途采取慢行交通导致原有的连续计费发生中断、采用共享单车出行并支付骑行费用等,这对交通网络的建模提出了更高的要求.

乘客对不同交通方式的偏好也需要深入探索,尤其是正常的综合交通运输网络受到影响时.例如在城市中,相比于公交车,对时间敏感的出行者可能更倾向于乘坐地铁,甚至选择出租车,而更需要追求稳定出行时间的出行者通常会将地铁作为首选的出行方式.舒适度也会影响出行偏好,对于不喜欢拥挤环境及长时间站立的出行者,则出租车可能是其倾向于选择的出行方式;有的出行者倾向于步行更短的距离去乘坐较慢的交通工具,而不是通过更长的步行距离接驳更快的交通方式.在偏好的影响下,乘客可能不会轻易变更出行方式,而是选择等待恢复或变更出行路径[90].因此,研究涉及破坏发生后出行者选择的变化时,需通过问卷调查、获取智能卡数据等方式了解实际出行行为,确定出行者在方式选择上的偏好.当拥有实际出行数据,尤其是具体的破坏数据时,则可以考虑应用 Logit 模型、Probit 模型等以考虑更多影响出行者选择的个体、社会因素等,从而更准确地模拟破坏后的方式分担[124].

5.3　韧性分析的动态性

综合交通系统受到破坏到恢复的整个过程是一个动态变化的过程,其中,交通基础设施、出行需求、出行特征、交通运行等都处于动态变化中,相比于静态的交通系统建模,动态建模可以更好地模拟实际出行场景,反映交通网络的实时运行状态及韧性水平.因此,有必要搭建更加准确的动态模型.

目前,一些常见的动态模型可能并不能很好地反映综合交通网络的真实特征.例如,级联故障的一般原理是节点或边因为流量饱和而失效,并将失效以特定的规则扩散.但现实中,当流量饱和后,站点通常采取限流的方式维持运营,剩余需求则变更出行方式或通过慢行交通前往附近其他站点,包括级联故障模型在内的大多现有模型无法体现这种情况.当前的很多模型考虑长时间破坏对网络造成的最坏影响,而很多时候,破坏持续的时间相对短暂,网络未达到新的平衡状态时破坏即被修复或是消失.这样的场景需要采用新的动态建模方法,现有研究涉及较少,值得深入考虑.

另外一些模型中,当一个节点失效后,节点上的负载会按一定规则分配给相邻节点,流量也会按一定的规则重新分配.但是,模型通常未考虑负载转移所需时间及特定负载的转移方向,这导致韧性评估方法也受到限制,准确性受到影响,可能需要进行精细化的假设与建模.交通流量分配同样值得进一

步细化,例如不只关注最短路:交通网络可能存在非常多距离相近的替代路径,这些路径上均可以分配流量,精细的流量分配可能更符合出行者的实际行为.

在交通系统中,出行信息的影响不只是有助于引导乘客作出更合理的出行选择[122].在破坏发生后,乘客的出行行为还会依赖于信息发布的时间与位置:如果信息在破坏发生后立刻发布,那么可以有效避免中断节点处的客流积压,乘客可以在得到信息后立刻疏散;如果信息没有在线上发布或是不能在整个交通网络中同步,那么乘客只有在到达某些节点后才能得知信息并重新安排路径,会严重影响出行效率,但大部分研究的假设建立在乘客清楚实时破坏信息的基础上.它的影响最适合通过建立动态变化的交通网络来刻画,是值得研究的方向之一.

5.4 综合交通网络特性刻画

相对于单一方式交通网络韧性研究,综合交通网络韧性的研究需要考虑多方式网络的特征.一方面,当前大量针对综合交通系统韧性的研究仅考虑了两种交通方式的相互关系,而且研究区域范围普遍很小,例如公交-地铁复合网络的韧性提升研究通常只考虑一小片区域的少数几段线路.然而,现实中的交通网络更加复杂,因此,研究更多交通方式构成的综合交通网络对更好地模拟现实中的交通状况具有积极意义.另一方面,未来的研究中应当进一步考虑不同交通方式的异质性.当前大量研究的基本思路是建立换乘边,之后用一般的指标进行韧性评估.这样的方法中不同的边通常是完全等价的,虽然有助于降低复杂性,但忽略了综合交通网络一些足以对出行方式与路径选择产生重要影响的特征,例如出行的时间、费用、舒适度、交通方式的班次密度等.许多研究简单地考虑最短路进行韧性的评估,但是在综合交通网络中,最短路的方法通常有拓展的必要.例如,在给定出发时间的出行中,等待时间必须纳入考虑;在不同交通方式的选择中,费用必须纳入考虑,而常见的最短路算法无法简单地添加费用函数及考虑出站换乘等特殊情况.此外,不同交通方式的运营特征、对不同类型破坏的敏感程度、受破坏之后的恢复速度也不相同,这也是异质性的反映.不同交通方式服务的对象、范围存在差异,这种差异会导致不同交通方式之间的关系不同(即竞争、互补等),这样的关系如何影响韧性需要更多的考虑.

