文章编号：1674-2974（2026）01-0185-11 DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026017

乘客多路径决策下的城市公交复合网络韧性评估

赖元文，张诗棋，葛玉晨，王书易†
（福州大学 土木工程学院，福建 福州 350116）

摘 要：地铁突发中断会导致列车延误和站点乘客拥堵问题，对乘客疏散和应急管理带来挑战.为了探究城市公交网络在突发中断下的性能水平，本文基于韧性理论提出了一种考虑突发中断下乘客出行多路径决策的复合网络韧性评估方法.首先，结合客流和地理信息数据，构建考虑站点“一对多”耦合方式的城市公交复合网络模型，确定不同故障站点下的网络中断区间；其次，考虑乘客在应急状态下的多路径决策进行网络层间流量分配，并计算其出行时间；最后，基于复合网络性能函数确定复合网络韧性的评估框架，并通过实例分析比较不同中断场景下的网络韧性水平.研究表明，不同站点故障下的网络韧性水平存在较大差异，其中网络的中断区间、线路客流量以及地铁耦合公交站点的状况都会影响中断下的网络韧性.本研究提出的城市公交复合网络韧性评估方法可以为制定突发中断下的应急响应方案提供参考依据.

关键词：城市公交系统；突发中断；网络韧性；复合网络；出行决策
中图分类号：U491.2 **文献标志码**：A

Resilience evaluation of urban public transport composite networks under passengers' multi-path decision-making

LAI Yuanwen，ZHANG Shiqi，GE Yuchen，WANG Shuyi†
（College of Civil Engineering，Fuzhou University，Fuzhou 350116，China）

Abstract：Sudden metro service interruptions can result in train delays and passenger congestion at stations. This，in turn，will present significant challenges for passenger evacuation and emergency management. To evaluate the performance of urban public transport networks under such disruptions，this paper proposes a composite network resilience assessment method based on resilience theory，which considers passengers' multi-path decision-making for travel in the event of sudden disruptions. Firstly，the construction of an urban public transport composite network model，which considers the “one-to-many” coupling mode of stations，is based on the combination of passenger flow and geographic information data. This model is used to determine the network interruption intervals under different faulty stations. Secondly，the inter-layer traffic distribution of the network is carried out，taking into account the passengers' multi-path decision-making in emergencies and calculating their travel times. Ultimately，an evaluation framework for the resilience of the composite network is established based on the composite network

* **收稿日期**：2025-01-30
基金项目：福州大学引进人才科研启动基金项目（511335），Project of Scientific Research Start-up Fund for Talents Introduced by Fuzhou University（511335）
作者简介：赖元文（1981—），男，福建上杭人，福州大学教授，博士
† 通信联系人，E-mail：syw@fzu.edu.cn

performance function. Furthermore, the network resilience levels under disparate interruption scenarios are contrasted through case analysis. The findings indicate that there are notable discrepancies in the network resilience levels under varying station failures. Among these discrepancies, the interruption interval of the network, the passenger flow volume of the lines, and the conditions of the subway-coupled bus stations will all influence the network resilience under interruptions. The resilience assessment method for urban bus composite networks proposed in this study can serve as a reference for the development of emergency response plans in the event of sudden disruptions.

Key words: urban public transport interruption; sudden disruption; network resilience; composite networks; travel decisions

城市公共交通的网络化运营为居民出行提供便利,有效缓解了地面交通压力,但也使故障传播更具影响力.地铁系统一旦发生突发运营故障导致线路中断,运营线路需临时调整,乘客滞留与延误问题加剧,对应急管理与客流疏散带来严峻挑战.为此,需利用地铁与常规公交等多种交通资源对乘客进行有效引导和疏散.同时,还应快速评估故障影响程度及乘客疏散需求,提升应急响应效率.因此,如何精确而切实地评估地铁突发中断对城市公交复合网络性能的影响,并据此制定精准有效的疏散响应策略,对于保障城市公交系统稳定运行、提升城市交通应急管理水平具有重要意义.

突发中断事故的影响会在交通网络中扩散,导致系统性能不同程度的下降.目前关于突发事故下的网络韧性研究,大多数考虑对自然灾害或大范围站点的连续失效进行仿真.Fang 等[1]模拟极端降雨导致的不同洪水情景测量道路网络性能变化,通过拥堵水平、道路效率和道路重要性3个指标描述网络交通运行状态.Ermagun 等[2]测量了多个城市地铁网络在连续良性攻击和恶性攻击场景下的性能损失,通过结果分析发现网络性能的下降与网络规模及其物理属性有关.郑乐等[3]将随机攻击、蓄意攻击两种攻击方式结合仿真公共交通实际运行中的突发状况,分析网络关键节点及其鲁棒性.以上研究针对单个站点的相继失效来模拟突发中断事故,但与实际中相互关联站点区间失效场景存在差异,且未考虑交通网络的物理结构特性,难以有效适用于更常见的技术扰动和人为扰动事故[4]场景.

为量化和评估网络系统的韧性,学者们广泛采用多维度指标对网络性能进行衡量.从网络拓扑结构的角度出发,Osei-Asamoah 等[5]采用全局效率和最大连通子图占比等指标,评估交通网络在各种异常事件发生后的路网表现.Yu 等[6]基于L空间法和P空间法建立南京市轨道交通网络结构模型,选取网络密度、网络中心性、网络聚类系数和网络平均距离4个指标,量化网络结构变化对系统性能的影响.González 等[7]运用L空间法构建墨西哥城轨道交通网络的拓扑结构模型,选择介数、集聚系数、网络密度和连接性等指标,分析1969—2018年间墨西哥城轨道交通网络的演化特征.从系统功能角度出发,研究网络单元失效对乘客出行的影响,常用评估指标包括乘客出行时间损失和未满足出行需求的乘客数等.Wang 等[8]通过对比洪水发生前后所有车辆在起讫点间出行时间的变化,分析洪水对整个高速公路网络的影响.此外,部分研究还创新性地采用网络性能下降程度与网络恢复通车时间的比率[9]、扰动后网络可以满足乘客需求量与正常情况下可以满足乘客需求量的比例[10]作为衡量网络韧性的性能指标.

交通系统是一个耦合系统,不仅包括网络基础设施,还需要兼顾网络上的交通流情况.然而在真实地铁网络中,运营设施、设备故障或突发的大客流等事故会导致某些站点或区间中断运行,地铁列车产生的运行延误传播至后续车辆,往往会引起站点客流拥堵和网络客流的重新分配[11].轨道交通、常规公交以及道路网络并非孤立存在,而是相互依存,共同构成城市公共交通系统的复合网络[12].双层复合网络能够更好地拟合乘客出行路线选择和换乘行为,便于考虑地铁突发事件下的乘客出行影响分析和网络韧性研究.刘博[13]考虑运行接驳环境因素以及接驳站点间道路网络的连通性对客流的影响,并基于

网络拓扑结构和运行计划调整客流影响,构建中断应急场景,分析公交应急联动接驳环境. 于丁原等[14]考虑诱导信息下乘客路径选择行为的异质性,建立突发事件下城轨客流的信息诱导优化模型,优化诱导信息发布方案. Wang等[15]通过应急接驳公交快速疏散站点滞留乘客,使用基于列生成的算法优化接驳公交路线设计、开行频率及乘客分配. 以上研究分析了地铁相关部门应急响应下的受阻乘客出行影响,但忽略了突发中断情形下的可用资源和地铁、公交系统间的相互作用.

