文章编号：1673-0291(2026)01-0048-11 DOI：10.11860/j.issn.1673-0291.20250092

城市轨道交通运营中断与客流作用下的网络脆弱性

宁丽巧[1]，张冬荧[1]，乔 珂[2]，林之涧[1]
（1.福建理工大学 交通运输学院，福州 350118；2.北京交通大学 交通运输学院，北京 100044）

摘 要：针对城市轨道交通网络在运营中断情景下的脆弱性问题，提出一种兼顾网络结构、客流作用和乘客行为响应的系统性评估方法．首先，基于累积前景理论（Cumulative Prospect Theory，CPT）与嵌套 Logit（Nested Logit，NL）模型，构建可刻画突发事件下乘客有限理性和风险规避特征的出行选择行为 CPT-NL 模型；然后，设计城市多模式交通网络下的城轨网络脆弱性分析框架，建立反映运营中断和客流作用影响的脆弱性量化指标；最后，以深圳市轨道交通网络为案例，选取高峰小时客流数据，系统模拟区间和换乘站点中断，量化网络性能损失与乘客出行影响．研究结果表明：关键区间或换乘站的失效不仅降低了网络连通性，更会引发大规模的客流拥堵和明显的出行延误，在区间中断下，受影响乘客比例最高达 14.78%，网络脆弱性水平最高达 12.02%；在换乘站中断时，受影响乘客比例最高达 11.73%，网络脆弱性水平最高达 5.53%；延误乘客数量明显高于因中断放弃轨道出行的损失乘客，表明大部分乘客选择城轨网络内绕行或组合出行方案．运营管理者应加强高脆弱性节点运维及应急预案，优化多模式交通调度，以提升城市轨道交通系统抗干扰能力与运营稳定性．

关键词：交通运输规划与管理；城市轨道交通；网络脆弱性；乘客出行选择；累积前景理论
中图分类号：U491.1 **文献标志码**：A

Network vulnerability of urban rail transit under operational disruptions and passenger flow

NING Liqiao[1]，*ZHANG Dongying*[1]，*QIAO Ke*[2]，*LIN Zhijian*[1]
（1.School of Transportation，Fujian University of Technology，Fuzhou 350118，China；
2.School of Traffic and Transportation，Beijing Jiaotong University，Beijing 100044，China）

Abstract：To address the vulnerability of urban rail transit networks during operational disruptions，this study proposes a systematic evaluation method that integrates network structure，passenger flow dynamics，and passenger behavioral responses. First，a CPT-NL model of travel choice behavior is developed based on Cumulative Prospect Theory (CPT) and the Nested Logit (NL) model. This model captures passengers' bounded rationality and risk aversion under emergency conditions. Second，a vulnerability analysis framework is designed for urban rail networks within multimodal transportation systems，establishing quantitative vulnerability metrics that reflect the combined impacts of operational disruptions and passenger flow dynamics. Finally，using Shenzhen's rail transit network as a

收稿日期：2025-06-24；**修回日期**：2025-08-27
基金项目：国家自然科学基金（52202379）；福建理工大学科研启动基金（GY-Z23211）
Foundation items：National Natural Science Foundation of China（52202379）；Fujian University of Technology Scientific Research Foundation（GYZ23211）
第一作者：宁丽巧（1992—），女，湖南邵东人，讲师，博士．研究方向为交通运输规划与管理．**email**：ninglq@fjut.edu.cn.

引用格式：宁丽巧，张冬荧，乔珂，等．城市轨道交通运营中断与客流作用下的网络脆弱性[J]．北京交通大学学报，2026，50(1)：48－58.
NING Liqiao，ZHANG Dongying，QIAO Ke，et al.Network vulnerability of urban rail transit under operational disruptions and passenger flow[J].Journal of Beijing Jiaotong University，2026，50(1)：48－58.(in Chinese)

case study, peak-hour passenger flow data are employed to systematically simulate disruptions at sections and transfer stations, quantifying network performance losses and passenger travel impacts. The results indicate that failures at critical sections or transfer stations reduce network connectivity and trigger large-scale passenger congestion and significant travel delays. During section disruptions, the proportion of affected passengers reaches up to 14.78%, with network vulnerability peaking at 12.02%. During transfer station disruptions, the proportion of affected passengers peaks at 11.73%, and network vulnerability reaches 5.53%. The number of delayed passengers significantly exceeds the number who abandon rail travel due to disruptions, indicating that most passengers opt for detours within the rail network or multimodal travel alternatives. Operational management should strengthen maintenance and emergency preparedness for high-vulnerability nodes, while optimizing multimodal transportation scheduling to improve the resilience and operational stability of urban rail transit systems.

Keywords: transportation planning and management; urban rail transit; network vulnerability; passenger travel choice; cumulative prospect theory

城市轨道交通网络具有高度关联性和联动性,一个子系统的故障易引发连锁反应,导致整体性能下降.运营中断会严重影响网络连通性,引发站点客流积压和扩散,威胁乘客安全并给城市公共交通系统带来巨大压力.网络脆弱性研究有助于揭示网络结构中易引发大规模客流拥堵的关键点,通过构建合理的脆弱性评估指标,分析乘客在运营中断时的行为模式和路网客流分布状态,能够识别易发生客流积压的关键站点.基于此,可提前储备应急设备、优化客流疏导措施,并在事故时快速调度公交或其他替代交通工具,减少事故影响,确保乘客安全和出行效率,提高城市轨道交通的安全管理和应急响应水平.

城市轨道交通网络脆弱性是指在运营中断情景下,因区间或站点失效所引起的网络系统服务性能下降程度.早期网络脆弱性研究多以网络的静态拓扑结构为基础,着重分析结构属性对系统脆弱性的影响[1];文献[2]表明了地铁网络静态拓扑结构对整体鲁棒性的重要作用;文献[3]强调了节点度、介数等复杂网络脆弱性评价指标.然而,上述研究大多局限于拓扑结构层面,主要分析节点或线路失效对整体连通性的破坏程度,未考虑节点之间的联动性,难以全面刻画实际运营中因客流分布与乘客行为响应变化导致的系统效能波动.

近年来,随着自动售检票大数据技术的普及,考虑到运营中断下客流的影响,轨道交通网络脆弱性的研究逐步从静态结构走向动态客流驱动.文献[4]利用地铁乘客刷卡数据估计城市轨道交通需求客流量,从而进行脆弱性分析;文献[5]则揭示了客流和运营状态变化对脆弱性评估的影响;文献[6]表明换乘站失效易引发客流迁移和连锁拥堵,会显著加剧网络脆弱性;文献[7]通过仿真分析验证了扰动类型和客流波动对脆弱性演化的影响.与此同时,文献[8]揭示了在故障条件下,客流聚集是加剧故障演化与传播的关键因素;文献[9]提出了客流作用下的轨道网络性能上下限;文献[10]将节点抗风险能力与客流扰动耦合,这些研究都是在动态客流视角下进行的网络脆弱性评估.

