

文章编号: 1003-1421(2026)08-0010-09

引用格式: 李文倩, 李海鹰, 蒋熙, 等. 突发事件下城市轨道交通的供需匹配韧性评估与优化[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(8): 10-18.
LI Wenqian, LI Haiying, JIANG Xi, et al. Resilience Assessment and Optimization of Supply-Demand Matching in Urban Rail Transit under Disruptive Events[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(8): 10-18.

突发事件下城市轨道交通的供需匹配韧性 评估与优化

李文倩, 李海鹰, 蒋熙, 张逸菲

(北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 在城市轨道交通逐渐成为居民主要出行方式、大客流风险日益突出的背景下, 亟需提升系统韧性以保障运行效率与服务质量。本研究从供需协同视角出发, 构建量质双维的韧性评估框架, 并提出供给端资源补充与需求端客流调控的协同优化策略。评估体系以系统性能和乘客出行效益为核心指标, 结合网络客流动态推演技术获得的精确客流时空分布结果, 全面量化系统服务水平。优化策略以车站剩余能力为核心, 采用TOPSIS评分与K-means聚类方法分级评估车站风险, 实施差异化客流管控策略, 并设计应急公交接驳方案。以G市地铁运营中断事件为案例验证, 结果表明该方法能够显著提升关键瓶颈车站及系统整体的韧性水平, 为城市轨道交通在突发事件下的精细化管理提供科学依据。

关键词: 城市轨道交通; 韧性评估与优化; 供需协同; 客流管控; 网络客流推演
中图分类号: U293.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250910002

Resilience Assessment and Optimization of Supply-Demand Matching in Urban Rail Transit under Disruptive Events

LI Wenqian, LI Haiying, JIANG Xi, ZHANG Yifei

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Against the background that urban rail transit has gradually become the main travel mode of residents, and the risk of large passenger flow is increasingly prominent, it is urgent to improve system resilience to guarantee operation efficiency and service quality. From the perspective of supply-demand coordination, this paper constructed a quantitative and qualitative dual-dimensional resilience assessment framework and proposed a collaborative optimization strategy of resource supplement at the supply side and passenger flow regulation at the demand side. By taking system performance and passenger travel benefit as core indicators, the system service level was comprehensively quantified by combining the precise spatiotemporal distribution results of passenger flow obtained by the dynamic simulation technology of network passenger flow. By taking the residual capacity of stations as the core, the station risks were evaluated hierarchically by using TOPSIS scoring and K-means clustering methods, and differentiated passenger flow control strategies were implemented. An emergency bus feeder scheme was designed. Through the case verification based on the metro operation interruption

收稿日期: 2025-09-10

通信作者: 蒋熙(1971—), 女, 四川都江堰人, 北京交通大学交通运输学院副教授。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3005204)

event in City G, the results show that this method can significantly improve the resilience level of key bottleneck stations and the overall system and provides a scientific basis for the refined management of urban rail transit under disruptive events.

Keywords: Urban Rail Transit; Resilience Assessment and Optimization; Supply-Demand Coordination; Passenger Flow Control; Network Passenger Flow Simulation

0 引言

随着城市经济的发展和人口持续增长,城市规模不断扩张,产业布局逐渐向外围延伸,导致城市交通需求显著增加。城市轨道交通凭借其高效、无拥堵风险以及大运量的特点,已成为城市居民主要的出行方式。这促使轨道交通网络规模日益扩大,站点分布更加密集,列车运行更为紧凑。在这一高负荷、紧密耦合的复杂系统中,偶然的系统扰动(包括设备故障、自然灾害等)往往具有“牵一发而动全身”的效应,不仅对直接受影响的站点造成严重破坏,往往也会波及附近站点、相关线路乃至整个网络的正常运行。为科学应对此类扰动带来的挑战,韧性(Resilience)为系统性能分析提供了有效视角。该概念源于生物学^[1],后被引申到工程领域,用以描述系统在面对扰动时的感知、承受和恢复能力。对于城市轨道交通系统这一网络特征显著、站点及线路高度关联的复杂系统而言,韧性能够准确地刻画系统性能在整个扰动过程中的动态变化。基于此,如何科学地评估突发事件下系统韧性水平,并提出有效的优化恢复策略以提升网络效能,已成为当前亟需解决的关键问题。

韧性在城市轨道交通领域的研究主要围绕韧性评估与韧性提升2个方面。韧性评估研究通常围绕网络性能和功能需求2个角度建立评估指标。一方面,学者们基于复杂网络理论,分析节点在扰动下的性能表现及整体网络性能的叠加效应^[2-4]。例如,马敏等^[5]通过对OD客流损失率和网络服务效率损失率加权求和,提出网络性能响应函数以提升网络韧性。肖红等^[6]考虑站点客流量对网络韧性的影响,提出基于客流加权的网络全局效率指标,用于分析网络特征。另一方面,部分研究从功能需求角度出发,采用功能性指标量化韧性。陈锦渠等^[7]基于韧性三角理论,以站点剩余服务水平为指标,结合模糊聚类分析对评估结果进行划分。曾小清等^[8]通过DEMATEL-ISM复合模型对指标进行筛选,构建了