综上所述,现有研究考虑地铁突发中断下网络韧性时,多聚焦于物理拓扑结构和系统科学层面,采用点或连边直接删除的方式模拟故障,同时较少对城市地铁和公交网络形成的复合网络在突发中断下的站点结构关联性和客流动态特性进行综合考虑. 因此,本文针对站点“一对多”耦合方式,通过构建地铁与常规公交的复合网络模型,基于突发中断事件下的失效影响传播特征,提出一种考虑应急状态下乘客出行选择的网络层间流量分配策略,并根据复合网络韧性的评估框架量化不同中断场景下的网络韧性水平. 本文聚焦地铁突发中断事故,探究城市公交复合网络失效影响差异及运营性能变化,为降低城市公共交通网络化运营风险、实现韧性管理转型提供支持.

1　模型构建

1.1　城市公交复合网络模型

考虑到城市日常通勤的常用交通方式和换乘习惯,本研究选择地铁和常规公交来构建城市公共交通复合网络. 具体来说,本研究不考虑站点间的长距离换乘,基于公共交通系统内乘客可接受的换乘距离及时间,建立地铁与公交站点的“一对多”耦合关系,实现不同网络间的耦合. 由于L空间法能够较为准确地还原地铁线网的真实布局和可以利用站点间的距离作为边的加权值的特点,有助于进一步研究地铁线路之间的联系和特征[16],因此本文选用该方法对地铁和公交线网进行拓扑建模. 为了便于网络建模并研究其主要特征,本文对模型做出以下假设:

1)以实际交通系统中的地铁站点和公交站点作为网络节点,若相邻节点间存在公交线路,则连接节点作为连边.

2)针对双向运行线路及上下行途经站点不一致的情况,统一选取其上行方向线路构建连接关系,建立无向网络. 其中,无向网络中的边代表乘客可双向移动的物理连接,与线路运营方向无关.

基于此,本文结合公共交通系统内乘客的可接受换乘距离及时间,构建地铁和公交站点间的耦合关系,并建立城市公交复合网络模型,具体步骤如下:

Step 1　获取城市地铁和常规公交的站点和线路信息,构建基于L空间法的单层城市地铁网络 G_{metro} 和单层常规公交网络 G_{bus},表示如下:

$$G_{\text{metro}}=\begin{cases}N_{\text{metro}}=\{v_1,v_2,\cdots,v_m\}\\ E_{\text{metro}}=\left\{e_{v_1v_2},e_{v_2v_3},\cdots,e_{v_iv_j}\middle|v_iv_j\in N_{\text{metro}}\right\}\end{cases}\tag{1}$$

$$G_{\text{bus}}=\begin{cases}N_{\text{bus}}=\{v_1',v_2',\cdots,v_n'\}\\ E_{\text{bus}}=\left\{e_{v_1'v_2'},e_{v_2'v_3'},\cdots,e_{v_i'v_j'}\middle|v_i'v_j'\in N_{\text{bus}}\right\}\end{cases}\tag{2}$$

式中:N_{metro}、N_{bus} 分别表示地铁、常规公交网络节点集;v_m、v_n' 分别为地铁和常规公交网络层中的节点,m、n 分别为地铁和常规公交网络中节点数量;E_{metro}、E_{bus} 分别表示地铁、常规公交网络连边集;$e_{v_iv_j}$、$e_{v_i'v_j'}$ 分别为地铁和常规公交网络层网络节点的物理连接关系.

Step 2　根据Haversine公式计算缓冲区半径内地铁网络节点 v_i 与常规公交网络节点 v_j' 之间的距离 d_{ij},并根据距离关系进一步建立地铁站点和公交站点间的耦合映射关系,计算公式如下:

$$\partial=\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)+\cos(\varphi_i)\cdot\cos(\varphi_j)\cdot\sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)\tag{3}$$

$$c=2\cdot\arctan\left(\sqrt{\frac{\partial}{1-\partial}}\right)\tag{4}$$

$$d_{ij}=R_{\text{e}}\cdot c\leqslant R\tag{5}$$

式中:φ_i、φ_j 为两个节点的纬度;$\Delta\varphi$ 为两个节点纬度之差的绝对值;$\Delta\lambda$ 为两个节点经度之差的绝对值;d_{ij} 为两点之间的距离;R_{e} 为地球的平均半径;R 为地铁和常规公交网络的耦合半径.

Step 3　调用API接口,进一步获取Step 2中每个与地铁站点 v_i 具有耦合关系的公交站点 v_j' 的步行出行时间 T_{walk},筛选出步行时间 $T_{\text{walk}}\leqslant T$ 在可接受步行换乘时间内的耦合站点并更新耦合映射关系,得到具有耦合关系的地铁及其公交节点集合.

Step 4　基于Step 3的子网络层间站点匹配结果,对具有耦合关系的地铁和公交站点建立新连边 $E_{\text{m_b}}$,

地铁网络层和常规公交网络层间的连接可表示为：

$$E_{\mathrm{m_b}}=\{e_{v_i v_j'}|v_i\in N_{\mathrm{metro}},v_j'\in N_{\mathrm{bus}}\} \tag{6}$$

Step 5 定义表示地铁和常规公交网络层间关系的邻接矩阵$\boldsymbol{A}^{\mathrm{m_b}}$，构成新的双层公交网络$G_{\mathrm{m_b}}=[N_{\mathrm{m_b}},E_{\mathrm{m_b}},\boldsymbol{A}]$，其中$N_{\mathrm{m_b}}$为复合网络节点集，$E_{\mathrm{m_b}}$为复合网络连边集.