鉴于乘客行为对网络性能的影响,各位学者也对乘客出行行为与考虑轨道和公交等多模式竞合和依赖关系的网络脆弱性展开研究.文献[11]针对了城市轨道中断下多样化的乘客响应选择,文献[12]考虑客流在公交与地铁等方式之间的再分配,凸显了多模式替代在中断情境下的作用;文献[13]则强调乘客出行方式选择的异质性,考虑到不同出行方式之间的替代性;文献[14]将换乘时间引入路径选择模型,更贴合实际的出行过程;文献[15]聚焦于运营中断情景下乘客动态响应与路径选择机制;文献[16]从乘客服务性能角度进行城市轨道交通网络脆弱性评估;文献[17]结合乘客出行选择行为与出行便利性指标,对网络系统服务水平进行动态刻画.此外,针对非常态和不确定性情景下的乘客出行行为建模,文献[18]利用累积前景理论(Cumulative Prospect Theory, CPT)分析了出行时间可靠性对出行模式选择的影响;文献[19]验证了累积前景理论对中断情景下行为选择建模的适用性.

综上所述,现有研究已从静态拓扑分析拓展至融合动态客流与乘客行为的多因素、多尺度脆弱性与韧性评估框架,但对运营中断后客流冲击的关注仍然不足,对乘客出行行为的刻画未能精准捕捉其复杂性,且大多数研究未充分考虑城市轨道交通与其他公共交通网络的竞合关系,容易高估外部干扰

的影响.因此,本文聚焦运营中断情景下乘客出行选择行为对城市轨道交通网络脆弱性的影响,基于CPT与嵌套Logit(Nested Logit,NL)模型,构建CPT-NL模型刻画突发中断下乘客有限理性与风险规避特征,并考虑城市轨道交通与公交、出租等其他公共交通网络的相互影响,探讨乘客出行行为响应与网络结构共同作用下的脆弱性演化过程,旨在揭示中断事件对网络稳定性与服务性能的作用机制.

1 乘客出行选择CPT-NL模型构建

城市轨道交通运营中断的影响涉及列车运行、路网连接、乘客出行等多方面因素,为全面分析运营中断下城市轨道交通网络脆弱性表现,其关键在于要准确刻画乘客出行行为特征和构建乘客出行选择模型.

1.1 运营中断后的乘客出行行为分析

当城市轨道交通网络发生运营中断时,乘客出行行为可能会发生显著变化,其决策行为表现出多样化和复杂性的特点,乘客可能会改变出行方式、出行路线及出发地或目的地,或者他们可能会等待运营恢复.尤其在大中型城市,城市轨道交通、公交车、出租车等为乘客提供了多种替代选择.综合研究与实际,乘客在城市轨道交通运营中断后的出行方案集如表1所示.

表1中,城市轨道交通与公交车、出租车组合出行的组合换乘点不仅要求能够最大程度降低乘客在运营中断情况下的总出行成本,还需要综合考虑距离目的地的接近程度和交通模式的可达性,本文最优组合换乘节点的选取原则为换乘接驳地铁站距离目的地较近并可采用公交或出租车到达目的地,且总出行代价最小.

表1 中断下乘客出行选择方案集

Tab.1 Passenger travel choice schemes under disruptions

方案	描述	方案	描述
方案1:原地等待	当乘客判断等待运营恢复所需时间较短或替代出行成本较高时,可能选择原地等待	方案5:城市轨道交通与步行组合出行	与公交组合方案类似,利用步行解决最后一段路程通行问题
方案2:城市轨道交通网络内部绕行	乘客可通过选择次优路径绕过中断区段,以完成出行	方案6:公交车	若城市轨道交通大面积或长时间中断导致绕行不便,部分乘客可能会完全放弃城市轨道交通,转而选择公交车完成全程出行
方案3:城市轨道交通与公交车组合出行	无法绕行或绕行成本较高时,乘客可选择城市轨道交通与公交车组合的多模式出行方案	方案7:出租车	乘客对出行效率要求较高时,部分乘客可能会完全放弃城市轨道交通,选择出租车完成出行
方案4:城市轨道交通与出租车组合出行	与公交组合方案类似,利用出租车解决“地铁站至目的地”之间的一段通行问题	方案8:步行	当运营中断发生在短距离区段,乘客可能通过步行直接抵达目的地或最近可达的城市轨道交通、公交站点

1.2 广义出行成本量化

运营中断下乘客出行选择主要考虑的因素为出行时间和费用.出行时间包括乘车时间、候车时间、步行时间、换乘时间,出行费用包含由出行模式变化带来的费用成本.结合城市轨道交通网络及其客流数据,通过Python调用互联网地图软件路径规划应用程序接口(Application Programming Interface,API)实现路径规划,可获得各OD对不同出行选择方案下的理论出行时间和出行费用.

为综合考虑出行时间和出行费用对乘客出行选择的影响,结合乘客对不同时间的感知价值,并根据时间价值系数将出行费用转化为时间,建立广义出行成本函数,将不同方案的总出行成本进行统一量化,为后续乘客出行行为建模和网络脆弱性评估提供基础数据支持.广义出行成本函数T^k表达式为

$$T^k = t^k_{\text{ride}} + \beta_1 \cdot t^k_{\text{walk}} + \beta_2 \cdot t^k_{\text{wait}} + \beta_3 \cdot t^k_{\text{transfer}} + \beta_4 \cdot t^k_{\text{await}} + t^k_{\text{fare}}/\text{VOT} \quad (1)$$

式中:T^k表示路径k的广义出行成本;t^k_{ride}、t^k_{walk}、t^k_{wait}、t^k_{transfer}、t^k_{await}、t^k_{fare}分别为方案k的乘车时间、走行时间、候车时间、换乘时间、原地等待时间、出行费用;β_1、β_2、β_3、β_4分别表示候车时间、走行时间、换乘时间、原地等待时间的感知时间价值;VOT表示时间价值系数.

1.3 基于CPT的乘客出行行为特征刻画

传统出行选择模型往往假设乘客完全理性,难以真实反映运营中断下的乘客行为.CPT可用于解释乘客在面对风险选择时的非理性决策行为,揭示乘客出行决策的非理性特征.在运营中断场景下,乘客对中断带来的时间延误、额外换乘与拥挤加剧等负面变化,往往表现出明显的敏感性.例如,面对可能的不确定等待时间,部分乘客即便需要多花费用,也更愿意选择看似损失更小、风险更可控的替代出行方案,这正是CPT所揭示的“损失厌恶”特性.运用CPT,能更好地解释乘客在突发事件下的心理

预期和风险规避行为,从而更真实准确地刻画中断后乘客出行行为的复杂性.