城市轨道交通车站系统韧性承载能力评估指标体系。然而,这些评估方法多依赖静态网络拓扑或单一功能指标,评估结果难以全面反映系统服务质量和韧性水平的动态变化。

在韧性提升方面,研究主要集中于事后恢复阶段的网络修复策略。张洁斐等^[9]以网络平均效率为性能指标,探讨修复策略与恢复网络性能的关系。徐玉萍等^[10]以网络联通水平和冗余水平为评估指标,采用遗传算法求解车站修复策略模型以提升网络韧性。Zheng等^[11]采用遗传算法和Dijkstra算法求解城市轨道交通网络受损后的最优修复策略以提升韧性。张开冉等^[12]基于乘客出行行为决策,构建了基于修复策略的韧性优化双层模型,以提高网络对乘客行为的反应能力。马飞等^[13]应用SEZIR传染病传播模型模拟灾害传播过程,研究城市轨道交通网络的集成韧性,通过动态调整限流策略优化网络运行效率。张雯婕等^[14]构建基于区间修复的城市轨道交通故障恢复模型,提出兼顾效率与稳定性的修复策略。但这些研究主要聚焦于网络拓扑结构或服务能力的单方面恢复,缺乏对供需状态的全面衡量,难以实现供需匹配结果的动态优化和服务效率的最大化,优化决策的针对性和实际应用价值有限。

为此,本研究基于突发情况下的网络客流时空分布推演数据,提出量质双维的系统服务质量评估方法,深入分析扰动下网络客流的动态变化状况,并提出针对性的优化组织策略,以实现城市轨道交通系统在突发事件下的服务质量与韧性提升。

1 研究框架

突发事件下,城市轨道交通系统的运行能力受损,导致供给与需求匹配出现偏差,表现出系统服务质量的下降。为准确评估系统损失并提升韧性水平,本研究提出突发事件下城市轨道交通的供需匹配韧性评估与优化框架,研究框架如图1所示。评估体系从量与质2个维度展开:通过系统周转量损失情况评估整体网络韧性,通过乘客出行效益韧性分析量化微观

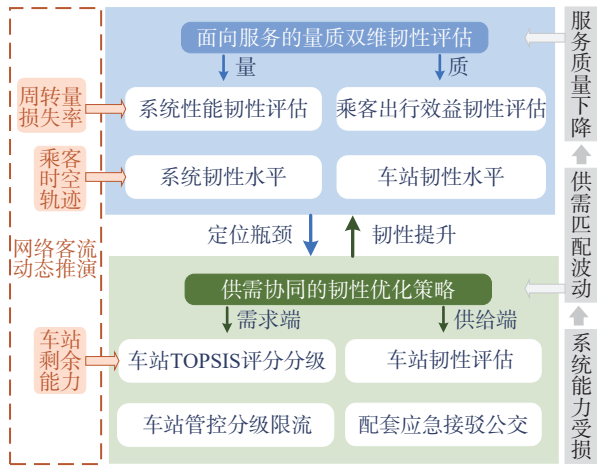


图1 研究框架

Fig.1 Research framework

服务质量的动态变化,并精准定位服务受损的时空分布,从而实现对系统韧性水平的全面量化。优化策略基于供需匹配状况,采用车站剩余能力作为关键指标衡量匹配效果。在需求端,运用TOPSIS评分模型对车站风险进行分级评估,执行分级管控限流策略;在供给端,基于车站韧性评估识别韧性薄弱区间,实施针对性的应急接驳公交方案,以实现系统在突发事件下的高效恢复与服务质量提升。

为支撑上述评估与优化,研究依托网络客流动态推演技术^[15]获取全网客流的动态变化数据。该技术利用构建突发情况下的城市轨道交通乘客出行选择模型及客流时空分布动态推演模型,求解全网客流时空轨迹匹配结果,并形成全网客流状态估计数据,包括每名乘客的时空轨迹、各个时段车站站台候车人数、各方向换乘客流量、各区间断面客流量、各列车满载率等。

2 面向服务的量质双维韧性评估

突发事件下,城市轨道交通系统的供给呈现出抵抗、吸收、恢复的动态演化特征,客流行为则表现为网外转移和网内转移2种形式。本研究从量与质2个维度构建韧性评估框架,通过系统周转量损失率从量上评估系统性能变化,通过乘客出行效益质量函数从质上评估车站服务韧性的差异,为识别系统瓶颈和制定优化策略提供依据。

2.1 系统性能韧性评估

突发事件导致城市轨道交通系统供给能力受损,部分乘客因系统无法满足出行需求而选择放弃出行

或改乘其他交通方式(如公交、出租车、骑行等),形成网外转移。这种转移直接体现为系统客流周转量的实质性流失,多出现在事件影响范围广、持续时间长或处于高峰时段等紧急情况下,此时系统无法通过自身能力补偿受损区间缺陷,造成乘客寻求网外交通供给,是网络韧性不足的直接体现。为量化系统能力损失,本研究以网络周转量为核心指标,综合表征服务规模、网络结构完整性及连通性变化,并通过周转量损失率评估系统运输能力的衰退程度。网络周转量 W_t 的计算方法如公式(1)所示。

$$W_t = \sum_{(i,j) \in OD} f_{ij,t} d_{ij} \quad (1)$$

式中: $f_{ij,t}$ 表示时间 t 内从起点 i 到终点 j 的实际客流量,人次; d_{ij} 为OD间的最短或实际乘车距离,km。

进一步,计算周转量损失率 $L_t \in [0, 1]$ 如公式(2)所示。

$$L_t = 1 - \frac{W_{t,R}}{W_{t,N}} \quad (2)$$

式中: $W_{t,N}$ 为正常运行状态下的基准周转量,人公里; $W_{t,R}$ 为事件影响下的实际周转量,人公里。 L_t 数值越高,表明系统周转效率损失越严重。