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{metro}}=\left|a_{ij}^{\mathrm{m}}\right|=\begin{bmatrix}a_{1,1}&a_{1,2}&\cdots&a_{1,m}\\a_{2,1}&a_{2,2}&\cdots&a_{2,m}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\a_{m,1}&a_{m,2}&\cdots&a_{m,m}\end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{bus}}=\left|a_{i'j'}^{\mathrm{b}}\right|=\begin{bmatrix}a_{m,m+1}&a_{m,m+2}&\cdots&a_{m,m+n}\\a_{m+1,m+2}&a_{m+1,m+2}&\cdots&a_{m+1,m+n}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\a_{m+n,m+1}&a_{m+n,m+2}&\cdots&a_{m+n,m+n}\end{bmatrix} \tag{8}$$

$$G_{\mathrm{m_b}}=\begin{cases}N_{\mathrm{m_b}}=\langle N_{\mathrm{metro}},N_{\mathrm{bus}}\rangle\\E_{\mathrm{m_b}}=\langle E_{\mathrm{metro}},E_{\mathrm{bus}},E_{\mathrm{m_b}}\rangle\\\boldsymbol{A}=\begin{vmatrix}\boldsymbol{A}^{\mathrm{metro}}&(\boldsymbol{A}^{\mathrm{m_b}})^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{A}^{\mathrm{m_b}}&\boldsymbol{A}^{\mathrm{bus}}\end{vmatrix}\end{cases} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{m_b}}=\left|a_{ij}^{\mathrm{m_b}}\right|,v_i\in N_{\mathrm{metro}},v_j'\in N_{\mathrm{bus}} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{A}^{\mathrm{metro}}$、$\boldsymbol{A}^{\mathrm{bus}}$、$\boldsymbol{A}^{\mathrm{m_b}}$分别为地铁、公交、城市公交复合网络层间关系的邻接矩阵；a_{ij}^{m}、$a_{i'j'}^{\mathrm{b}}$分别表示地铁和常规公交网络中节点的连接关系，v_i或v_i'与其相邻节点v_j或v_j'间存在运行线路，则$a_{ij}^{\mathrm{m}}=1$，$a_{i'j'}^{\mathrm{b}}=1$，否则为0；对于复合网络，若v_j与v_j'是具有耦合关系的站点，则$a_{ij}^{\mathrm{m_b}}=1$，否则为0.

1.2 地铁突发中断下的网络失效传播分析

突发中断事故下，列车不能按照原定运行图按计划到达和离开车站，会造成中断区间两端的车站客流积压，并影响网络中其他相关车站乘客的正常出行，同时会进一步给区域内的城市公共交通系统带来极大压力.

为了刻画突发中断下乘客在地铁-常规公交网络系统的出行选择，采用地铁站点乘客AFC刷卡数据对高峰时段地铁网络客流数据进行清洗和筛选，得到乘客出行OD矩阵$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{m}}$，并根据每个站点之间的乘客出行路径是否经过中断区间G_{m}^{*}区分受影响客流Q^{*}和不受影响客流Q_{noflu}，并进一步将Q^{*}分为出行全程受影响客流Q_1、进出站受影响客流Q_2和出行中受影响客流Q_3. 除此之外，考虑乘客在进入地铁系统时是否知晓地铁的中断区间信息所进行的初始出行决策存在明显差异，刻画复合公交网络中乘客出行决策过程，如图1所示.

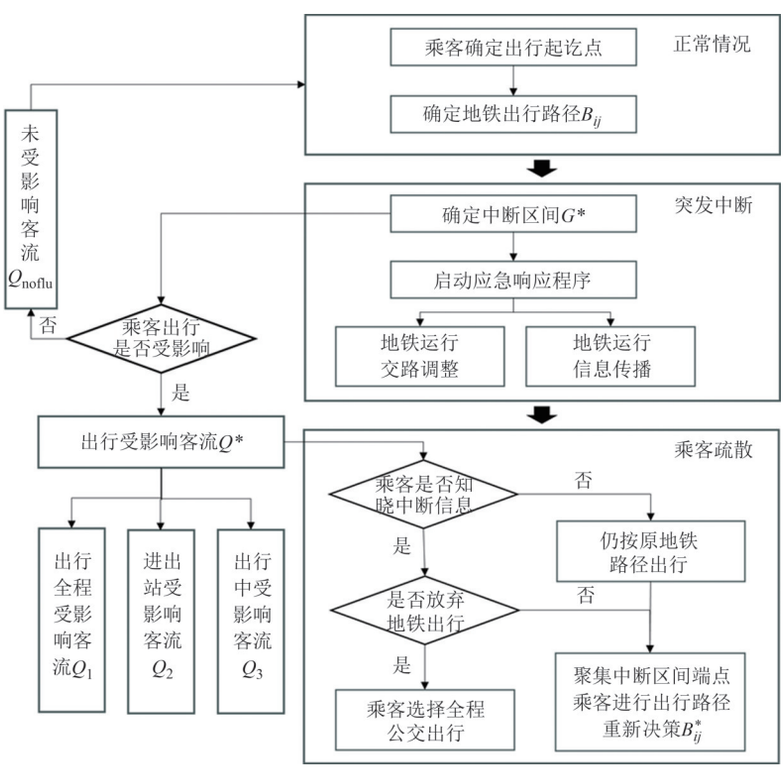


图1 复合网络延误影响传播过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the propagation process of delay impacts in composite networks

图 1 乘客疏散过程中,根据乘客是否知晓中断信息分为两阶段:第一阶段,乘客由于信息缺失,仍按照原地铁路径出行,出行中受到中断区间影响后再进行重新决策;第二阶段,乘客已知晓交通网络中断状况,在开始出行前先进行路径重新决策,可选择仍进入地铁系统出行或者全程公交出行. 结合已有研究[14],本文取 t_{response}=10 min,表示第一阶段的持续时间.

根据 K 短路径搜索算法求解地铁-常规公交网络中受影响乘客的可行路径集 B_{ij}^{*},得到中断区间受阻客流在中断复合网络中的替代可行路径. 其中不同乘客在复合交通网络中的交通方式选择如图 2 所示.

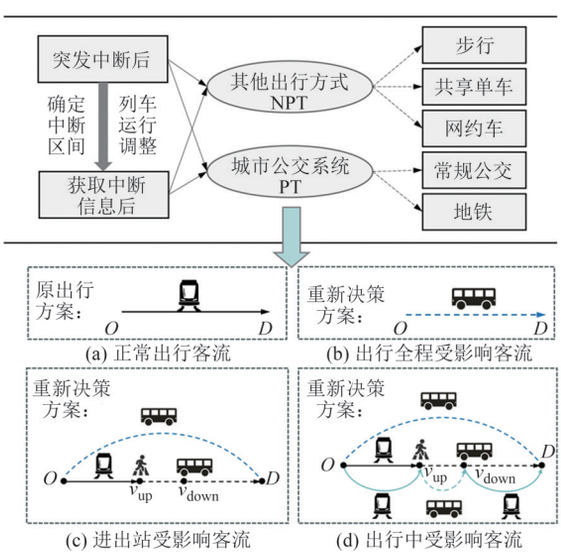


图 2　受影响客流的多路径决策方案示意图

Fig.2　Schematic diagram of multi-path decision-making schemes for the affected passenger flow