当前,针对单一交通系统的韧性研究已经比较深入,已有大量的成果,而针对综合交通系统韧性的研究还相对较少.在本质上,它们是具有互通性的,单一交通系统韧性研究的很多方法与技术值得在综合交通系统中加以应用,针对综合交通系统的特征作出相应的调整.这可以在更真实的交通环境中验证其所提出方法的普适性,为现实世界的交通管理提供支持.

更准确的综合交通网络特性刻画及精细化的动态交通系统建模与计算,都需要硬件与算法的支持.研究如何优化运算逻辑、提高计算效率可以为这些研究提供非常大的帮助,也可以结合新兴的计算机技术,提高建模的准确性与实用性.例如,数字孪生技术已开始在交通流仿真、交通韧性等领域应用[125-126],但在综合交通领域应用很少,利用数字孪生研究综合交通系统的韧性具有较好的前景.

6 结论

韧性作为保障综合交通系统在突发事件中维持功能、快速恢复的重要能力,已逐渐成为交通工程研究的重要方向,而研究综合交通系统的韧性对更加全面地反映不同交通方式之间的联系、更加准确地建模综合交通系统与乘客行为有着重要意义.

1)目前的综合交通系统韧性研究主要可分为城市间和城市内两个尺度,以研究两种交通方式之间的关系为主,针对系统韧性评价、关键组件识别、系统韧性提升3个主要方向开展研究.

2)对综合交通系统韧性进行评价所使用的指标类型丰富,大致可以分成基于网络分析的指标和基于出行者视角的指标两类,分别与网络的拓扑特性和对出行者的影响相关.许多研究将多个指标整合组成新指标,也有一些研究针对综合交通的特性提出指标,但仍存在指标不够贴合实际的问题.

3)对综合交通网络进行建模是实现韧性评价的重要支撑,研究多采用L空间和P空间两种建模方式构建多层网络,通过合并节点或设置换乘边连接不同层的网络,网络的有向性和多重性则根据实际研究需求确定.网络的破坏类型主要有基础设施失效和客流大于承载能力两种,采用随机或蓄意两种破坏模式,并设置不同的破坏范围;破坏后,一般指定恢复的速度与方式.网络模型可分为静态和动态两种类型.在网络建模方面,目前研究存在破坏恢复场景与乘客应对行为考虑不深入、交通系统动态性分析不完善等问题.

4)韧性提升策略主要包括破坏前预防、破坏后响应、优化恢复策略3大类,通常建立运筹优化模型,利用数学或计算机方法求得最优方案.

5）当前综合交通系统的韧性研究还存在综合交通特性刻画不足的问题,简化后的模型不能很好地反映真实综合交通网络的复杂性,忽略了一些会对出行方式与路径选择产生重要影响的特征.

后续研究,建议结合实际工作需求,更多从需求侧设置指标,并在指标中考虑综合交通的特性;设置更准确的破坏恢复场景,并在系统变化过程中考虑乘客偏好等出行者因素;建立综合交通网络更准确的动态变化模型,在其中考虑出行信息的覆盖率、时间延迟等特殊因素;充分考虑各种交通方式的关系及各自的异质性,尝试应用更多单一交通方式韧性研究的方法论.

参考文献(References):

[1] 李莹, 高歌, 程驰. 影响中国高速铁路运行的暴雨危险性特征研究[J]. 地理科学, 2021, 41(10): 1843－1851.
LI Ying, GAO Ge, CHENG Chi. Hazard intensity of rainstorm affecting high-speed railway operation in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(10): 1843－1851.(in Chinese)

[2] 裴剑飞, 刘名洋, 于越. 彩钢板撞击京沪高铁列车 致多车次停运[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(9): 121.
PEI Jianfei, LIU Mingyang, YU Yue. Colored steel plates hit the Beijing-Shanghai high-speed train, causing multiple trips to stop [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(9): 121.(in Chinese)

[3] 齐麟, 戴克娟. 雨雪天气下民航机场运输能力的韧性评价[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(3): 835－842.
QI Lin, DAI Kejuan. Resilience evaluation of civil aviation airport transportation capacity under rain and snow weather [J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(3): 835－842.(in Chinese)