CPT 理论模型由损益参照点、价值函数和决策权重3部分构成.为实现对不确定性出行收益与损失的CPT 建模,本文结合实际出行时间分布特征设定不同交通方式的时间项分布形式,如公交车与出租车的乘车时间假设为正态分布,其分布形式为 $t_{\text{ride}}^{k}\sim N(\mu,\sigma^2)$,表示均值为 μ、方差为 σ^2 的正态分布,以反映道路交通的不确定性及其出行时间的波动性;候车时间假设为以发车间隔 I 的均匀分布,其分布形式为 $t_{\text{wait}}^{k}\sim U(0,I)$,表示在区间 $[0,I]$ 上的均匀分布,以反映乘客随机到站与列车发车间隔的关系.在分布假设的基础上,通过离散化近似方法对不同交通方式的时间分布进行处理,以便避免极端值并保证结果的稳定性和可比性.

在运营中断条件下,乘客通常会以原方案的出行时间 T^0 为基础,并考虑一定的延误容忍时间 TU,来设定参照点,以评估各备选方案相对于参考方案带来的“收益”或“损失”.通过将连续时间变量离散化处理为若干区间,各区间的分类值为 $T_1^k, T_2^k, \cdots, T_n^k$,当实际结果 $T_i^k(i=1,2,\cdots,n)$ 优于参照点 $T^0+\text{TU}$ 时,乘客感受到收益;反之,乘客感受到损失.并且乘客对中断后出行延误的主观感受具有显著的非对称性和放大效应,乘客对损失的主观感受远大于对等量收益的感知.为刻画乘客对出行方案收益与损失的不同的敏感度,建立价值函数,来反映乘客在面对时间延误和换乘延误等损失时风险偏好特征,$g(T_i^k)$ 表达式为

$$g(T_i^k)=\begin{cases}\left(T_i^k-(T^0+\text{TU})\right)^{\alpha} & T_i^k\geqslant(T^0+\text{TU})\\ -\lambda\left(-T_i^k-(T^0+\text{TU})\right)^{\beta} & T_i^k<(T^0+\text{TU})\end{cases}\tag{2}$$

式中:$g(T_i^k)$ 代表方案 k 的真实出行时间为 T_i^k 的价值函数;α 表示乘客对收益的风险规避系数;β 表示乘客对损失的风险追求系数;λ 表示乘客对损失的敏感度,越大表示乘客对损失越敏感.

同时,面对极端小概率延误时,乘客会倾向于高估其发生的风险,从而影响出行决策,即表现为“小概率放大”的行为特征.为量化乘客对出行不确定性的主观概率感知偏差,建立决策权重函数,将客观概率转化为乘客主观概率,以捕捉乘客在评估不同风险事件时的真实心理权重,其表达式为

$$\begin{cases}\omega^{+}(p_i)=\dfrac{p_i^{\gamma}}{\left[p_i^{\gamma}+(1-p_i)^{\gamma}\right]^{1/\gamma}}\\ \omega^{-}(p_i)=\dfrac{p_i^{\delta}}{\left[p_i^{\delta}+(1-p_i)^{\delta}\right]^{1/\delta}}\end{cases}\tag{3}$$

式中:$\omega^{+}(p_i)$、$\omega^{-}(p_i)$ 分别表示收益时和损失时的决策权重函数;p_i 表示第 i 个区间的出行时间的分布概率;γ 表示收益时的风险态度系数;δ 表示损失时的风险态度系数.

最后,将事件结果与参考点的差值按照升序排列,即 $T_{-m}^k\leqslant T_{-m+1}^k\leqslant\cdots\leqslant T_{-1}^k\leqslant T_0^k\leqslant\cdots\leqslant T_{n-1}^k\leqslant T_n^k$,其中 T_{-m}^k 至 T_{-1}^k 表示事件结果为损失,T_0^k 表示既不损失也不收益,T_1^k 至 T_n^k 表示事件结果为收益,则综合累积前景值和累积决策权重函数表达式分别为

$$V=\sum_{i=-m}^{0}g(T_i^k)\pi_i^{-}+\sum_{i=1}^{n}g(T_i^k)\pi_i^{+}\tag{4}$$

$$\begin{cases}\pi_i^{+}=\omega^{+}(p_i\cup p_{i+1}\cdots\cup p_n)-\omega^{+}(p_{i+1}\cup p_{i+2}\cdots\cup p_n)\\ \qquad 0\leqslant i<n-1\\ \pi_n^{+}=\omega^{+}(p_n)\\ \pi_i^{-}=\omega^{-}(p_{-m}\cup p_{-m+1}\cdots\cup p_i)-\\ \qquad \omega^{-}(p_{-m}\cup p_{-m+1}\cdots\cup p_{i-1})\quad -m+1<i\leqslant 0\\ \pi_{-m}^{-}=\omega^{-}(p_{-m})\end{cases}\tag{5}$$

式中:π_i^{+}、π_i^{-} 分别为收益及损失对应的累积决策权重函数;n 表示收益端结果的个数,m 表示损失端结果的个数.

相比于传统效用理论,CPT 将各方式的综合累积前景作为出行者选择出行方案的决策依据,不仅包含了乘客对不同结果的主观感知,还充分考虑了对极端延误事件的非线性反应,体现了乘客“损失厌恶”和“小概率放大”的行为特征,有效提升了运营中断后出行选择模型的解释力.

1.4　基于 CPT-NL 的乘客出行选择模型构建

在实际交通系统中,不同交通方式及其组合之间往往存在复杂的相关性与分层替代结构,传统多项 Logit 模型难以准确刻画这一特征.因此,通过引入 CPT 并结合嵌套 Logit 模型构建运营中断下的乘客出行选择 CPT-NL 组合模型,以更全面地揭示运营中断下乘客行为响应与网络脆弱性的作用机制,构建的 NL 选择模型如图 1 所示.图 1 中,顶层为出行选择方案集,下设城市轨道交通方式出行、组合交通方式出行和外部交通方式出行 3 个巢,其巢式嵌

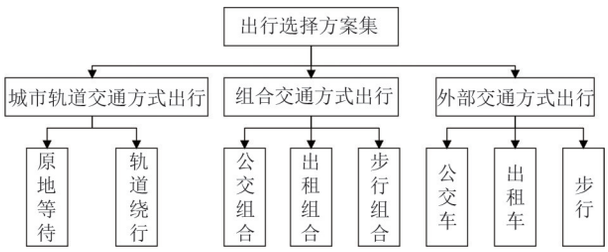


图1 Nested Logit选择模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the Nested Logit choice model

套结构设置,使得模型能够充分捕捉方案间的相关性和替代性,有效模拟不同出行方案之间的相关性和非独立性,进一步提升出行选择模型的合理性.