为进一步评估系统在突发事件中的供给能力变化情况,基于周转量损失率的时间演化,构建系统性能韧性指数 R_w 如公式(3)所示。

$$R_w = \frac{1}{t_r - t_e} \int_{t_e}^{t_r} L_t dt \quad (3)$$

式中: t_e 和 t_r 分别为突发事件影响开始和系统恢复至基准状态的时间, $[t_e, t_r]$ 表示事件影响持续时间。 R_w 值越接近1,表明系统恢复越快、韧性越强;值越低,则反映客流流失严重、韧性不足,该指数为后续优化策略的制定提供了量化依据。

2.2 乘客出行效益韧性评估

突发事件导致城市轨道交通系统供给能力下降,乘客也常通过网内转移,即在保持起讫点(OD)不变的情况下调整路径或换乘方式,继续依赖轨道交通网络完成出行。尽管网内转移不会显著降低系统整体周转量,表面上体现一定韧性,但其引发的局部线路负荷激增和换乘压力增大,往往导致系统效率下降与运输不均衡。

为分析网内转移的影响,本研究聚焦乘客对系统服务的感知,包括出行耗时延长和乘坐体验恶

化, 这些感知直接驱动乘客行为决策, 如调整出行路径、推迟出行或放弃出行。为精准定位网内转移导致的瓶颈车站, 本研究依托客流推演技术获取的客流时空分布数据, 从乘客感知的快捷性和舒适性两个维度出发, 以车站等待时间和列车满载率为指标, 构建乘客出行效益质量函数及车站效益韧性指数, 精细化评估车站服务能力的变化情况。

构建快捷性质量函数 $Q_{T, t, i}$ 如公式(4)所示。

$$Q_{T, t, i} = \frac{T_{t, i, N}}{T_{t, i, R}} \quad (4)$$

式中: $T_{t, i, N}$, $T_{t, i, R}$ 分别为乘客在正常、扰动状态下于研究对象车站的候车等待时间(不含走行时间), min, 表征乘客 i 的快捷性感知。

构建舒适性质量函数 $Q_{D, t, i}$ 如公式(5)所示。

$$Q_{D, t, i} = \frac{D_{t, i, N}}{D_{t, i, R}} \quad (5)$$

式中: $D_{t, i, N}$, $D_{t, i, R}$ 分别为正常、扰动状态下以研究对象车站为终点的区间列车平均满载率, 表征乘客 i 的舒适性感知。

在此基础上, 综合构建乘客出行效益质量函数 $Q_{B, t, i}$, 表示乘客 i 在研究对象车站的综合出行效益, 以全面刻画乘客对服务状态变化的主观感知。

$$Q_{B, t, i} = \omega_T \cdot Q_{T, t, i} + \omega_D \cdot Q_{D, t, i} \quad (6)$$

式中: 权重 ω_T , ω_D 依据乘客类型、出行目的或经验研究设定, 满足 $\omega_T + \omega_D = 1$ 。

为从车站层面量化服务能力, 基于研究对象车站内所有乘客的出行效益质量, 构建车站效益韧性指数 $R_{B, s}$, 表征车站 s 在事件影响时间段 $[t_e, t_r]$ 内的韧性值。

$$R_{B, s} = \frac{1}{t_r - t_e} \int_{t_e}^{t_r} \frac{\sum_{i \in S} Q_{B, t, i}}{|S|} dt \quad (7)$$

式中: S 表示时间 t 内车站 s 的乘客集合, $|S|$ 为集合

中乘客数量; $\frac{\sum_{i \in S} Q_{B, t, i}}{|S|}$ 为车站 s 在时间 t 内所有乘客的平均出行效益质量, 反映车站服务能力的综合水平。 $R_{B, s}$ 值越接近 1, 表示车站服务能力恢复越快, 乘客受影响越小; 值越低, 则表明车站服务能力退化严重, 乘客出行受阻明显。

该指数通过聚合乘客感知数据, 精准刻画车站因网内转移导致的负荷压力, 为差异化客流管控和应急补给策略提供依据。

3 供需协同的韧性优化策略

为有效提升城市轨道交通在突发事件下的系统韧性, 本研究从供需协同视角出发, 提出以车站剩余能力为核心的优化策略, 旨在通过精准调控客流需求和补充供给能力, 提升运行效率与服务质量。

3.1 基于TOPSIS分级的客流需求调控

系统韧性衰减通常由瓶颈车站负荷激增引发, 导致乘客滞留与服务失衡。车站剩余能力作为衡量供需匹配状态的关键指标, 通过评估车站当前承载的客流与其最大服务能力之间的差距, 量化了车站不同扰动情境下的剩余服务能力。车站剩余能力 $C_{t, j}$ 的计算方法如公式(8)所示。

$$C_{t, j} = C_{\max, j} - \max[0, P_{t, j} - (Q_{\max, l} - Q_{t, l})] \quad (8)$$