[4] 游科春, 张友华. 不良天气环境下高速公路运营安全与管理[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(7): 160－162.
YOU Kechun, ZHANG Youhua. Safety and management of expressway operation in bad weather environment [J]. Transportation Technology and Management, 2023, 4(7): 160－162.(in Chinese)

[5] 孙杨世佳. 上海市轨道交通运营突发事件特征及对策研究[J]. 人民公交, 2025(8): 63－65.
SUN Yangshijia. Study on the characteristics and countermeasures of Shanghai rail transit operation emergencies [J]. People's Public Transportation, 2025(8): 63－65.(in Chinese)

[6] 宁尧, 张向峰, 李娟娟, 等. 恶劣天气下城市轨道交通运营韧性评估技术研究[J]. 现代城市轨道交通, 2023(5): 83－89.
NING Yao, ZHANG Xiangfeng, LI Juanjuan, et al. Research on assessment techniques for operational resilience of urban rail transit under atrocious weather conditions [J]. Modern Urban Transit, 2023(5): 83－89.(in Chinese)

[7] 北京市应急管理局. 北京地铁昌平线“12·14”列车追尾事故调查报告[EB/OL]. (2024-02-05)[2025-09-13]. https://yjglj.beijing.gov.cn/art/2024/2/5/art_7466_656.html.
Beijing Emergency Management Bureau. Investigation report on the “12·14” train collision accident on Beijing subway Changping Line[EB/OL]. (2024-02-05)[2025-09-13]. https://yjglj. beijing. gov. cn/art/2024/2/5/art_7466_656.html.(in Chinese)

[8] GONÇALVES L A P J, RIBEIRO P J G. Resilience of urban transportation systems. Concept, characteristics, and methods[J]. Journal of Transport Geography, 2020, 85: 102727.

[9] 黄建中, 胡刚钰, 石佳宁, 等. 城市交通系统的韧性研究: 概念、特征与议题[J]. 城市规划, 2025, 49(2): 119－130.
HUANG Jianzhong, HU Gangyu, SHI Jianing, et al. Research on resilience of urban transportation system: Concept, characteristics, and important issues [J]. City Planning Review, 2025, 49(2): 119－130.(in Chinese)

[10] ZHOU Y M, WANG J W, YANG H. Resilience of transportation systems: Concepts and comprehensive review [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(12): 4262－4276.

[11] 新华社. 中共中央 国务院印发《交通强国建设纲要》[EB/OL]. (2019-09-19)[2025-09-13]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.
Xinhua News Agency. the Communist Party of China Central Committee and the State Council issued *the outline for building China's strength in transport* [EB/OL]. (2019-09-19)[2025-09-13]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5437132. htm. (in Chinese)

[12] 新华社. 中共中央 国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》[EB/OL]. (2021-02-24)[2025-09-13]. https://www. gov. cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm.
Xinhua News Agency. the Communist Party of China Central Committee and the State Council issued *the national comprehensive three-dimensional transportation network planning outline* [EB/OL]. (2021-02-24)

[2025-09-13]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm.(in Chinese)

[13] WAN C P, YANG Z L, ZHANG D, et al. Resilience in transportation systems: A systematic review and future directions[J]. Transport Reviews, 2018, 38(4): 479—498.

[14] SERDAR M Z, KOÇ M, AL-GHAMDI S G. Urban transportation networks resilience: Indicators, disturbances, and assessment methods[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 76: 103452.

[15] TWUMASI-BOAKYE R, SOBANJO J. Civil infrastructure resilience: State-of-the-art on transportation network systems[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2019, 15(2): 455—484.

[16] BAGGAG A, ABBAR S, ZANOUDA T, et al. Resilience analytics: Coverage and robustness in multi-modal transportation networks[J]. EPJ Data Science, 2018, 7(1): 14.

[17] ZHANG Y, ZHENG S Y, CHEN Y Y. Identification of key nodes in comprehensive transportation network: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2024, 2678(5): 827—840.

[18] 杨琦, 张雅妮, 周雨晴, 等. 复杂网络理论及其在公共交通韧性领域的应用综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 215—229.
YANG Qi, ZHANG Yani, ZHOU Yuqing, et al. A review of complex network theory and its application in the resilience of public transportation systems[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 215—229.(in Chinese)

[19] NIU S Y, ZHANG J S, ZHANG F, et al. Resilience analysis for comprehensive transportation network[C]// 9th International Conference on Green Intelligent Transportation Systems and Safety. Guilin, 2018: 195—205.