结合交通系统中乘客在突发事故中的出行方式选择特征,构建 N-logit 模型,确定复合网络中受影响客流路径选择概率[17]. 故在随机项独立且服从 Gumbel 分布的情况下,节点 v_i 与 v_j 的出行受影响乘客选择 f_1 出行模式的概率模型表示如下:

$$\hat{T}_{ij}^{k,f_1}=T_{ij}^{k,f_1}+\varepsilon_{ij}^{k,f_1} \tag{11}$$

$$P_{ij}^{k}(f_1|\text{PT})=\sigma_{\text{PT}}\cdot\frac{\exp\left(-\theta T_{ij}^{k,f_1}\right)}{\sum_{f\in B_{ij}^{*}}\exp\left(-\theta T_{ij}^{k,f}\right)},f_1\in B_{ij}^{*} \tag{12}$$

$$\sum_{f\in B_{ij}^{*}}P_{ij}^{k}(f|\text{PT})+P_{ij}^{k}(\text{NPT})=1 \tag{13}$$

式中:$\hat{T}_{ij}^{k,f_1}$ 表示出行模式 f_1 的效用函数;T_{ij}^{k,f_1} 为出行时间阻抗;ε_{ij}^{k,f_1} 为随机误差项;$P_{ij}^{k}(f_1|\text{PT})$ 表示第 k 种客流在节点 v_i 与 v_j 间选择城市公交系统 PT 下的 f_1 出行模式路径的概率;σ_{PT} 为乘客选择城市公交系统 PT 的概率,$0\leqslant\sigma_{\text{PT}}\leqslant 1$;$P_{ij}^{k}(\text{NPT})$ 表示第 k 种客流在节点 v_i 与 v_j 间选择公共交通以外其他出行方式 NPT 的概率;θ 为模型参数.

不同类型受影响客流从 v_i 至 v_j 站点间多种出行方式的出行时间成本计算公式如下:

1)对于不受中断影响的正常出行客流 $Q_{\text{noflu}}=Q^{m}-Q^{*}$ 时,其出行时间计算公式为:

$$T_{ij}^{0}=t_{i,j}^{\text{metro}},q_{ij}\in Q_{\text{noflu}} \tag{14}$$

2)对于 3 类受影响客流,其出行时间计算公式为:

$$T_{ij}^{k=1}=t_{i,j}^{\text{bus}},q_{ij}\in Q_1 \tag{15}$$

$$T_{ij}^{k=2}=\begin{cases}t_{i,\text{up}}^{\text{bus}}+W_{\text{transfer}}^{\text{up}}+t_{\text{down},j}^{\text{metro}}\\ t_{i,j}^{\text{bus}}\end{cases},q_{ij}\in Q_2 \tag{16}$$

$$T_{ij}^{k=3}=\begin{cases}t_{i,j}^{\text{bus}}\\ t_{i,\text{up}}^{\text{metro}}+W_{\text{transfer}}^{\text{up}}+t_{\text{up},j}^{\text{bus}}\\ t_{i,\text{up}}^{\text{metro}}+W_{\text{transfer}}^{\text{up}}+t_{\text{up,down}}^{\text{bus}}+W_{\text{transfer}}^{\text{down}}+t_{\text{down},j}^{\text{metro}}\end{cases}$$

且 $q_{ij}\in Q_3$ (17)

式中:T_{ij}^{k} 表示第 k(k=1,2,3)类受影响客流在复合网络中的出行时间成本;T_{ij}^{0} 表示未受影响客流的出行时间成本;$W_{\text{transfer}}^{\text{up/down}}$ 表示在地铁站点 v_{up} 或 v_{down} 至对应公交站点的接驳换乘时间;$t_{i,j}^{\text{metro}}$、$t_{i,j}^{\text{bus}}$ 分别表示地铁、公交车在站点 v_i 到 v_j 间的运行时间,为候车时间 $t_{i,j}^{\text{wait},L}$ 和行驶时间 $t_{i,j}^{\text{run}}$ 之和.

正常状态下,乘客到达车站的概率服从泊松分布[18-19],则候车时间 $t_{i,j}^{\text{wait},L}$ 为:

$$t_{i,j}^{\text{wait},L}=0.5T_L \tag{18}$$

式中:T_L 为线路 L 的车辆发车间隔,根据相关线路运营数据和站点间可行路径 B_{ij}^{*} 获取.

在实际出行时间计算中,对于选择换乘方案的乘客,需综合考虑其到站时间、公交发车间隔和车辆剩余容量. 根据输入的地铁客流量数据和构建的出行方式选择模型,确定乘客的最终出行路径 B_{ij}' 和换乘公交线路 L,计算每个出行者到达换乘站点 v_{up} 或 v_{down} 耦合公交站点的到达时刻 T_{arrive}. 则站点 v_i 处,换乘线路 L 的乘客额外等待时间 $W_{v_i',L}$ 及总等待时间 W_{total} 的计算公式如下:

$$Q_{k,L}=\max\left(Q_{k-1,L}+N_{\text{a}}(k)-C_L',0\right) \tag{19}$$

$$W_{v_i',L}=T_L\sum_{k=0}^{K}Q_{k,L} \tag{20}$$

$$W_{\text{total}} = \sum_{v_i' \in N_b} \sum_{L \in L_{\text{bus}}} W_{v_i', L} \tag{21}$$

式中:$Q_{k,L}$为第k个发车间隔内,线路L的排队候车人数;K为中断持续时长$t_r - t_0$内线路L的发车班次数,$K = (t_r - t_0)/T_L$;$N_a(k)$表示分时段统计的第k个发车间隔t_{inter}^L内到达的乘客数.

2 城市公交复合网络韧性评估框架

2.1 地铁突发中断场景仿真模拟

当突发事件的性质不同时,对城市轨道交通运行造成的影响有所不同,由于城市轨道交通网络的复杂性,不同类型突发事件所造成的扰动具有极大的差异性,例如自然灾害、恐怖袭击等重大突发事件,会严重威胁交通系统乘客生命安全[20].

为深入研究突发中断事故下的地铁-常规公交网络中受阻客流的出行影响及网络性能的变化,本文仅考虑由技术故障等一般性地铁突发中断事件引起的影响,考虑中断时间超过 30 min[21]且客流大量聚集无法及时疏散的情况,并假设城市公交系统内的乘客响应是考虑了出行成本的相对理性选择.

本文考虑地铁系统中站间折返线布设和运行交路方案调整对网络结构的影响,旨在确定不同突发中断情景下的故障站点和网络失效区间. 如图 3 所示,在单一站点突发中断情景下,假设网络中的故障站点为 B,则需要沿其所在线路的上下行方向,搜索距离最近的两个折返线和其车站 A、D. 运营调整后,在折返站和首末站之间重新安排运行交路,以保障该区间线路的正常运营,并将两折返站之间的路段定义为中断区间G_m^*.