式中: $C_{\max, j}$ 为车站 j 站台最大容纳人数, 人; $P_{t, j}$ 表示时刻 t 车站 j 的站台实时候车人数, 人; $Q_{\max, l}$ 为列车 l 的最大容纳人数, 人; $Q_{t, l}$ 表示列车 l 的实时载客人数, 人。

该方法通过从车站最大容量中扣除实时候车人数与列车剩余容量的差值, 动态体现供需匹配的平衡状态。

基于这一指标, 本研究构建了TOPSIS评分模型, 通过风险等级分级和聚类分析, 制定针对性的客流控制措施。设计 4 项评价指标: ①超载幅度 ΔC_{over} , 车站剩余能力为负值时, 表明已超出车站的最大容纳人数, 超载幅度越大, 车站的服务水平越低; ②下降幅度 $\Delta D_{\text{decrease}}$, 正常与扰动状态下车站剩余能力的平均差值, 用于剔除常态拥挤车站的误判, 反映扰动引发的服务水平退化程度; ③超载频率 F_{over} , 车站剩余能力为负值的时间占比, 用于衡量供需失衡出现的频率; ④超载连续性 T_{over} , 车站剩余能力为负值的最长时段, 表征能力缺口持续的时长。

TOPSIS模型按以下步骤进行计算。

(1) 归一化与加权。首先对原始决策矩阵 $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ (m 为车站数, n 为指标数) 进行归一化, 得到

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}。随后, 应用权重 ω_j 构建加权矩阵 $V = [v_{ij}]$, $v_{ij} = \omega_j \cdot r_{ij}$, 其中权重通过多次测试确定为$$

$[0.3, 0.3, 0.1, 0.3]$ 。

(2) 确定最优解与最劣解。鉴于所有指标均为负

向指标(越小越好),定义最优解和最劣解如下式所示。

最优解 $V^+ = [v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+]$, 其中 $v_j^+ = \min_{1 \leq i \leq m} v_{ij}^+$

最劣解 $V^- = [v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-]$, 其中 $v_j^- = \max_{1 \leq i \leq m} v_{ij}^-$

(3) 计算距离。车站 i 与最优解、最劣解的距离 d_i^+ 、 d_i^- 计算公式如下。

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (9)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (10)$$

(4) 计算评分。车站 i 的 TOPSIS 评分 S_i 为

$$S_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (11)$$

S_i 值越高,表明车站风险越低; S_i 值越低,风险越高。

为实现动态分级,采用 K-means 聚类方法,以 TOPSIS 评分和超载幅度为维度进行分组。基于标准化数据,通过肘部法则确定最优簇数 k ,并计算各簇中心的评分阈值。结合分级结果,针对不同车站采用差异化客流控制措施。

3.2 基于车站韧性评估的应急公交设计

为增强供给端的恢复能力,研究基于车站能力韧性开展应急公交优化设计,依托客流推演技术获取车站及列车客流数据,精确刻画关键时段的负荷动态演变。通过分析车站剩余能力的时空分布与连续性,提出应急接驳公交方案,以补充受损区间的运力。不同于前文从乘客体验角度构建的车站效益韧性指数,车站能力韧性侧重于供给端,关注车站及列车在突发事件下的剩余服务能力,用以刻画供需失衡时系统承载的维持与恢复水平。

$$P_{F,t,j} = \frac{C_{t,j,R}}{C_{t,j,N}} \quad (12)$$

$$R_{F,j} = \frac{1}{t_r - t_e} \int_{t_e}^{t_r} P_{F,t,j} dt \quad (13)$$

车站剩余能力函数 $P_{F,t,j}$ 定义为扰动与常态的比值,基于 $P_{F,t,j}$ 的时间演化,构建车站能力韧性指数 $R_{F,j}$,该指数反映车站 j 的剩余能力在扰动期间的维持与恢复水平。

为制定应急接驳公交方案,基于计算的 $R_{F,j}$ 按站序排序,结合其空间分布特征,采用阈值标准和连续区间识别方法设计应急公交方案。基于车站能力韧性指数的全局统计分布设定合理阈值,低于该

阈值的车站需补充公交运能。同时结合车站顺序,对连续低于阈值的区间进行应急公交补充,采用站站停形式覆盖连续低韧性区间,保障乘客连续转运。公交班次安排需结合系统性能韧性评估和乘客出行效益韧性评估的结果,动态优化调度频率与覆盖时段,确保资源利用最优并贯穿事件影响全过程。

4 案例研究

4.1 实验设计

本研究选取某日 G 市地铁因供电设备故障引发的运行中断事件作为分析案例。该事件发生于早高峰时段,列车双向运行受阻超过 1 h,导致乘客出行延误、站台拥挤与进出站滞留等情况。事件期间,地铁运营方结合现场情况和工作经验实施了客流控制及应急公交接驳措施,随后逐步恢复正常。

为评估该事件风险下系统韧性水平并验证优化方法的有效性,研究构建常态、突发事件未干预、突发事件干预后 3 种场景展开对比分析,实验场景设置如表 1 所示。以历史同时间段的常态数据为基础,依托复杂场景下的网络客流动态推演技术,分别获得对应的客流时空分布结果。