[20] 李成兵, 魏磊, 李奉孝, 等. 基于攻击策略的城市群复合交通网络脆弱性研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(3): 101—109.
LI Chengbing, WEI Lei, LI Fengxiao, et al. Study on vulnerability of city agglomeration compound traffic network based on attack strategy[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(3): 101—109.(in Chinese)

[21] CHEN J Q, LIANG C, LIU J, et al. Resilience assessment of a highway-railway complementary network under rainstorms[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 121: 103841.

[22] 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.

[23] KLINGEN J. Do metro interruptions increase the demand for public rental bicycles Evidence from Paris[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 123: 216—228.

[24] XU Z Z, CHOPRA S S. Interconnectedness enhances network resilience of multimodal public transportation systems for Safe-to-Fail urban mobility[J]. Nature Communications, 2023, 14: 4291.

[25] MA Z A, YANG X, CHEN A, et al. Assessing the resilience of multi-modal transportation networks with the integration of urban air mobility[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2025, 195: 104465.

[26] 刘婧蕾, 彭其渊, 陈锦渠. 基于贝叶斯网络的区域多制式轨道交通网络韧性评估[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(3): 151—160.
LIU Jinglei, PENG Qiyuan, CHEN Jinqu. Resilience assessment of a regional multi-modal rail transit network based on Bayesian network[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(3): 151—160.(in Chinese)

[27] 强添纲, 赵明明, 裴玉龙. 城市多模式交通网络的复杂网络特性与鲁棒性研究[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(1): 65—71.
QIANG Tiangang, ZHAO Mingming, PEI Yulong. An analysis of characteristics of complex network and robustness in Harbin multi-mode traffic network[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2019, 37(1): 65—71.(in Chinese)

[28] WANG N X, WU M, YUEN K F. A novel method to assess urban multimodal transportation system resilience considering passenger demand and infrastructure supply[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 238: 109478.

[29] XU X H, HUANG A L, SHALABY A, et al. Exploring cascading failure processes of interdependent multimodal public transit networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2024, 638: 129576.

[30] ZHAO Y L, LI L K, ZHANG Z S, et al. Performance evaluation for the expansion of multi-level rail transit network in Xi'an metropolitan area: Empirical analysis on accessibility and resilience[J]. Land, 2024, 13(10): 1682.

[31] JIANG S X, GUAN W, HE Z B, et al. Exploring the intermodal relationship between taxi and subway in Beijing, China [J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 2018(1): 3981845.

[32] GONG X J, SONG Z H, XU L, et al. Enhancing resilience assessment and bus bridging service design for large-scale rail transit systems under disruptions [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2024, 40(2): 838－862.

[33] ZHENG S, LIU Y G, LIN Y X, et al. Bridging strategy for the disruption of metro considering the reliability of transportation system: Metro and conventional bus network [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 225: 108585.

[34] 崔欣, 路庆昌, 徐标, 等. 考虑公交接驳的地铁网络韧性评估及故障修复策略[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 93－98.
CUI Xin, LU Qingchang, XU Biao, et al. Resilience evaluation and failure recovery strategy of metro network considering bus connection scenario [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 93－98. (in Chinese)

[35] ZHANG J F, REN G, SONG J H. Resilience-based optimization model for emergency bus bridging and dispatching in response to metro operational disruptions[J]. PLoS One, 2023, 18(3): e0277577.

[36] 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.

[37] LI S P, ZHOU Y M, ZHANG F N. Interdependency in transportation system resilience: Review and discussion[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2025, 140: 104618.

[38] 孙小慧, 刘毅, 米玉梅, 等. 韧性视角下城市地铁与常规公交网络关键站点及线路识别[EB/OL]. [2025-09-13]. https://link.cnki.net/urlid/37.1402.n.20240528.0902.002.
SUN Xiaohui, LIU Yi, MI Yumei, et al. Identification of key stations and routes in urban metro and conventional bus networks from a resilience perspective [EB/OL]. [2025-09-13]. https://link.cnki.net/urlid/37.1402.n.20240528.0902.002. (in Chinese)

[39] FENG X, HE S W, LI G Y, et al. Transfer network of high-speed rail and aviation: Structure and critical components [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2021, 581: 126197.

[40] DU M Q, JIANG X W, CHEN A. Identifying critical links using network capacity-based indicator in multimodal transportation networks [J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2022, 10(1): 1126－1150.

[41] GU Y, FU X, LIU Z Y, et al. Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 133: 101809.

[42] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. Earthquake Spectra 2003, 19(4): 733－752.