假设备选方案集合被分为N个巢,则在NL模型中在已选定巢B的前提下,选择该巢内方案k的选择概率$P(k|B)$为

$$P(k|B)=\frac{\exp\left(\frac{V^k}{\lambda_B}\right)}{\sum_{l\in N}\exp\left(\frac{V^l}{\lambda_B}\right)} \tag{6}$$

式中:$P(k|B)$表示巢B中方案k的选择概率;k表示巢内的具体方案;l表示巢的编号,用来区分不同巢;λ_B表示巢B的相关性参数,λ_B越小,巢内出行方案的选择越相关.

选择巢B的概率$P(B)$为

$$P(B)=\frac{\exp\left(W_B+\lambda_B\cdot \mathrm{IV}_B\right)}{\sum_{N}\exp\left(W_N+\lambda_N\cdot \mathrm{IV}_N\right)} \tag{7}$$

$$\mathrm{IV}_B=\ln\left(\sum_{l\in B}\exp\left(\frac{V^l}{\lambda_B}\right)\right) \tag{8}$$

式中:$P(B)$表示巢B的选择概率;W_B为巢B的常数项或巢级效用;IV_B是巢B的logsum项(Inclusive Value),表示巢内所有可选方案的综合效用水平.

最后,各方案的选择概率由所属巢的选择概率和巢内出行选择条件概率相乘得到,选择巢B中的路径i的联合概率$P(i)$为

$$P(i)=P(B)\cdot P(i|B) \tag{9}$$

在中断情景下,各方案出行时间分布作为CPT-NL模型的输入,用于刻画不确定性下的乘客感知与选择.各方案的出行时间由车上乘车时间、候车时间、换乘时间和步行时间等部分构成,通过对这些时间进行离散化处理,可以得到不同出行方案的出行时间,用于乘客选择建模.在CPT-NL组合模型中,将各巢内选择方案的确定性部分效用替换为累积前景理论计算得到的前景值,同时基于NL模型结构,逐步推导出巢内方案选择概率、巢间方式选择概率,从而得到各出行方案的选择结果,结合路径规划算法进一步开展网络客流重新分布和脆弱性分析.

2 城市轨道交通网络脆弱性分析

运营中断发生后,城市轨道交通物理拓扑网络的连通性能下降,同时线网内乘客出行选择受到影响,网络客流分布会发生显著变化,可能导致部分原本负载适中的线路或节点过载,从而引发运营安全事故.为研究城市轨道交通运营中断与客流作用下的网络脆弱性,评估模型需同时考虑网络结构、客流作用和乘客行为响应的影响.

2.1 城市轨道交通网络建模

城市轨道交通网络作为由众多基础设施节点和运营线路构成的复杂系统,其拓扑结构直接影响网络的连通性、冗余性及在异常情况下的运行效率.本文结合实际运营特点和物理拓扑结构,采用多层次网络结构,将地铁线路、公交线路及多模式换乘节点纳入统一建模框架,构建能真实反映实际运营与客流转移特性的综合交通网络模型,从而更真实地反映中断情景下乘客的多样化出行选择,能够保证多种出行方案在同一框架下具有可比性,为后续的网络脆弱性评估提供数据支持.

为准确描述城市轨道交通网络的拓扑结构关系,将每一车站的上、下行站台分别抽象为网络中的独立节点,以充分刻画实际运营线路的方向性和换乘复杂性.网络中的有向边用于描述节点间的物理或换乘连接关系.同一运营线路上相邻站点之间的有向边用于表达线路间的时空连接,其边权为两站点间的行程时间;同一换乘站内,不同线路的换乘节点之间通过有向边相连,其边权为平均换乘时间.不仅可以精细反映正常运营状态下的客流分布,还能在换乘站点失效、线路中断等特殊情境下,精准分析网络的连通性变化与整体服务性能损失.

2.2 网络脆弱性评估指标

城市轨道交通运营中断后,受影响的乘客可以细分为选择线网等待绕行乘客、组合出行乘客、选择外部出行方案的乘客3类.3类乘客分别对应表1中的出行选择方案,即线网等待绕行乘客对应方案1、2,组合出行乘客对应方案3、4、5,外部出行乘客对应方案6、7、8.3类乘客的广义出行延误成本为

$$C_{\mathrm{metro}}=\sum_{k=1}^{2}\sum_{i,j}\left(Q_{ij}\cdot P_{ij}^{k}\cdot\left(T_{ij}^{k}-T_{ij}^{0}\right)\right) \tag{10}$$

$$C_{\text{comb}}=\sum_{k=3}^{5}\sum_{i,j}\left(Q_{ij}\cdot P_{ij}^{k}\cdot\left(T_{ij}^{k}-T_{ij}^{0}\right)\right) \tag{11}$$

$$C_{\text{other}}=\sum_{k=6}^{8}\sum_{i,j}\left(Q_{ij}\cdot P_{ij}^{k}\cdot\left(T_{ij}^{k}-T_{ij}^{0}\right)\right) \tag{12}$$

式中:C_{metro},C_{comb}和C_{other}分别表示中断场景下3类乘客的广义出行延误成本;Q_{ij}表示OD对从起点站i到终点站j的客流量;$i,j\in N$,其中N表示城市轨道交通网络中所有站点的集合.

为全面反映城市轨道交通网络在运营中断与客流作用下的脆弱性,从运营服务网络性能下降的视角,基于乘客细分,考虑不同出行延误的影响,从网络总乘客出行效率损失的视角,提出城市轨道交通网络脆弱性定量评估指标.定义网络脆弱性为运营中断后网络总乘客广义出行延误成本与日常运营情况下网络总乘客广义出行成本的比值,以反映运营中断下网络总服务性能的下降,其表达式为

$$\eta=\frac{C_{\text{metro}}+\phi_1\cdot C_{\text{comb}}+\phi_2\cdot C_{\text{other}}}{\sum_{i,j}Q_{ij}\cdot T_{ij}^{0}} \tag{13}$$

式中:η表示运营中断场景下网络脆弱性水平;ϕ_1表示组合出行相对城轨内部出行方式对网络性能损失影响的相对权重;ϕ_2表示选择外部出行方案乘客相对城轨内部出行方式对网络性能损失影响的相对权重.