表 1 实验场景设置
Tab.1 Experimental scenario setting

序号	场景名称	场景内容
1	常态场景	基于历史同时间段的常态客流 OD 与常态列车时刻表,推演得到常态运行下的客流分布数据
2	突发事件未干预场景	将常态客流 OD 应用于突发事件对应的列车时刻表,模拟未采取干预措施的情形,推演得到客流分布数据
3	突发事件干预后场景	在突发事件情况下应用优化策略,推演得到干预措施实施后的客流分布数据

4.2 韧性评估与提升

4.2.1 韧性评估

本研究所用客流推演技术采用滚动推演方式,以每 15 min 为一个时段,起始时刻为地铁运营开始时间 5:30,其中 5:30—5:44 定义为第 0 时段,推演结果确保覆盖突发事件全过程。

突发事件未干预场景下系统周转量损失率时间变化图-场景 2 如图 2 所示。由图 2 可知,从时段 9 (7:45—7:59) 开始,系统周转量损失率开始急剧攀升,表明从此阶段开始,系统对事件破坏产生显著反应,事件发生时刻应出现于稍早时段。随后,直至时段 12 (8:30—8:44) 系统周转量损失率持续高于

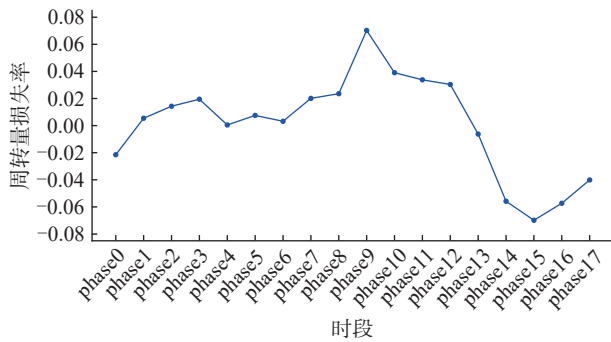


图2 系统周转量损失率时间变化图-场景2

Fig.2 Time variation diagram of system turnover loss rate-Scenario 2

常态水平,表明系统供给能力难以恢复,大量乘客流向系统外,韧性受限。而时段13—14(8:45—9:14)系统损失率降至0以下,表示系统供给逐步恢复,滞留站内的乘客集中大量上车,期间系统供给压力持续较大。从时段15(9:15—9:29)起损失率趋于平稳,系统逐步恢复正常运行。在未干预情况下,系统性能韧性指数为0.8872,显示较强的整体韧性,但局部时段表现不足。

根据系统性能韧性评估能够清晰得知事件发生

后系统供给变化呈现的演化规律:初始反应期为时段9(7:45—7:59)、高损失持续期为时段10—12(8:00—8:44),以及恢复过渡期为时段13—14(8:45—9:14)。如在时段9—14(7:45—9:14)实施优化措施,能够及时分流客流从而有效提升韧性。

进一步利用乘客出行效益韧性评估方法对全网进行车站层面的韧性评估,定位1号线为受事件影响最显著的线路,并在该线路内部基于车站效益韧性指数识别具体瓶颈车站。

事件期间1号线车站乘客出行效益质量函数分布热力图-场景2如图3所示,红色越深表示效益越差。结果表明,事件发生开始时,XL,CJC,GYQ等车站乘客出行效益急剧下降,并在高损失持续期维持低值,反映出等待时间延长和满载率上升对乘客出行带来的负面影响。恢复过渡期内,部分车站如GZDZ的乘客出行效益开始回升,但瓶颈车站的恢复相对滞后。