[43] ZHENG Y T, XIAO J L, HUA X D, et al. A comparative analysis of the robustness of multimodal comprehensive transportation network considering mode transfer: A case study [J]. Electronic Research Archive, 2023, 31(9): 5362－5395.

[44] 郑乐, 高良鹏, 陈学武, 等. 地铁-公交加权复合网络关键站点识别及鲁棒性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(5): 120－129.
ZHENG Yue, GAO Liangpeng, CHEN Xuewu, et al. Critical stations identification and robustness analysis of weighted metro-bus composite network [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(5): 120－129. (in Chinese)

[45] 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. (in Chinese)

[46] WANG L J, ZHANG S C, SZŰCS G, et al. Identifying the critical nodes in multi-modal transportation network with a traffic demand-based computational method [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 244: 109956.

[47] MA F, LIU F, YUEN K F, et al. Cascading failures and vulnerability evolution in bus-metro complex bilayer networks under rainstorm weather conditions [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(3): 329.

[48] 余荣斌, 蒋沅, 严玉为, 等. 考虑相依边负载的相依网络鲁棒性研究[J]. 电子科技大学学报, 2022, 51(5): 774－785.

YU Rongbin, JIANG Yuan, YAN Yuwei, et al. Research on robustness of interdependent networks considering dependent side load[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2022, 51(5): 774－785. (in Chinese)

[49] IPPOLITO N, CATS O. Multi-modal and multi-layer robustness analysis of the European rail and air networks [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 26950.

[50] 宋英华, 李玉枝, 霍非舟, 等. 城区内涝条件下城市公交-地铁双层交通网络的脆弱性分析[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(2): 114－120.
SONG Yinghua, LI Yuzhi, HUO Feizhou, et al. Vulnerability of two-layer traffic network of bus and subway under waterlogging condition based on complex network theory [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(2): 114－120. (in Chinese)

[51] 王握, 李林, 罗云辉, 等. 城市复合交通网络脆弱性研究[C]// 2018年中国城市交通规划年会. 青岛, 2018: 3189－3197.
WANG W, LI L, LUO Y H, et al. Vulnerability study of urban complex transportation networks[C]//the 2018 China Urban Transportation Planning Annual Conference. Qingdao, 2018: 3189－3197. (in Chinese)

[52] 孙晓璇, 吴晔, 冯鑫, 等. 高铁-普铁的实证双层网络结构与鲁棒性分析[J]. 电子科技大学学报, 2019, 48(2): 315－320.
SUN Xiaoxuan, WU Ye, FENG Xin, et al. Structure characteristics and robustness analysis of multi-layer network of high speed railway and ordinary railway [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2019, 48(2): 315－320. (in Chinese)

[53] 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.
SUN Junyan, NIU Yaru, WU Bingying, et al. Research on complex network characteristics and robustness of Xi'an City public transport system[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2019, 40(2): 148－155. (in Chinese)

[54] CHEN Y S, WANG X Y, SONG X W, et al. Resilience assessment of multimodal urban transport networks [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2022, 31(18): 2250310.

[55] GUO X Q, DU Q, LI Y, et al. Cascading failure and recovery of metro - bus double-layer network considering recovery propagation [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 122: 103861.

[56] 马夏夏, 蔡永明. 基于复杂网络的铁路-航空多层网络的鲁棒性研究[J]. 山东科学, 2017, 30(5): 70－78.
MA Xiaxia, CAI Yongming. Study on the robustness of Chinese railway and airline multilayer networks based on complex network theory[J]. Shandong Science, 2017, 30(5): 70－78. (in Chinese)

[57] 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]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2021, 235(3): 474－490.

[58] 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). Sofia, 2019: 348－353.

[59] WANG Y Q, CAO X B, QIN F Y, et al. Vulnerability analysis of the Chinese coupled aviation and high-speed railway network [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(12): 189－199.

[60] CAI C, FENG X, PEI A H, et al. Mitigating the vulnerability of a high-speed railway - air network by optimizing the location of integrated transportation hubs[J]. IEEE Access, 2022, 10: 123920－123941.

[61] KOPSIDAS A, KEPAPTSOGLOU K. Modelling bus-based substitution capabilities for metro systems using bipartite graphs[J]. Journal of Complex Networks, 2023, 12(1): cnad050.

[62] 刘志勇, 李瑞敏. 北京市公共交通网络系统的鲁棒性研究[J]. 公路工程, 2017, 42(6): 17－23.
LIU Zhiyong, LI Ruimin. The robustness research of Beijing public traffic network system[J]. Highway Engineering, 2017, 42(6): 17－23. (in Chinese)

[63] LIU Z Z, CHEN H, LIU E Z, et al. Evaluating the dynamic resilience of the multi-mode public transit network for sustainable transport[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 348: 131350.