2.3　城市轨道交通网络脆弱性分析框架

通过设计城市轨道交通网络脆弱性分析框架,结合运营中断下的乘客出行选择CPT-NL组合模型,并基于城市轨道交通网络建模,通过模拟不同站点或区间中断情景,综合分析城市轨道交通网络脆弱性水平和客流作用影响,示意如图2所示.该框架能够识别易发生客流拥堵和网络效率下降的薄弱环节,揭示城市轨道交通网络在运营中断与客流作用下的脆弱性表现.乘客出行行为模型与轨道交通网络脆弱性之间的耦合关系体现在“中断情景→重构路网拓扑及路径重新规划→构建CPT-NL模型→客流重分布→网络性能损失”的链条过程中.中断情景触发路网拓扑的重构与路径的重新规划,经过CPT-NL模型刻画乘客出行偏好的变化,由此引发出行选择方案的调整并导致客流在网络中的重新分布,最终造成网络整体运行效率下降并体现在网络脆弱性指标上.

图2中,在运营中断情景下,需要先根据城市轨道交通各运营线路的折返配线情况,分析相邻区间和车站的继发中断情况,然后再判断OD对之间的路径连通性和各方案的出行成本,从而为后续的乘客出行选择建模与网络脆弱性量化提供基础.在外部交通方式出行信息获取方面,运用网络爬虫技术并利用Python调用互联网地图服务平台API,通过地理编码API获取地铁站点的经纬度信息,然后调用路径规划API,获得各站点间公交、出租车和步行等外部出行方式的出行信息,包括距离、耗时和费用等,由此构建出轨道交通与多模式交通之间的衔接数据基础.

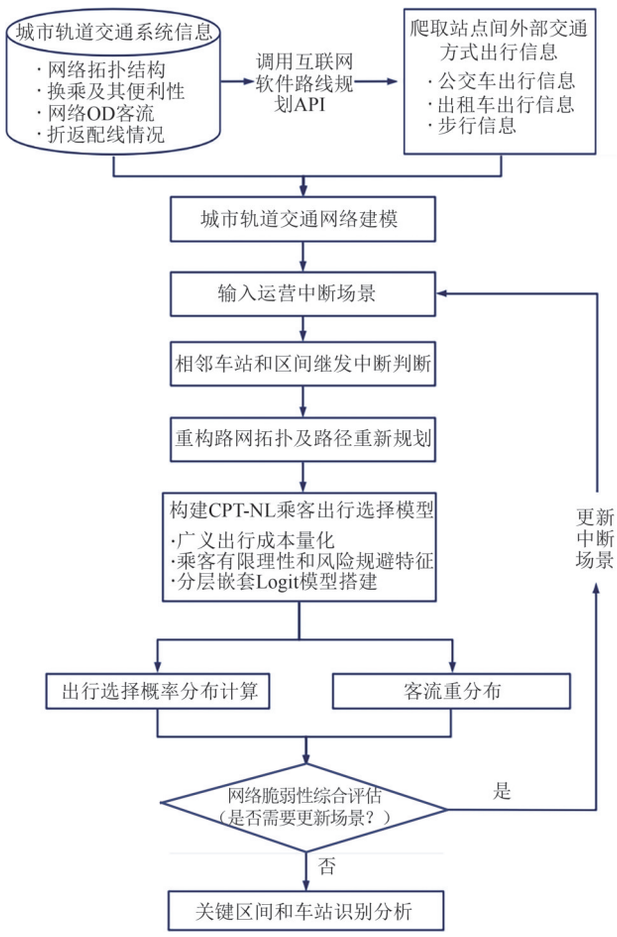


图2　城市轨道交通网络脆弱性分析框架

Fig.2　Framework for urban rail transit network vulnerability analysis

3　案例研究

3.1　案例描述

以2019年11月深圳市轨道交通网络为案例,选取某工作日高峰小时的OD客流数据,出行时间与费用等数据通过Python调用互联网地图服务API获取,综合考虑常规公交车、出租车及步行等外部公共交通方式及地铁与外部交通方式相结合的方式,开展网络脆弱性分析.深圳地铁网络共包含8条双向运营线路、172座车站、29座换乘站和278个换乘方向,换乘站占比16.86%.

在C#编程环境下,实现了数据文件和模型文件

的生成，构建完整的网络脆弱性分析框架．为确保仿真结果的现实意义与参考价值，基于既有研究对相关参数进行了标定，设定时间价值系数VOT=1/2.7[20]；设定CPT参数$\alpha=\beta=0.88$，$\lambda=2.25$[21]；$\gamma=0.61$，$\delta=0.69$[22]．

3.2 区间中断场景下网络脆弱性分析

不同区间的中断对城市轨道交通网络的脆弱性水平影响存在显著差异，通过设计不同区间失效场景，分析各区间运营中断下的网络脆弱性水平与受影响乘客比例，如图3所示．

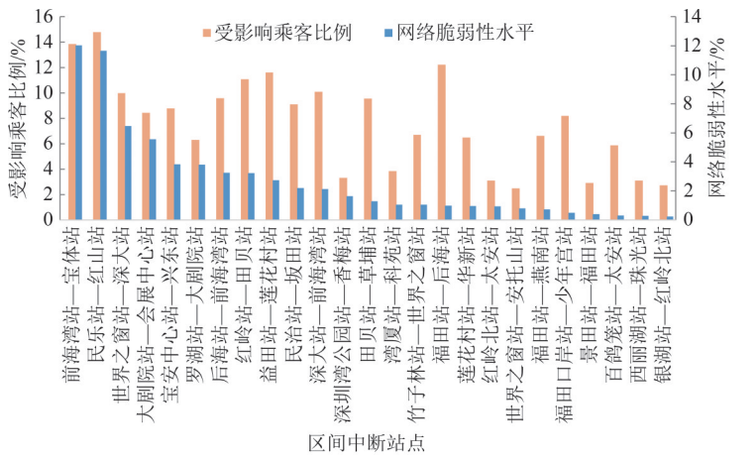


图3 不同区间中断时的受影响乘客比例和网络脆弱性水平

Fig.3 Proportion of affected passengers and network vulnerability under sectional disruptions

由图3可知：民乐站—红山站区间中断时受影响乘客比例最高，占比达14.78%；前海湾站—宝体站区间中断时，受影响乘客比例也很高，占比为13.85%，且网络脆弱性水平也达到最高为12.02%；绝大多数区间的网络脆弱性水平分布于1%～6%，受影响乘客比例大多集中在2%～10%，仅少数区间显著高于平均值，反映个别节点对全网效率具有关键作用；少数区间如福田站—后海站、红岭站—田贝站、深大站—前海湾站等受影响比例较大，且多为高客流通道，承担着关键的客流集散与传输功能；部分区间的网络脆弱性与受影响乘客比例高度一致，表明这些区间的中断不仅会显著削弱网络运行效率，同时也会带来大规模的乘客出行影响，这些区间同样应作为城市轨道交通运营管理中的重点防护对象．