1号线车站效益韧性指数-场景2如图4所示,该图能够直观反映车站与全网均值的偏差,其中低

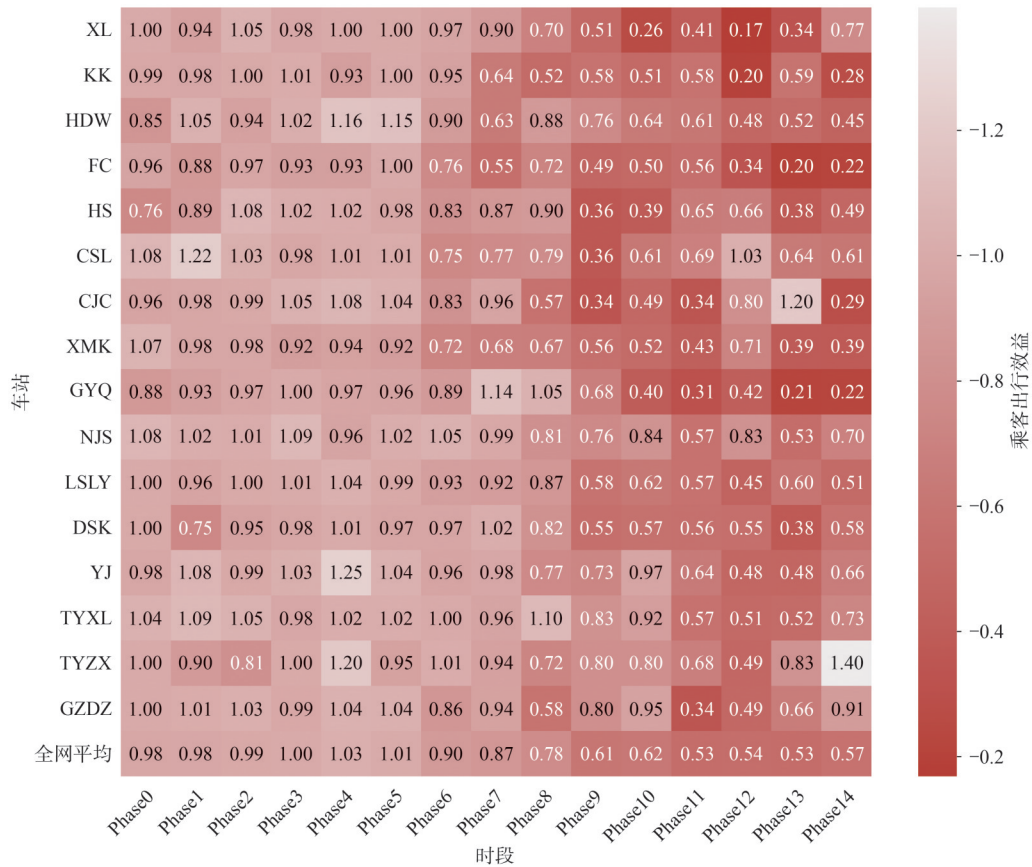


图3 1号线车站乘客出行效益质量函数分布热力图-场景2

Fig.3 Heatmap of passenger travel benefit quality function distribution for stations along Line 1-Scenario 2

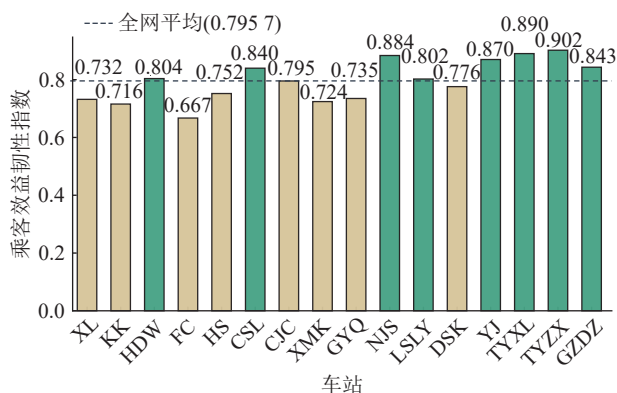


图4 1号线车站效益韧性指数-场景2

Fig.4 Benefit resilience index of stations along Line 1-Scenario 2

于平均值用红色表示，高于平均值用蓝色表示。FC，GYQ等站的韧性指数远低于全网平均值，属于高风险瓶颈车站，其在事件冲击下较为脆弱。相比之下，TYZX，NJS等站的韧性指数较高，韧性表现相对较强。

上述分析表明，乘客出行效益的低值区域与低韧性车站高度重合，凸显了瓶颈车站在事件期间的负荷压力和恢复迟缓。同时，从乘客出行效益角度分析，1号线车站韧性指数明显低于全网平均水平，表明全网瓶颈空间位置主要集中于1号线，后续应针对该线进一步展开深入剖析和优化设计。

4.2.2 韧性优化策略

为有效缓解1号线在突发事件下的客流压力，在需求端实施基于TOPSIS分级的客流管控策略，并在供给端通过车站能力韧性评估设计应急接驳公交方案，协同提升系统韧性。

采用TOPSIS评分分级评估方法识别车站风险等级，并匹配相应的客流控制策略。根据超载幅度、下降幅度、超载频率和超载连续性4项指标对1号线车站进行TOPSIS评分，因超载幅度对车站剩余能力影响最为显著，将其作为辅助维度进行K-means聚类分析。K-means聚类基于所有时段的TOPSIS评分确定统一的阈值区间，聚类结果将车站风险分为4个等级，其中风险等级3为最高风险等级，表明车站剩余能力极度紧张，长时间无车到达导致站台乘客滞留，极易引发大客流等高风险事件。1号线车站TOPSIS评分聚类图-场景2如图5所示，展示所有时段的三维聚类分布，用于可视化风险等级在时段维度的动态演化。

参照地铁分层级客流管控规则^[16]，依据TOPSIS

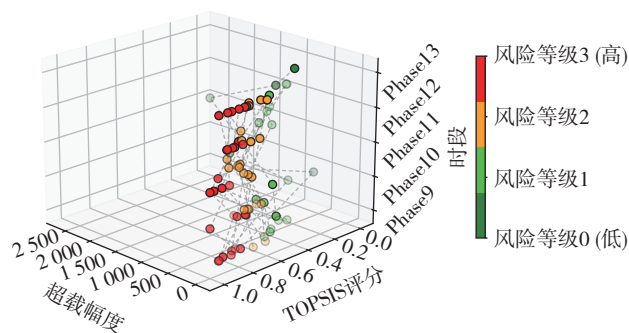


图5 1号线车站TOPSIS评分聚类图-场景2

Fig.5 Clustering diagram of TOPSIS scores for stations along Line 1-Scenario 2

评分聚类结果，在除最低风险等级外的车站建立递进式客控体系。最高风险等级3车站实施三级站控，在出入口外限制进站乘客数量，通过设置临时围挡、广播引导和安保人员分流，优先缓解整体站内压力；风险等级2车站实施二级站控，在非付费区调节进入付费区的乘客数量，通过闸机限流和候车区缓冲，避免付费区拥挤；风险等级1车站实施一级站控，在付费区调节进入站台的乘客数量，通过站台屏蔽门控制和间隔放行，实现客流均匀分布。随事件缓解逐步降级管控措施，确保系统平稳恢复。