[64] 王永岗, 王龙健, 刘志岗, 等. 多模式复合交通网脆弱性测度[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 195－207.
WANG Yonggang, WANG Longjian, LIU Zhigang, et al. Vulnerability metrics of multimodal composite transportation network[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 195－207. (in Chinese)

[65] 马书红, 武亚俊, 陈西芳. 城市群多模式交通网络结构韧性分析: 以关中平原城市群为例[J]. 清华大学学报

(自然科学版), 2022, 62(7): 1228－1235.
MA Shuhong, WU Yajun, CHEN Xifang. Structural resilience of multimodal transportation networks in urban agglomerations: A case study of the Guanzhong Plain urban agglomeration network[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(7): 1228－1235. (in Chinese)

[66] CHEN C, WANG S L, ZHANG J H, et al. Modeling the vulnerability and resilience of interdependent transportation networks under multiple disruptions[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2023, 29: 04022043.

[67] SUN G X. Robustness analysis of an urban public traffic network based on a multi-subnet composite complex network model[J]. Entropy, 2023, 25(10): 1377.

[68] 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.
MA Shuhong, YANG Lei, CHEN Xifang. Resilience evolution of multi-mode transportation network in urban agglomeration based on risk diffusion[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(6): 42－51. (in Chinese)

[69] LI T, RONG L L. 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.

[70] 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.
MA Fei, WEI Xiaolin, SUN Qipeng, et al. Robustness of multimodal passenger transport network in urban agglomeration considering complementary effect[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(2): 388－398. (in Chinese)

[71] JIA J L, HUANG Y W, ZHANG W T, et al. A route diversity - based approach for estimating vulnerability of stations in a multimodal public transport network[J]. Journal of Advanced Transportation, 2024, 2024(1): 6995651.

[72] 潘恒彦, 张文会, 胡宝雨, 等. 城市公交-地铁加权复合网络构建及鲁棒性分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(11): 2582－2591.
PAN Hengyan, ZHANG Wenhui, HU Baoyu, et al. Construction and robustness analysis of urban weighted subway-bus composite network[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(11): 2582－2591. (in Chinese)

[73] 马壮林, 程会媛, 邵逸恒, 等. 大客流干扰下多层公交-地铁网络的韧性评估[J]. 中国公路学报, 2024, 37(6): 267－278.
MA Zhuanglin, CHENG Huiyuan, SHAO Yiheng, et al. Resilience assessment of multilayer bus-metro network under large passenger flow interference[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(6): 267－278. (in Chinese)

[74] JIANG J C, WU L X, YU J Q, et al. Robustness of bilayer railway-aviation transportation network considering discrete cross-layer traffic flow assignment[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 127: 104071.

[75] HUA W, ONG G P. Network survivability and recoverability in urban rail transit systems under disruption[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2017, 11(10): 641－648.

[76] PEI Y L, XIE F, WANG Z Q, et al. Resilience measurement of bus-subway network based on generalized cost[J]. Mathematics, 2024, 12(14): 2191.

[77] 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.
LU Qingchang, CUI Xin, XU Biao, et al. Vulnerability research of rail transit network under bus connection scenarios[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(8): 141－146. (in Chinese)

[78] REN G, HE Y H, YU Z G, et al. Resilience enhancing strategy and model of compound public transit network based on disruption situation[C]//CICTP 2019. Nanjing, 2019: 3464－3475.

[79] HUI Z, MIN X, OUYANG M. A multi-perspective functionality loss assessment of coupled railway and airline systems under extreme events[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 243: 109831.

[80] MA W X, LIN S C, CI Y S, et al. Resilience evaluation and improvement of post-disaster multimodal transportation networks[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2024, 189: 104243.

[81] 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, 31(8): 1－5.
XIAO Minghui. The vulnerability analysis of urban complementary transit network under spatially localized failures[J]. Information & Communications, 2018, 31(8): 1－5. (in Chinese)

[82] ZHANG H, OUYANG M, SUN W J, et al. An approach for accessibility assessment and vulnerability analysis of national multimodal transport systems[J].

Risk Analysis, 2023, 43(11): 2312－2329.

[83] SUN W J, ZHANG H, OUYANG M. Accessibility and vulnerability analysis of the integrated road, high-speed rail and airline system in China[C]//2022 13th International Conference on Reliability, Maintainability, and Safety (ICRMS). Hong Kong, 2022: 45－49.

[84] LEE S, KIM S, KIM J. Robustness analysis of public transportation systems in Seoul using general multilayer network models[J]. The Journal of Supercomputing, 2024, 80(18): 26589－26613.