其中,受扰动地铁站点$v_i^* \in N_{\text{metro}}$,最近的两个折返车站$v_{\text{up}}$、$v_{\text{down}}$,中断站点合集$N^* = \{v_{\text{up}}, \cdots, v_{\text{down}}\}$,中断连边集合$E^* = \{e_{v_{\text{up}}, v_{\text{up}+1}}, \cdots, e_{v_{\text{down}-1}, v_{\text{down}}}\}$,$N^* \subseteq N_{\text{metro}}$,$E^* \subseteq E_{\text{metro}}$.

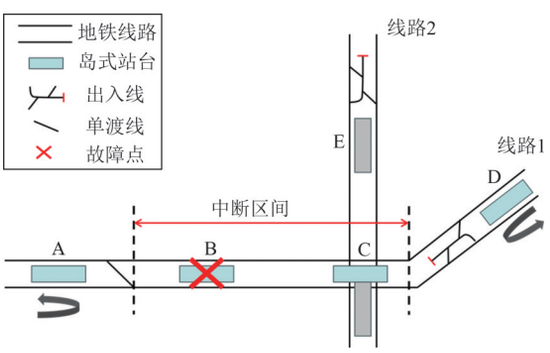


图 3 地铁单一站点故障下的影响区间示意图

Fig.3 Schematic diagram of the impact area under a single subway station failure

2.2 基于网络性能函数的韧性评估框架

本研究综合考虑城市公交复合网络在实际运行效率和突发中断下的响应情况,在上述交通系统出行客流影响分析的基础上,构建了城市公交复合网络的韧性评估框架,如图 4 所示.

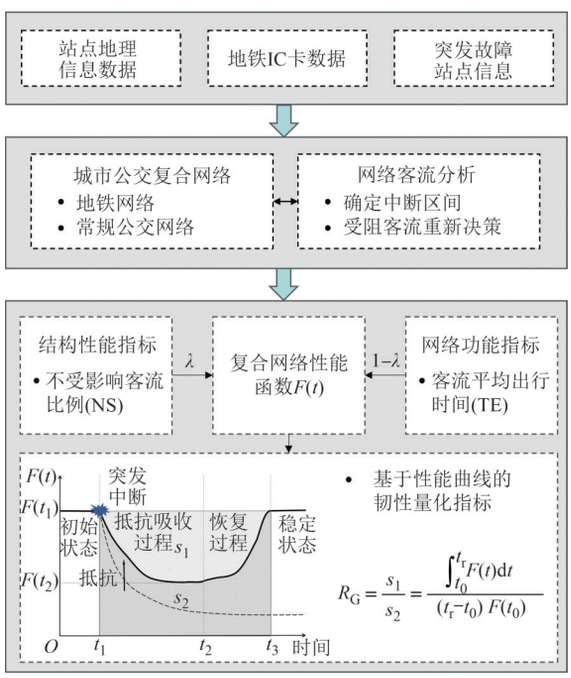


图 4 城市公交复合网络韧性评估框架

Fig.4 The framework of evaluating the resilience of urban public transport composite networks

在借鉴已有研究(如网络最大连通度、全局效率等拓扑指标变化趋势分析事故影响)的基础上,考虑站点客流量及乘客路径选择的差异化,改进网络性能指标,采用网络结构和运营效率的综合指标进行对比分析. 进一步地,基于韧性理论和网络性能曲线[22-23],构建能反映突发中断过程中性能变化的韧性指标,用以量化复合网络性能的下降程度. 其中,网络性能函数和韧性指标的计算公式如下.

2.2.1 网络性能函数

$$\text{NS} = \frac{Q_{\text{noflu}}}{Q_m},\ Q_{\text{noflu}} = Q_m - Q_1 - Q_2 - Q_3 \tag{22}$$

$$\text{TE} = \frac{\sum_{v_i, v_j \in N_m} \left(\sum_{k=1}^{3} \sum_{f \in B_{ij}^*} \frac{P_{ij}^{k,f} Q_{ij}^*}{T_{ij}^k + W_{\text{total}}} + \frac{Q_{ij}^m - Q_{ij}^*}{T_{ij}^0} \right)}{\sum_{v_i, v_j \in N_m} \frac{Q_{ij}^m}{T_{ij}^0}} \tag{23}$$

$$F(t) = \lambda \text{NS} + (1 - \lambda)\text{TE} \tag{24}$$

式中:NS为结构性能指标;TE为运营效率指标;λ为权重系数.

2.2.2　韧性指标

$$R_{\mathrm{G}}=\frac{\int_{t_0}^{t_{\mathrm{r}}}F(t)\,\mathrm{d}t}{(t_{\mathrm{r}}-t_0)F(t_0)} \tag{25}$$

式中:$F(t_0)$表示未受中断影响t_0时的网络性能;$F(t)$表示中断发生后的t时刻的网络性能;R_{G}表示复合网络的韧性水平.

3　实例分析

3.1　城市公交复合网络基础数据

本文选取福州市地铁和常规公交网络进行实例研究,采用的数据包括站点地理信息数据、地铁客流IC卡数据以及城市公交系统的运营信息.通过获取的数据构建基于L空间法的单层子网络模型,并利用python和ArcGIS等软件建立网络层间站点"一对多"的耦合映射关系,经过处理获得78个地铁站点、2 062个公交站点的地铁-常规公交复合网络模型.实际常规公交网络中,同一条线路的上行和下行方向经过的公交站点可能存在个别差异,为简化模型,本文将地铁和公交站点的上下行方向线路视为完全相同线路,建立无向网络结构.图5展示了所构建的城市公交复合网络模型,网络相关特征参数及拓扑指标见表1.

考虑到该城市地铁网络的物理拓扑结构和线路设置情况,分别设置了换乘站点、一般站点和首末站点故障场景等4个中断场景,研究该复合网络的韧性.根据城市地铁网络建设和日常运营状况,设置南门兜站、霞镜站、三叉街站和苏洋站的一般故障场景,并搜寻其上下行方向最近折返站,从而确定其线路的运行调整方式和中断区间,如图6所示.