1号线车站风险等级及客控措施如表2所示。XL，CJC，GYQ，NJS等站风险等级为3，在时段9(7:45—7:59)启动三级站控，通过严格限制进站客流迅速缓解站内压力；FC，DSK，YJ等站风险等级为2，全时段实施二级站控，重点控制非付费区客流；KK，HDW，HS等站风险较低，主要采用一级站控，调节付费区进入站台的乘客数量。事件缓解后，车站根据实际情况逐步降级客控等级，恢复系统平稳运行。

在供给端，基于车站能力韧性评估设计应急接驳公交方案。利用客流推演数据计算得到1号线上行方向各车站能力韧性指数-场景2如图6所示，基于韧性指数的全局统计分布，由均值(0.209)减去标准差(0.121)的近似分界确定阈值为0.1。FC，CJC，XMK，GYQ，LSLY，DSK站的韧性指数分别为0.082，0.080，0.054，0.039，0.071，0.058，均低于该阈值，表明剩余能力显著不足，特别是在时段10—12(8:00—8:44)内负荷压力尤为突出。相比之下，HS，CSL，NJS等3站的韧性指数较高，但为确保连续性，接驳线路应覆盖整个压力区间，使得客流压力得到充分缓解。由此，针对FC至DSK站

表2 1号线车站风险等级及客控措施
Tab.2 Risk levels and passenger control measures of stations along Line 1

序号	车站名称	风险等级	客控等级	客控时段	序号	车站名称	风险等级	客控等级	客控时段
1	XL	3	三级站控	9	9	GYQ	3	三级站控	9—13
		2	二级站控	10—13					
2	KK	1	一级站控	9—13	10	NJS	3	三级站控	9
							1	一级站控	10—13
3	HDW	1	一级站控	9—13	11	LSLY	2	二级站控	9
							1	一级站控	10—13
4	FC	2	二级站控	9—13	12	DSK	2	二级站控	9—13
5	HS	1	一级站控	9—13	13	YJ	2	二级站控	9—13
6	CSL	1	一级站控	9—13	14	TYXL	2	二级站控	9
							1	一级站控	10—13
7	CJC	3	三级站控	9	15	TYZX	1	一级站控	9—13
		2	二级站控	10—13					
8	XMK	2	二级站控	9	16	GZDZ	1	一级站控	9—13
		1	一级站控	10—13					

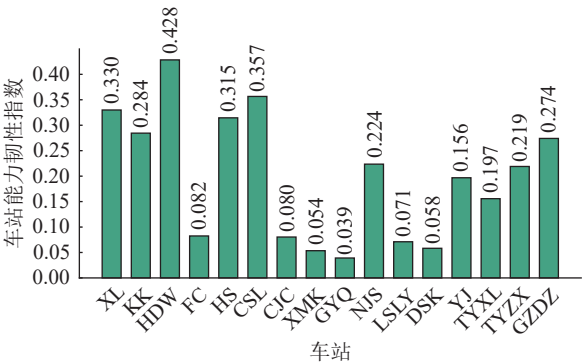


图6 1号线上行方向各车站能力韧性指数-场景2
Fig.6 Capacity resilience index of stations in upward direction of Line 1-Scenario 2

的连续低韧性区间于时段9—14(7:45—9:14)设置站站停应急接驳公交，结合分级客控策略与应急接驳公交的协同运行，有效提升系统整体韧性。

4.3 结果分析

根据提出的优化策略形成突发事件干预后场景，通过客流推演重新获取动态客流时空分布结果。再次计算1号线车站效益韧性指数对比如表3所示，系统性能韧性指数由0.887 2提升至0.956 1，增幅为7.9%。1号线所有车站效益韧性指数平均提升14.74%，其中关键瓶颈车站如CJC，GYQ，XL韧性增幅接近20%，表明应急接驳公交与三级站控的协同作用显著缓解了高负荷压力。中风险车站如FC，HS，DSK等韧性水平同步提升，有效支持了区间稳定性。低风险车站如GZDZ增长率较低，反映其原有韧性基础较强。整体来看，优化策略从客流需求管控和综合交通供给补充双管齐下，提升了系统韧性，减轻了突发事件中的风险压力。

表3 1号线车站效益韧性指数对比

Tab.3 Comparison of benefit resilience index for stations along Line 1

车站名称	突发事件 未干预韧性指数	突发事件 干预后韧性指数	增长率/%
XL	0.732	0.865	18.25
KK	0.716	0.875	22.28
HDW	0.804	0.857	6.58
FC	0.667	0.874	31.07
HS	0.752	0.941	25.08
CSL	0.840	0.968	15.31
CJC	0.795	0.945	18.82
XMK	0.724	0.876	20.98
GYQ	0.735	0.879	19.65
NJS	0.884	0.914	3.40
LSLY	0.802	0.913	13.80
DSK	0.776	0.906	16.73
YJ	0.870	0.953	9.52
TYXL	0.890	0.948	6.51
TYZX	0.902	0.953	5.64
GZDZ	0.843	0.862	2.21