同时根据区间运营中断下受影响乘客比例和网络脆弱性水平的分布情况，可以绘制各运营线路的脆弱性分布箱形图和受影响乘客比例分布箱形图，不同线路之间的分布特征存在差异，如图4所示．

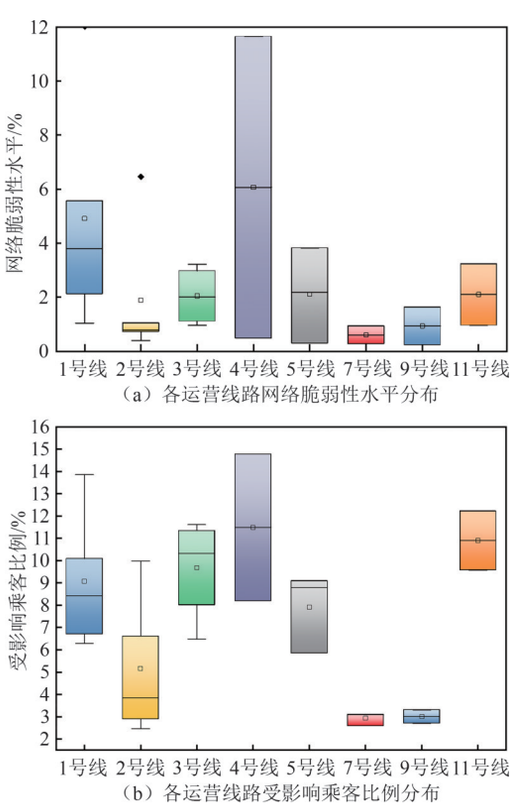


图4 区间中断下各运营线路网络脆弱性和受影响乘客比例分布箱形图

Fig. 4 Boxplots of network vulnerability and affected passenger proportion distribution for each metro line under sectional disruptions

由图4可知：①不同运营线路在区间中断下的网络脆弱性分布差异显著．1号线与4号线表现最为突出，1号线内部区段差异明显，部分区段脆弱性较高；4号线则整体水平偏高，表明该线路在多数区间中断下都会对网络稳定性造成较大冲击；2号线与3号线的脆弱性分布较低，整体表现对网络稳定性影响较小；5号线与11号线处于中等水平，部分区段表现出较高脆弱性；7号线和9号线其线路区间中断对网络脆弱性影响有限．②不同运营线路在区间中

断下的受影响乘客比例,4 号线表现最为突出,3 号线和 11 号线也总体较高,说明这几条线路大多数区段一旦中断便会对全网乘客出行造成大规模冲击;1 号线线路内部区段差异明显,部分核心区段中断时受影响乘客比例极高;2 号线和 5 号线处于中等水平,部分区段虽对乘客影响较大,但整体冲击强度有限;7 号线与 9 号线的乘客受影响比例最低,对网络整体乘客出行影响有限.③运营管理中,对于 7 号线和 9 号线等线路,乘客能够依靠网络内部的替代路径完成出行,因此运营中断所带来的影响被削弱.因此,应将民乐站—红山站和前海湾站—宝体站等典型区段、1 号线和 4 号线等高风险线路作为重点关注对象,在运营层面引入灵活调度,在网络协调层面强化多模式联动,在管理层面完善应急预案,以全面提升系统的抗扰动能力.

把线网等待绕行乘客和组合出行乘客共同称为延误乘客,选择外部出行方案的乘客称为损失乘客,可以得到中断下延误乘客人数、损失乘客及客流平均增加时间如表 2 所示.

表 2　不同区间中断下客流延误和损失

Tab.2　Passenger delays and losses under sectional disruptions

中断区间	延误乘客比/%	损失乘客比/%	出行平均增加时间/min
罗湖站—大剧院站	5.55	0.74	5.61
大剧院站—会展中心站	7.76	0.67	3.35
竹子林站—世界之窗站	6.29	0.42	9.51
世界之窗站—深大站	9.57	0.41	4.69
深大站—前海湾站	9.90	0.19	12.39
前海湾站—宝体站	13.09	0.76	2.81
湾厦站—科苑站	3.53	0.32	13.74
世界之窗站—安托山站	2.45	0.02	6.34
景田站—福田站	2.83	0.07	9.02
福田站—燕南站	6.30	0.31	8.80
益田站—莲花村站	10.43	1.18	7.86
莲花村站—华新站	5.55	0.93	9.83
红岭站—田贝站	9.59	1.49	9.15
田贝站—草埔站	8.24	1.31	12.19
福田口岸站—少年宫站	7.96	0.24	11.14
民乐站—红山站	14.48	0.30	4.89
宝安中心站—兴东站	8.14	0.65	11.64
民治站—坂田站	8.44	0.65	16.42
百鸽笼站—太安站	5.74	0.12	10.40
西丽湖站—珠光站	3.04	0.05	14.09
红岭北站—太安站	2.99	0.11	9.34
深圳湾公园站—香梅站	3.18	0.13	4.76
银湖站—红岭北站	2.66	0.05	9.95
福田站—后海站	10.56	1.66	12.03
后海站—前海湾站	8.32	1.26	10.44

由表 2 可知:对不同区间站点中断情景下的客流延误和损失进行分析,民乐站—红山站、前海湾站—宝体站区间延误乘客人数占比较高,最高达 14.48%,说明大规模客流需要通过绕行或组合方式完成出行;在福田站—后海站、红岭站—田贝站区间中断时,损失乘客占比较高,最高达 1.66%,反映出部分乘客因替代路径不足而选择退出系统;延误乘客远多于损失乘客,表明轨道交通网络内乘客明显居多;在区间民治站—坂田站、西丽湖站—珠光站中断时,乘客的平均出行时间增加幅度较大,最高达 16.42 min,表明该类区段的替代路径普遍绕远,导致乘客整体出行成本显著提升.