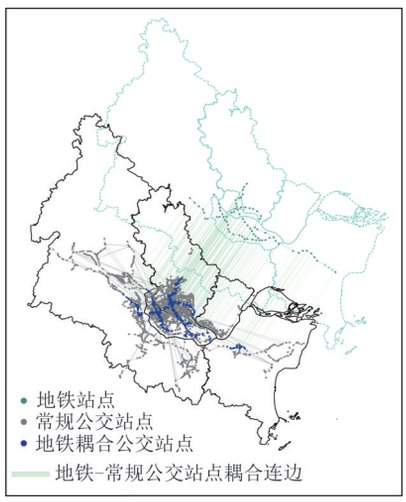


图5　地铁-常规公交复合网络模型

Fig.5　Model of subway-conventional bus composite network

表1　复合网络特征参数及拓扑指标

Tab.1　Characteristic parameters and topological metrics of composite networks

指标	数值	指标	数值
节点总数N	2 140	网络平均度D	3.89
边总数E	4 170	平均聚类系数C	0.22
地铁线路数量L_{m}	4	耦合半径R/m	750
公交线路数量L_{b}	586	耦合步行时间T/min	10

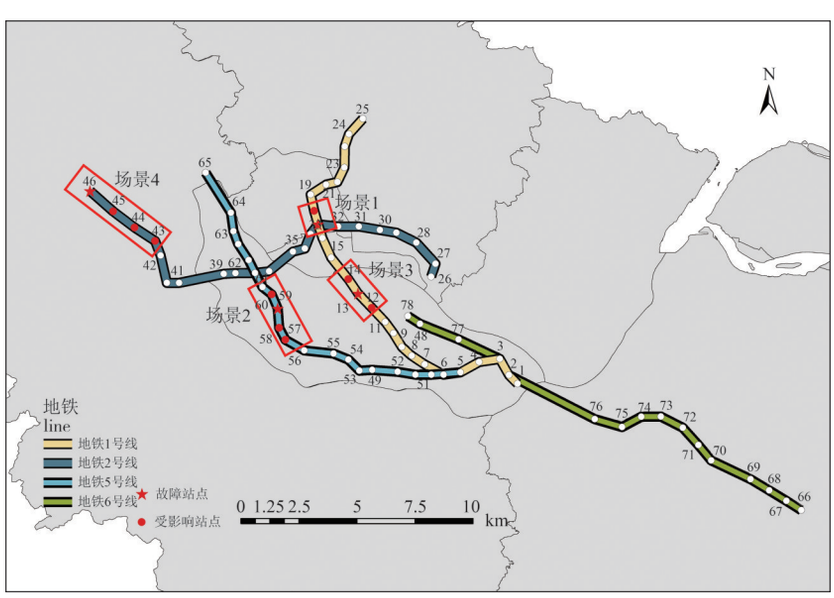


图6　不同故障站点和中断区间示意图

Fig.6　Schematic diagrams of different faulty stations and interrupted sections

3.2 韧性评估结果分析

基于空间地理信息和客流数据构建的城市公交复合网络模型中,分别采用空间距离和步行时间建立站点耦合关系,得到的各地铁站耦合公交站点数量如图7所示.

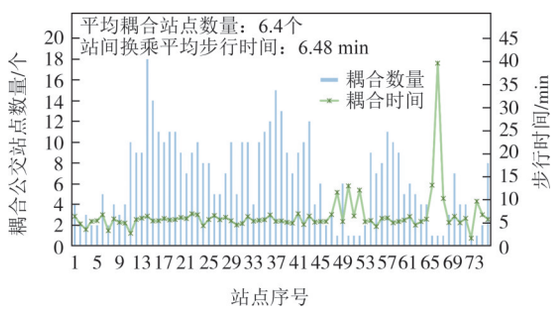
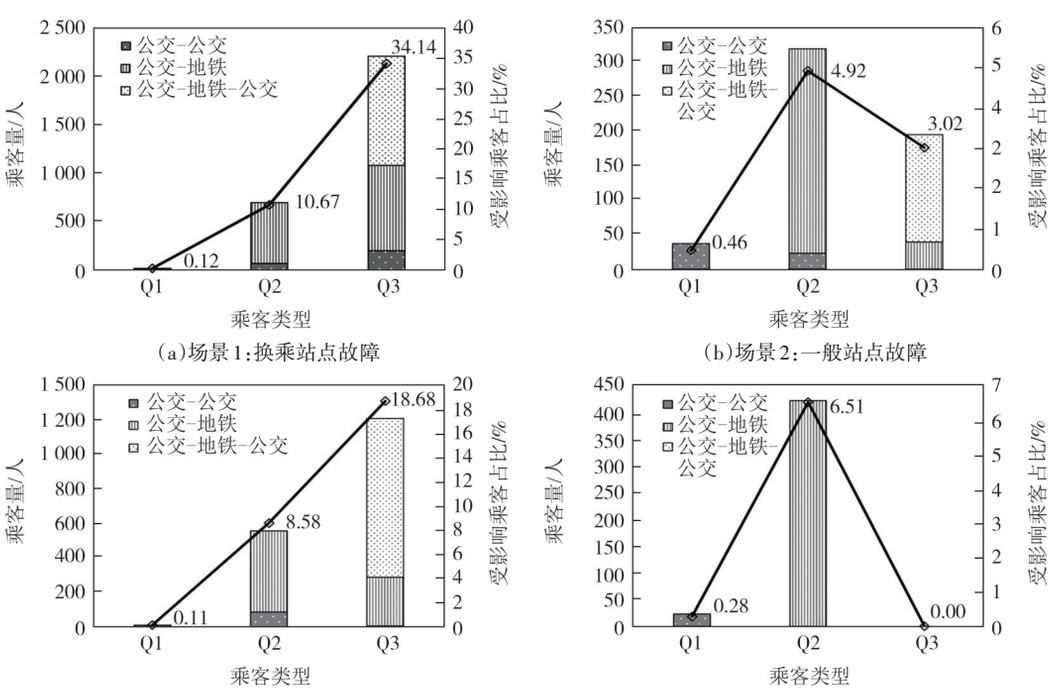


图7 各地铁站点的耦合公交站点数量及步行时间

Fig.7 The number of coupled bus stops and walking time for each subway station

图7显示,地铁站点的平均耦合公交站点数量为6.4个,只有较少部分站点存在单个耦合公交站点.站间换乘的平均步行时间为6.48 min,绝大多数地铁和公交站点间换乘的步行时间在10 min内.其中66号站点的换乘时间显著高于其他站点,原因是该站点为地铁终点站且处于在建阶段,周围仅存在唯一的经市区线路耦合公交站点,导致其步行时间较长.

结合网络配流理论,搜索受阻乘客在复合网络实际结构下组合出行方式的可行路径并进行重新决策,求解复合网络受阻客流分配问题,结果如图8所示.图8展示了4种中断场景下,不同受影响类型(出行全程受影响、进出站受影响和出行中受影响)的客流占比及乘客换乘方式决策结果.由图8(a)可知,在换乘站点位于中断区间的场景下,受影响乘客占比达44.93%,其中出行中受影响乘客占多数,且乘客主要选择地铁与公交换乘的方式替代原出行方案.图8(b)、8(c)展示了一般站点故障的两个中断场景,场景3的中断区间 G_m^* 所包含的站点数量比场景2少,但各类受阻乘客占比更大,说明其网络受影响程度更大,故障站点位置和线路客流量对网络性能产生较大影响.



(a)场景1:换乘站点故障 (b)场景2:一般站点故障

(c)场景3:一般站点故障 (d)场景4:首末站点故障

注:Q1、Q2、Q3分别对应图1中出行全程受影响客流(*Q*1)、进出站受影响客流(*Q*2)、出行中受影响客流(*Q*3)的乘客群体.