5 结论与建议

本研究构建了基于供需协同的量质双维韧性评估与提升框架，依托客流推演技术精确量化城市轨道交通系统在突发事件下的服务韧性。案例分析表明，针对G市地铁1号线运营中断事件，分级客控措施与应急接驳公交的协同应用显著缓解了瓶颈车站压力，车站韧性指数提升明显，验证了方法的有效性与实用性。研究结果为城市轨道交通系统在突发事件下的运行优化提供了理论支持与实践指导。

为进一步提升城市轨道交通系统韧性，提出建

议：①加强客流推演技术在日常运营中的实时应用，提前识别潜在风险点；②完善分级客控策略的动态调整机制，结合实时客流数据实现精准响应；③优化应急接驳公交的线路设计与调度效率，增强跨模式交通协同能力；④深化多场景模拟分析，构建适应不同突发事件类型的韧性管理预案，以提升城市轨道交通系统的整体抗扰能力与恢复效率。

参考文献：

- [1] HOLLING. C. S. Resilience and Stability of Ecological Systems[J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [2] ZANIN M, SUN X Q, WANDEL T S. Studying the Topology of Transportation Systems through Complex Networks: Handle with Care[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 2018(1): 3156137.
- [3] ZHANG D M, DU F, HUANG H W, et al. Resiliency Assessment of Urban Rail Transit Networks: Shanghai Metro as an Example[J]. Safety Science, 2018, 106: 230-243.
- [4] CANDELIERI A, GALUZZI B G, GIORDANI I, et al. Vulnerability of Public Transportation Networks Against Directed Attacks and Cascading Failures[J]. Public Transport, 2019, 11(1): 27-49.
- [5] 马 敏, 胡大伟, 舒 兰, 等. 城市轨道交通网络韧性评估及恢复策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(2): 396-404.
MA Min, HU Dawei, SHU Lan, et al. Resilience Assessment and Recovery Strategy on Urban Rail Transit Network[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(2): 396-404.
- [6] 肖 红, 刘书君, 王孝坤. 突发事件下地铁网络韧性评估及恢复策略研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(2): 161-171.
XIAO Hong, LIU Shujun, WANG Xiaokun. Resilience Assessment and Recovery Strategy of Metro Network under Emergencies[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(2): 161-171.
- [7] 陈锦渠, 张 帆, 彭其渊, 等. 大客流下轨道交通站点韧性评估及划分[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 2994-3002.
CHEN Jinqu, ZHANG Fan, PENG Qiyuan, et al. Resilience Assessment and Partition of an Urban Rail Transit Station under Large Passenger Flow[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(6): 2994-3002.
- [8] 曾小清, 朱明昌, 刘 源, 等. 城市轨道交通车站系统韧性承载能力评估指标体系研究[J]. 交通与运输, 2024, 40(6): 20-26.
ZENG Xiaoqing, ZHU Mingchang, LIU Yuan, et al. Evaluation Index System for the Resilience Capacity of Urban Rail Transit Station Systems[J]. Traffic & Transportation, 2024, 40(6): 20-26.
- [9] 张洁斐, 任 刚, 马景峰, 等. 基于韧性评估的地铁网络修复时序决策方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(4): 14-20.
ZHANG Jiefei, REN Gang, MA Jingfeng, et al. Decision-Making Method of Repair Sequence for Metro Network Based on Resilience Evaluation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(4): 14-20.
- [10] 徐玉萍, 侯明超. 地铁网络中断下韧性评估及修复策略[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(6): 198-206, 214.
XU Yuping, HOU Mingchao. Resilience Evaluation and Restoration Strategy for Interrupted Metro Network[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(6): 198-206, 214.
- [11] ZHENG M M, ZUO H Z, ZHOU Z T, et al. Recovery Strategies for Urban Rail Transit Network Based on Comprehensive Resilience[J]. Sustainability, 2023, 15(20): 15018.
- [12] 张开冉, 殷苏平, 蒋明君. 城市轨道交通网络韧性优化研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(2): 527-535.
ZHANG Kairan, YIN Suping, JIANG Mingjun. Research on Optimizing the Resilience of Urban Rail Transit Networks[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(2): 527-535.
- [13] 马 飞, 赵成勇, 孙启鹏, 等. 重大公共卫生灾害主动限流背景下城市轨道交通网络集成韧性[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 208-221.
MA Fei, ZHAO Chengyong, SUN Qipeng, et al. Integrated Resilience of Urban Rail Transit Network with Active Passenger Flow Restriction under Major Public Health Disasters[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 208-221.
- [14] 张雯婕, 胡军红, 闻成维, 等. 考虑网络韧性的城市轨道交通故障恢复研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 179-186.
ZHANG Wenjie, HU Junhong, WEN Chengwei, et al. Research on Urban Rail Failure Recovery Considering Network Resilience[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(4): 179-186.
- [15] 杨越迪. 城市轨道交通网络客流协同控制优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [16] 刘菊美. 基于车站客流密度系数监控及预警的地铁线网客流联控研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 4-9.
LIU Jumei. Joint Control of Metro Network Passenger Flow Based on Station Passenger Density Co-Efficient Monitoring and Early Warning[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 4-9.

(责任编辑 汪沁莹)