[85] 路庆昌, 胡子萱, 刘丽萍, 等. 考虑竞合关系的公共交通网络脆弱性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(9): 3909－3919.
LU Qingchang, HU Zixuan, LIU Liping, et al. Vulnerability of public transportation networks considering competitive and cooperative relationships[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(9): 3909－3919. (in Chinese)

[86] 赵桂红, 郭家羽, 邹灿. 考虑竞争效应的空铁联运网络脆弱性修复策略研究[J]. 北京交通大学学报, 2025, 49(2): 36－47.
ZHAO Guihong, GUO Jiayu, ZOU Can. Research on restoration strategies for the vulnerability of air-rail intermodal transportation networks considering competitive effects[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49(2): 36－47. (in Chinese)

[87] JU Y N, YUAN H H, LI Z P, et al. Multilayer structures and resilience evaluation for multimode regional rail transit system[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2022, 16(7): 843－859.

[88] WANG L J, ZHENG S Y, WANG Y G, et al. Identification of critical nodes in multimodal transportation network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2021, 580: 126170.

[89] 鞠艳妮, 刘旭, 韩珣, 等. 城市群多模式交通系统空间网络韧性评估[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(6): 2341－2350.
JU Yanni, LIU Xu, HAN Xun, et al. Resilience evaluation of spatial network in urban agglomeration multimode transportation system[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(6): 2341－2350. (in Chinese)

[90] LIU B, LIU X Y, YANG Y, et al. Resilience assessment framework toward interdependent bus-rail transit network: Structure, critical components, and coupling mechanism[J]. Communications in Transportation Research, 2023, 3: 100098.

[91] CHEN J Q, YUE M F, DU B, et al. Resilience enhancement of an urban rail transit network by temporarily adjusting regular bus transit operation[C]//2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Bilbao, 2023: 277－282.

[92] LU Q C, XU P C, ZHAO X M, et al. Measuring network interdependency between dependent networks: A supply-demand-based approach[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 225: 108611.

[93] XU P C, LU Q C, XIE C, et al. Modeling the resilience of interdependent networks: The role of function dependency in metro and bus systems[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2024, 179: 103907.

[94] 王永岗, 王龙健, 余丽洁, 等. 多模式交通网络的耦合脆弱性评估方法:以云南省为例[J]. 系统工程, 2025, 43(3): 103－112.
WANG Y G, WANG L J, YU L J, et al. A coupled vulnerability assessment method for multimodal transportation networks: A case study of Yunnan, China[J]. Systems Engineering, 2025, 43(3): 103－112.

[95] 刘志勇, 李文帅, 李思奇, 等. 基于层间关联性的复合公共交通网络布局优化策略[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(3): 83－91.
LIU Zhiyong, LI Wenshuai, LI Siqi, et al. Composite public transport network layout optimization strategy based on interlayer correlation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(3): 83－91. (in Chinese)

[96] 张琳, 陆建, 雷达. 基于复杂网络和空间信息嵌入的常规公交-地铁复合网络脆弱性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 773－780.
ZHANG Lin, LU Jian, LEI Da. Vulnerability analysis of bus-metro composite network based on complex network and spatial information embedding[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(4): 773－780. (in Chinese)

[97] 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.

[98] VON FERBER C, HOLOVATCH T, HOLOVATCH Y, et al. Public transport networks: Empirical analysis and modeling[J]. The European Physical Journal B, 2009, 68(2): 261－275.

[99] 程国柱, 张宇洁, 冯天军. 严寒城市地铁-公交复合网络承载力计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(9): 101－110.

CHENG Guozhu, ZHANG Yujie, FENG Tianjun. Carrying capacity calculation method of subway-bus composite network in severe cold city[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(9): 101－110. (in Chinese)

[100] DE BONA A A, FONSECA K V O, ROSA M O, et al. Analysis of public bus transportation of a Brazilian City based on the theory of complex networks using the P-space[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016(1): 3898762.

[101] ZHANG Y Z, TU L L. Characteristic analysis and important stations identification of Wuhan metro complex network based on two models[C]//2022 14th International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI). Wuhan, 2022: 370－375.

[102] CAO Y, BU X Z, ZHANG J L. Robustness evaluation of bus-subway composite network considering accessibility[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 10770.

[103] 林兆丰, 李树彬, 孔祥科. 地铁建设对公交系统鲁棒性的影响[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2023, 20(1): 66－73.
LIN Zhaofeng, LI Shubin, KONG Xiangke. The influence of subway construction on the robustness of public transportation system[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2023, 20(1): 66－73. (in Chinese)

[104] LIU R R, JIA C X, LAI Y C. Remote control of cascading dynamics on complex multilayer networks[J]. New Journal of Physics, 2019, 21(4): 045002.