图8 不同中断场景的受阻客流出行决策

Fig.8 Travel decision-making of blocked passenger flow in different interruption scenarios

为进一步探究突发中断对复合网络韧性的影响,本文采用上述模型对换乘站、一般站点和首末站点故障下的4种中断场景进行网络韧性评估,最终结果如表2所示.

由表2可知,σ_{PT}=0.2,θ=1,λ=0.5时,各中断场景下的城市公交复合网络性能均有不同程度的下降,4种场景的韧性值大小关系如下:R_{Gm_b}(场景4)>R_{Gm_b}(场景2)>R_{Gm_b}(场景3)>R_{Gm_b}(场景1).场景1的结构

表 2　城市公交复合网络韧性评估结果

Tab.2　The evaluation results of the resilience of urban public transport composite networks

场景	故障站点	中断区间	NS	地铁-常规公交复合网络		单层地铁网络	
				TE	R_{Gm_b}	TE	R_{Gm}
场景 1	南门兜	南门兜、东街口	0.550 6	0.530 6	0.769 6	0.327 9	0.718 9
场景 2	霞镜	浦上大道、霞镜、东岭、台屿	0.916 1	0.671 6	0.896 2	0.600 2	0.878 3
场景 3	三叉街	上藤、三叉街、白湖亭	0.726 3	0.495 1	0.804 2	0.396 1	0.779 5
场景 4	苏洋	苏洋、沙堤、上街、金屿	0.932 1	0.725 3	0.913 9	0.646 2	0.894 1

性能值最低,即该场景下受影响乘客占比最高,由于该区间受阻乘客流量较大且需在短时间内完成疏散、换乘出行路径,持续性影响使复合网络韧性下降至相对较低的程度.

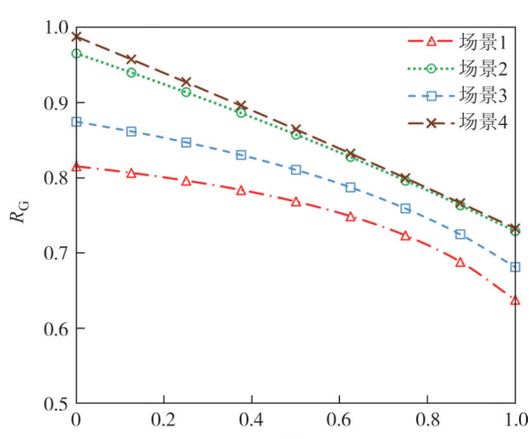
在场景 2 与场景 3 这两个具有流量差异的一般站点故障情景中,各类受阻乘客在可行路径集中进行出行决策. 场景 2 中,乘客选择地铁-公交换乘的比例更高,在中断区间更长的情况下其平均出行时间低于场景 3,表明不同中断区间的常规公交网络与地铁系统的耦合程度及乘客疏散能力存在差异. 场景 4 的韧性水平在 4 种场景中最高,受突发中断的影响最小. 对比单层地铁网络和地铁-常规公交复合网络的韧性指标和韧性评估结果可知:在同一中断场景下,两个网络的 NS 相同,韧性结果主要受 TE 影响.

然而,单层地铁网络的 TE 始终低于复合网络,这表明在中断事件发生时,G_m 网络中乘客平均出行效率的下降程度更为显著. 实验结果表明,不同站点故障时,中断区间长度与受影响的客流规模存在明显差异. 具体而言,故障发生后网络的韧性值越低,表明该站点在整个交通网络中的脆弱性越高,应将其列为重点关注对象,以提升整个交通网络应对突发中断事件的能力.

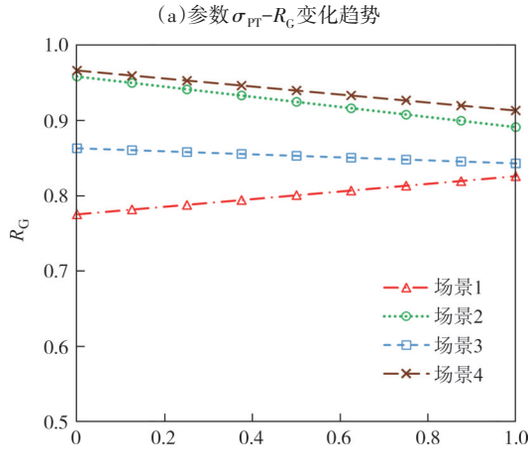
3.3　模型参数分析

基于城市公交复合网络韧性评估模型,本文探究了韧性指标在不同参数及其取值下的变化规律,并分析了复合网络中乘客的出行决策行为特性. 为清晰反映韧性特征,本文结合实际数据和数值模拟实验,选取表 2 中的数据作为模型验证对照值. 其中,不同中断场景下的 NS 值是确定的,与故障站点、中断区间和线路客流量相关;TE 值除了受客流量影响,还与各地铁站点耦合公交的换乘时间、线路运行效率及乘客多路径选择相关.

图 9(a)为参数 σ_{PT} 影响下的 R_G 变化曲线. 整体上满足 $R_{G-case4}>R_{G-case2}>R_{G-case3}>R_{G-case1}$,呈现参数 σ_{PT} 越大,R_G 值越小,韧性水平越低的趋势. 特别地,参数 σ_{PT} 反映了模型中选择城市公交系统以外其他出行方式的乘客比例,当 $\sigma_{PT}>0.6$ 时,复合网络层间站点耦合性较差,各中断场景韧性值最大降幅达 25.8%. 图 9(b)为参数 λ 影响下的 R_G 变化曲线. λ 越大,表示度量指标中结构性能指标的占比越高. 随着 λ 增大,受影响更小的 $R_{G-case2}$、$R_{G-case4}$ 呈下降趋势,而 $R_{G-case1}$ 表现出增加趋势,表明中断场景 1 中 NS 指标性能更好,即乘客平均出行时间对网络韧性水平的影响大于受影响乘客量. 此外,在不同参数影响下,场景 1 的韧性水平始终最低,受突发中断影响最大.



(a)参数 σ_{PT}-R_G 变化趋势



(b)参数 λ-R_G 变化趋势图

图 9　不同参数影响下的 R_G 变化趋势图

Fig.9　The trend of R_G variations under the influence of different parameters

为了进一步分析该城市公交复合网络韧性,本研究分析了场景1参数变化下的韧性变化趋势,如图10所示.从图10中可以得出,随着λ增大(即更注重网络结构功能),σ_{PT}表示的网络层间耦合强度下降,放弃公共交通出行乘客逐渐增加时,网络韧性水平对运营效率指标的变化更为敏感.