区间中断下少数核心区间和高风险线路对系统稳定性与乘客出行影响最为突出,其作用在乘客出行行为选择下被进一步放大.一方面表现为系统层面的网络脆弱性水平升高,另一方面体现为乘客层面的出行受影响比例上升.高流量线路中断时容易导致大规模延误,核心区段的中断更可能引发损失乘客,而部分区段则显著拉长出行时间,说明乘客在高不确定性和高成本情境下往往倾向于退出系统或承受更高延误.运营管理中,关键区段和高客流量线路是城市轨道交通网络稳定性的核心瓶颈,应成为应急管理和冗余设计的重点关注对象.需要针对不同类型的区段采取差异化措施,对高流量线路强化客流引导,对核心区段优化替代衔接方案,对边缘区段增加跨模式接驳,以缓解中断冲击、提升网络韧性.

3.3　换乘站点中断场景下网络脆弱性分析

换乘站点通常处于客流密集的商业或交通枢纽位置,承担着庞大的客流集散任务,是城市通勤的关键节点.在换乘站点中断场景下,网络脆弱性水平和受影响的乘客比例,如图 5 所示.

由图 5 可知:绝大多数换乘站的受影响乘客比例约在 2%～7%,网络脆弱性水平约在 1%～5%,极少数换乘枢纽脆弱性明显高于平均线,反映了个别节点对全网效率影响较大,对网络的整体稳定性也有较深影响;换乘站点中断下受影响乘客比例最高的是福田站占比 11.73%,其次为车公庙站为 10.57% 和深圳北站 7.87%;在网络脆弱性水平方面,车公庙站以脆弱性水平 5.53% 居于首位,明显高于其他车站,其次是福田站 3.91%,均为多线换乘或网络核心枢纽;这些换乘站点的中断不仅会造成大规模乘客受影响,更会削弱全网运行效率,其高脆弱性反映出在网络拓扑和客流分布上的双重敏感性,是城市轨道交通系统亟需提升冗余和韧性的关键节点.

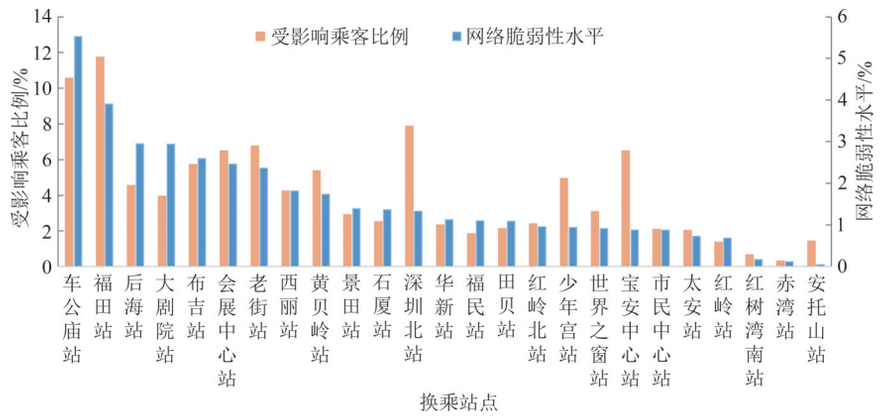


图 5　换乘站点中断时的受影响乘客比例和网络脆弱性水平

Fig.5　Proportion of affected passengers and network vulnerability under transfer-station disruptions

基于乘客细分，揭示出换乘枢纽中断对乘客出行选择行为的冲击机制，进而得到绕行乘客人数、损失乘客人数及客流出行平均增加时间，如表 3 所示.

表 3　换乘站中断下的客流延误和损失

Tab.3　Passenger delays and losses under transfer-station disruptions

中断站点	延误乘客比/%	损失乘客比/%	出行平均增加时间/min
老街站	5.99	0.76	8.24
大剧院站	3.83	0.12	1.95
会展中心站	6.32	0.17	6.23
车公庙站	10.02	0.55	4.48
世界之窗站	3.03	0.06	7.06
宝安中心站	5.97	0.53	9.62
赤湾站	0.31	0.01	9.00
后海站	4.20	0.34	4.44
安托山站	1.42	0.01	8.81
景田站	2.85	0.06	5.70
福田站	10.35	1.38	6.73
市民中心站	2.01	0.08	10.48
黄贝岭站	5.22	0.16	7.23
石厦站	2.37	0.15	3.34
少年宫站	4.74	0.21	6.55
华新站	2.22	0.12	4.54
红岭站	1.31	0.05	4.41
田贝站	2.03	0.10	4.31
布吉站	5.27	0.45	8.79
福民站	1.63	0.21	2.31
深圳北站	7.50	0.37	14.11
西丽站	4.13	0.12	9.08
太安站	1.99	0.03	6.60
红岭北站	2.3	0.10	5.60
红树湾南站	0.59	0.08	8.21

由表 3 可知：福田站、车公庙站和深圳北站延误乘客人数占比较多，最高达 10.35%，换乘枢纽中断时大量乘客通过绕行和组合出行方式完成出行，网络内部的再分配压力大；福田站和老街站损失乘客人数占比较多，最高达 1.38%，反映出部分乘客因缺乏可接受的替代路径而直接放弃地铁出行，转向其他交通方式，这一结果与累积前景理论下的风险规避行为高度契合，即在高不确定性和高成本的场景下，部分乘客更倾向于退出系统；深圳北站中断时乘客平均增加的出行时间最多，达到 14.11 min，这表明该站点在空间结构上的枢纽属性极强，且替代路径有限，乘客一旦受扰动，整体出行成本被显著放大.

换乘站点的中断不仅降低了系统整体运行效率，还直接导致乘客出行体验恶化，包括绕行比例上升、损失人数增加和平均出行时间延长.这说明重要换乘节点在城市轨道交通网络中承担着关键的组织与分配功能，对网络运行协调性具有决定性影响.因此，在运营管理层面，应针对福田站、车公庙站、深圳北站等重要换乘节点制定有针对性的应急响应策略，如灵活运用折返线路、设置临时接驳公交及强化跨模式协同，以提高网络的可恢复性与持续服务能力.

网络中关键区段或换乘站的中断不仅削弱网络连通性，还会造成大范围的拥堵与出行延误，显著降低系统运行效率.脆弱性高且客流影响突出的“双高”站点多分布于网络核心及主要换乘区域，结构位置与客流强度的叠加效应放大了其对整体运行稳定性的冲击，应作为运营调度与风险防控的重点.对于脆弱性较低但受影响乘客较多的线路，应完善疏导机制与替代衔接方案，避免乘客滞留与客流积压.

4　结论

1）区间运营中断时，城市轨道交通网络的脆弱性水平存在区间差异，大多数区间的网络脆弱性水平分布于 1%～6%，前海湾站-宝体站区间最高可达

12.02%;受影响乘客比例大多集中在2%～10%,民乐站-红山站区间最高达14.78%;不同运营线路在区间中断下的网络脆弱性分布也存在差异,1号线与4号线表现最为突出,7号线和9号线总体脆弱性较低.