[105] 杜脒婕, 郭鹏, 赵静. 基于换乘关系的城市公交-地铁复合网络脆弱性研究[J]. 运筹与管理, 2025, 34(9): 219－225.
DU Mijie, GUO Peng, ZHAO Jing. Study on vulnerability of urban bus-metro composite network based on transfer relationships[J]. Operations Research and Management Science, 2025, 34(9): 219－225. (in Chinese)

[106] APARICIO J T, ARSENIO E, HENRIQUES R. Assessing robustness in multimodal transportation systems: A case study in Lisbon[J]. European Transport Research Review, 2022, 14(1): 28.

[107] CHEN S M, JI X M, SHAO H P, et al. Evaluating the robustness of attributed dynamic bus-metro networks based on community reconstruction[J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2024, 12(1): 1－21.

[108] OUYANG M, TIAN H, WANG Z H, et al. Critical infrastructure vulnerability to spatially localized failures with applications to Chinese railway system[J]. Risk Analysis, 2019, 39(1): 180－194.

[109] 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.

[110] ZHU Y, OZBAY K, XIE K, et al. Using big data to study resilience of taxi and subway trips for hurricanes sandy and irene[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2599(1): 70－80.

[111] ZHU Y, XIE K, OZBAY K, et al. Data-driven spatial modeling for quantifying networkwide resilience in the aftermath of hurricanes irene and sandy[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2604(1): 9－18.

[112] MA F, SHI W J, YUEN K F, et al. Exploring the robustness of public transportation for sustainable cities: A double-layered network perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 265: 121747.

[113] 赵成勇, 马飞, 崔睿颖, 等. 都市圈多模式交通网络建模及集成韧性测度[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2025, 65(10): 1930－1944.
ZHAO C Y, MA F, CUI R Y, et al. Metropolitan area multimodal transportation network modeling and integrated resilience measurement[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2025, 65(10): 1930－1944. (in Chinese)

[114] YANG Z C, LIU X B, WANG J F, et al. Assessment on resilience of urban agglomeration transportation system considering passenger choice and load-capacity factor[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2025, 253: 110527.

[115] BAGGAG A, ABBA S, ZANOUDA T, et al. A multiplex approach to urban mobility[C]// 5th International Workshop on Complex Networks and their Applications (COMPLEX NETWORKS 2016). Milan, 2016: 551－563.

[116] BOCEWICZ G. Robustness of multimodal transportation networks [J]. Eksploatacja I Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, 2014, 16(2): 259－269.

[117] LUO C L, XU L. Railway disruption management: Designing bus bridging services under uncertainty[J]. Computers & Operations Research, 2021, 131: 105284.

[118] DU Q, ZONG X Y, LI Y, et al. Resilience optimization of bus-metro double-layer network against extreme

weather events [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 135: 104378.

[119] LIU Z Z, SUN D, CHEN H, et al. Resilience-based post-disaster repair strategy for integrated public transit networks [J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2024, 12(1): 1－25.

[120] ZHANG T Y, LUAN X J, MENG L Y. Improving mobility resilience in line planning of urban public transport [C]// 11th International Conference on Traffic and Transportation Studies. Wuhan, 2024: 389－398.

[121] LIU Z S, YU B, ZHANG L, et al. Resilience enhancement of multi-modal public transportation system via electric bus network redesign [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2025, 193: 103810.

[122] MO B C, KOUTSOPOULOS H N, SHEN Z M, et al. Robust path recommendations during public transit disruptions under demand uncertainty [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2023, 169: 82－107.

[123] 王淑良, 陈辰, 张建华, 等. 基于复杂网络的关联公共交通系统韧性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2022, 19(4): 47－54.
WANG Shuliang, CHEN Chen, ZHANG Jianhua, et al. Resilience analysis of public interdependent transport system based on complex network [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2022, 19(4): 47－54. (in Chinese)

[124] MO B C, VON FRANQUE M Y, KOUTSOPOULOS H N, et al. Impact of unplanned long-term service disruptions on urban public transit systems [J]. IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems, 2022, 3: 551－569.

[125] FENG H L, LV H B, LV Z H. Resilience towarded Digital Twins to improve the adaptability of transportation systems [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2023, 173: 103686.

[126] SAROJ A J, ROY S, GUIN A, et al. Development of a connected corridor real-time data-driven traffic digital twin simulation model [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2021, 147(12): 04021096.