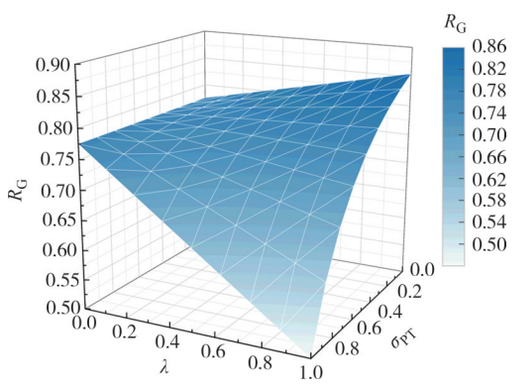


图10 场景1中多参数影响下的R_G变化趋势

Fig.10 The R_G variation trend of case 1 under the influence of multiple parameters

4 结论

本文通过构建考虑乘客换乘条件的城市公交复合网络模型,模拟不同中断场景下的受阻乘客出行决策,并结合韧性理论对地铁和常规公交的城市公交复合网络韧性进行评估,主要结论如下:

1)基于复杂网络理论,考虑站点"一对多"耦合方式,构建了城市公交复合网络模型.分析不同中断场景下,复合网络地铁和公交耦合站点关系和各类受影响乘客比例,发现耦合站点数量分布和不同中断场景下的受影响乘客数量及比例存在较大差异,揭示耦合站点分布及受影响客流出行选择的差异性.

2)提出一种考虑突发中断下乘客出行决策的网络层间流量分配策略,分析不同中断情况下各类受影响乘客的出行决策并计算其网络性能.韧性评估结果显示各中断场景均存在不同程度的韧性下降,表明网络故障影响位置区间及其客流量,乘客在可行路径中重新决策的出行时间对于整个复合网络韧性具有显著影响.

3)从网络结构性能和运营效率方面构建基于网络性能函数的复合网络韧性评估框架,更全面地反映复合网络在突发中断事故下的作用效果.通过关键参数下的变化趋势分析,确定韧性指标对实验结果的影响程度,验证所提模型的评估效果.

随着城市公共交通系统网络化运营,地铁突发中断事故下的网络影响评估对开展应急响应工作的作用更加凸显.本研究考虑网络突发中断的传播特征,分析应急响应下乘客的多路径出行决策,对不同中断场景进行流量分配并计算网络性能指标,通过提出的复合网络韧性评估框架评估网络韧性水平.未来研究可进一步考虑利用常规或接驳公交资源提高系统乘客出行效率,提升中断期间韧性水平.同时,还可以综合考虑具体站点周边的换乘环境要素,以此确定站点中乘客放弃公交系统的比例,精准识别网络里韧性较差的站点,为增强网络整体韧性给予有力的支撑依据.

参考文献

[1] FANG X Y, LU L J, LI Y, et al. A driver-pressure-state-impact-response study for urban transport resilience under extreme rainfall-flood conditions [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 121: 103819.

[2] ERMAGUN A, TAJIK N, JANATABADI F, et al. Uncertainty in vulnerability of metro transit networks: a global perspective [J]. Journal of Transport Geography, 2023, 113: 103710.

[3] 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 Y, GAO L P, CHEN X W, 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)

[4] 夏泽郁, 汤育春, 李启明. 基于韧性理论的中国城市轨道交通事故统计分析[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(3): 148-156.
XIA Z Y, TANG Y C, LI Q M. Statistical analysis of urban rail transit accidents in China based on resilience theory [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(3): 148-156. (in Chinese)

[5] OSEI-ASAMOAH A, LOWNES N E. Complex network method of evaluating resilience in surface transportation networks [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2467(1): 120-128.

[6] YU W, CHEN J, YAN X C. Space-time evolution analysis of the Nanjing metro network based on a complex network [J]. Sustainability, 2019, 11(2): 523.

[7] GONZÁLEZ S H, DE LA MOTA I F. Applying complex network theory to the analysis of Mexico city metro network (1969-2018) [J]. Case Studies on Transport Policy, 2021, 9(3): 1344-1357.

[8] WANG W P, YANG S N, GAO J X, et al. An integrated approach for assessing the impact of large-scale future floods on a highway

transport system[J]. Risk Analysis,2020,40(9):1780-1794.

[9] LU Q C. Modeling network resilience of rail transit under operational incidents[J]. Transportation Research Part A:Policy and Practice,2018,117:227-237.

[10] JIN J G,TANG L C,SUN L J,et al. Enhancing metro network resilience *via* localized integration with bus services [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,2014,63:17-30.

[11] 洪玲,高佳,徐瑞华. 城市轨道交通网络突发事件影响客流量的计算[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(10):1485-1489.
HONG L, GAO J, XU R H. Calculation method of emergency passenger flow in urban rail network [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(10): 1485-1489. (in Chinese)

[12] ZHANG L, LU J, FU B B, et al. A quantitatively controllable mesoscopic reliability model of an interdependent public transit network considering congestion, time-delay interaction and self-organization effects [J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 96(2): 933-958.

[13] 刘博. 城市轨道列车运行中断下公交应急联动线网方案研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.
LIU B. Research on bus bridging network plan under urban rail transit disruption[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2017. (in Chinese)

[14] 于丁原, 姚恩建, 刘莎莎, 等. 运营突发事件下城市轨道交通诱导信息发布策略研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2023,23(5): 227-237.
YU D Y,YAO E J,LIU S S,et al. Guidance information release strategy during operation emergencies in urban rail transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(5): 227-237.(in Chinese)

[15] WANG Y,ZHOU Y,YANG H,et al. Integrated optimization of bus bridging service design and passenger assignment in response to urban rail transit disruptions[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies,2023,150: 104098.

[16] 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 Y G,WANG L J,LIU Z G,et al. Vulnerability metrics of multimodal composite transportation network [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 195-207. (in Chinese)

[17] 于晓桦, 晏克非,牟振华,等. 基于多级网络的多模式交通配流研究[J]. 交通信息与安全,2018,36(1):103-110.
YU X H,YAN K F,MOU Z H,et al. A study of multimodal traffic assignment based on a multi-level network [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36(1): 103-110. (in Chinese)

[18] CHEN Y Y, LI T F, SUN Y, et al. Dynamic data-driven computation method for the number of waiting passengers and waiting time in the urban rail transit network[J]. IET Intelligent Transport Systems,2023,17(1):165-179.

[19] WANG Y, ZHOU Y, YANG H, et al. Optimizing bus bridging services with mode choice in response to urban rail transit emergencies [J]. European Journal of Operational Research, 2025, 323(1): 108-124.

[20] 李洁, 张欣宇, 朱全军, 等. 滑坡灾害影响下高速公路网络鲁棒性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2025, 52(1): 176-186.
LI J, ZHANG X Y, ZHU Q J, et al. Robustness analysis of expressway network under the influence of landslide disaster[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2025, 52(1): 176-186.(in Chinese)

[21] ZHANG N, GRAHAM D J, BANSAL P, et al. Detecting metro service disruptions *via* large-scale vehicle location data [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 144: 103880.

[22] HENRY D, EMMANUEL RAMIREZ-MARQUEZ J. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 99: 114-122.

[23] 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.