2)换乘站中断时,大多数换乘站的受影响乘客比例大多在2%～7%,受影响乘客比例最高的是福田站占比11.73%;网络脆弱性水平基本在1%～5%,车公庙站以5.53%居于首位.

3)两种场景中断下,验证了关键区间和节点失效将大幅提高客流延误和出行受影响比例,乘客的替代选择在一定程度上缓解了系统整体效率损失.延误乘客数量明显高于因中断放弃轨道出行的损失乘客,大规模客流需要通过轨道内部绕行或组合方式完成出行;区间中断时,乘客的平均出行增加时间最高为16.42 min,换乘站中断时,深圳北站乘客平均增加的出行时间最多,达到14.11 min.

4)为提高网络可靠性与乘客安全,运营部门应强化对关键换乘站点和重点区段的日常巡检与维护,提升应急响应与恢复能力,并制定有针对性的处置预案;应实时监测重点站点及其周边客流,及时识别人流冲击风险;在早晚高峰及突发事件期间,通过动态调配运力、优化换乘组织与通行秩序、加强现场客流引导,降低单点失效向系统性拥堵扩散的可能性,保障网络运行连续性与出行安全,从而切实提升整体运营稳健性.

本研究以运营中断情境下的乘客出行选择行为为核心,构建了基于网络拓扑的城市轨道交通模型,揭示了乘客行为响应对网络脆弱性演化的影响机制,研究结果为城市轨道交通系统的脆弱性评估与风险防控提供了理论支撑,同时为运营管理者优化应急策略与增强系统韧性提供了决策支持.未来可结合多源出行数据与动态仿真技术,进一步探讨中断持续时间与多模式协同响应机制,以实现城市轨道交通网络在智能调度、快速恢复与韧性设计方面的持续优化与发展.

参考文献(References):

[1] MATTSSON L G, JENELIUS E. Vulnerability and resilience of transport systems: A discussion of recent research[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015, 81: 16－34.

[2] DERRIBLE S, KENNEDY C. The complexity and robustness of metro networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2010, 389(17): 3678－3691.

[3] 邓旭东, 王雪, 徐文平, 等. 城市地铁网络脆弱性对比分析[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 152－156. DENG Xudong, WANG Xue, XU Wenping, et al. Comparative analysis of vulnerability of urban metro network[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3): 152－156.(in Chinese)

[4] 曲迎春, 徐仲之, 龚航, 等. 城市轨道交通网络脆弱性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(11): 2276－2283. QU Yingchun, XU Zhongzhi, GONG Hang, et al. Vulnerability analysis of urban rail transit networks[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(11): 2276－2283.(in Chinese)

[5] PAN S Z, LING S, JIA N, et al. On the dynamic vulnerability of an urban rail transit system and the impact of human mobility[J]. Journal of Transport Geography, 2024, 116: 103850.

[6] MA F, LIANG Y, YUEN K F, et al. Assessing the vulnerability of urban rail transit network under heavy air pollution: A dynamic vehicle restriction perspective[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 52: 101851.

[7] WANG L, CHEN Y T, WANG C. Research on evolutionary model of urban rail transit vulnerability based on computer simulation[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(1): 195－204.

[8] ZHAO J Q, LIANG Q H, GUO J A, et al. Vulnerability assessment and evolution analysis of Beijing's urban rail transit network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2024, 653: 130078.

[9] GU Y, CHEN A, XU Y Y, et al. Modeling vulnerability envelope of urban rail transit networks under simultaneous disruptions of stations and line sections[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 169: 104887.

[10] LU Q C, ZHANG L, XU P C, et al. Modeling network vulnerability of urban rail transit under cascading failures: A coupled map lattices approach[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 221: 108320.

[11] MO B C, KOUTSOPOULOS H N, ZHAO J H. Inferring passenger responses to urban rail disruptions using smart card data: A probabilistic framework[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 159: 102628.

[12] LIU B, ZHU G Y, LI X L, et al. Vulnerability assessment of the urban rail transit network based on travel behavior analysis[J]. IEEE Access, 2020, 9: 1407－1419.

[13] LU Q C, ZUO X Y, CHEN C, et al. The heterogeneity of travel mode choice behavior under unplanned metro service disruptions[J]. Transportation Research

Part D: Transport and Environment, 2025, 142: 104683.

[14] 钱堃, 陈垚, 毛保华. 考虑换乘时间影响的城市轨道交通路径选择行为研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(2): 116－121.
QIAN Kun, CHEN Yao, MAO Baohua. Route choice behavior for urban rail transit considering transfer time [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(2): 116－121. (in Chinese)

[15] 马超群, 张爽, 陈权, 等. 客流特征视角下的轨道交通网络特征及其脆弱性[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 208－216.
MA Chaoqun, ZHANG Shuang, CHEN Quan, et al. Characteristics and vulnerability of rail transit network besed on perspective of passenger flow characteristics [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(5): 208－216. (in Chinese)

[16] 宁丽巧, 谢秉磊, 张希, 等. 城市轨道交通换乘站点失效下网络脆弱性分析[J]. 山东科学, 2022, 35(1): 81－87.
NING Liqiao, XIE Binglei, ZHANG Xi, et al. Network vulnerability analysis under urban rail transit transfer station failure[J]. Shandong Science, 2022, 35(1): 81－87. (in Chinese)

[17] LU Y, YI M M, CUI J Q, et al. Assessment of urban rail transit network passenger-centered resilience under hazards: A dynamic resilience assessment framework [J]. Accident Analysis & Prevention, 2025, 217: 108042.

[18] GHADER S, DARZI A, ZHANG L. Modeling effects of travel time reliability on mode choice using cumulative prospect theory [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 108: 245－254.

[19] 柳伍生, 潘自翔, 龙思, 等. 基于累积前景理论的地铁运营中断后乘客出行行为[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(4): 70－77.
LIU Wusheng, PAN Zixiang, LONG Si, et al. Passenger travel behaviors after subway operation interruption based on cumulative prospect theory [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(4): 70－77. (in Chinese)

[20] 吴焕, 彭湖, 陈梓星, 等. 基于SP调查的出行时间价值估计及出行者属性影响分析[J]. 交通与运输, 2019, 35(6): 9－12.
WU Huan, PENG Hu, CHEN Zixing, et al. Estimation and influence analysis of traveler attributes for value of travel time based on SP survey[J]. Traffic & Transportation, 2019, 35(6): 9－12. (in Chinese)

[21] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty [J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5(4): 297－323.

[22] KAHNEMAN D. Maps of bounded rationality: psychology for behavioral economics [J]. American Economic Review, 2003, 93(5): 1449－1475.