

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.01.014

考虑公交接驳的地铁网络韧性 评估及故障修复策略

崔欣, 路庆昌, 徐标, 李静

(长安大学电子与控制工程学院, 西安 710064)

摘要: 地铁网络突发重大事故后, 通常会启动公交接驳疏散滞留乘客。提出衡量网络性能的网络效率可达性指标, 考虑地铁站点发生故障后公交接驳对乘客的紧急疏散作用。基于网络效率可达性指标构建韧性评估模型, 提出多故障下以韧性最大化为目标的修复策略, 并以上海市地铁网络为例进行实例研究。研究结果表明, 单个站点发生故障后启动公交接驳可使网络性能损失降低 5.1%; 占网络站点总数 2.14% 的多个站点发生故障后启动公交接驳可使网络性能损失降低 13.48%; 多故障下相比基于站点度、介数、脆弱性等评估得到的修复序列, 基于韧性评估得到的最优修复序列可使网络性能累积损失降低 2.86%。此外, 研究发现在公交接驳场景下, 当地铁网络中多个站点发生故障后, 优先修复客流量大、站点周边线路稀疏、失效后造成影响大且修复时间短的站点, 有助于降低网络性能的累积损失。

关键词: 城市轨道交通; 韧性评估; 修复策略; 公交接驳; 网络性能; 脆弱性

中图分类号: U291

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)01-0093-06

Resilience Evaluation and Failure Recovery Strategy of Metro Network Considering Bus Connection Scenario

CUI Xin, LU Qingchang, XU Biao, LI Jing

(School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064)

Abstract: Bus connections are typically used to evacuate stranded passengers in the case of sudden failure of metro networks. A network efficiency accessibility index was proposed to measure network performance considering the emergency evacuation effect of bus connections on passengers after metro station failures. Based on the network efficiency accessibility index, a resilience evaluation model was constructed, and an optimal repair strategy aimed at maximizing resilience under multiple station failures was proposed. An example of a Shanghai metro network is studied. The results show that starting bus connections after a single-station failure can reduce the network performance loss by 5.1%. Starting bus connections after the failures of multiple stations, accounting for 2.14% of the total number of network stations, can reduce the network performance loss by 13.48%. In the case of multiple station failures, compared to repair sequences based on degree, betweenness, and vulnerability, the repair sequence based on resilience evaluation can reduce the cumulative loss of network performance by 2.86%. In addition, the study found that in the bus connection scenario, when multiple stations in the metro network fail, the stations with large passenger flow, sparse lines around the stations, large impact after failure, and short repair time should be

收稿日期: 2021-11-12 修回日期: 2022-03-11

第一作者: 崔欣, 男, 硕士, 从事轨道交通网络脆弱性、韧性与反脆弱性方面的科研工作, cxin@chd.edu.cn

通信作者: 路庆昌, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事交通网络建模与性能等方面的科研工作, qclu@chd.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71971029); 陕西省自然科学基金基础研究计划杰出青年基金项目(2021JC-28)

引用格式: 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]. 都市轨道交通, 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.

repaired first, which will help reduce the cumulative loss of network performance.

Keywords: urban rail transit; resilience evaluation; recovery strategy; bus connection; network performance; vulnerability

据统计,在2007—2018年期间中国内地35座城市轨道交通的突发事故数超过1911起,其中上海市轨道交通突发事故数约700起^[1]。地铁作为城市轨道交通的主要运营制式结构,地铁网络发生故障后往往导致部分地铁站点和运行区段服务关闭^[2]。对于非故障区段,地铁列车往往采用小交路的方式继续运行^[3]。对于故障区段,启动公交接驳是疏散滞留乘客、应对故障的常用策略^[4]。

当地铁网络中多个站点或区段同时发生故障后,修复策略的选择直接影响到修复时序方案的确定。在现有研究中,文献[5]提出了偏好修复策略或随机修复策略,偏好策略主要是基于节点的度、介数、紧密中心性等指标^[6]。文献[7]基于不同站点失效后网络脆弱性的大小对站点重要性进行排序,进而确定网络失效单元的修复序列。但是基于脆弱性的决策无法反映出网络性能随修复策略实施的动态变化,重大突发事件下网络脆弱性只能反映出网络性能到达最差时网络性能的损失程度,无法体现出网络性能的动态变化。因此,很多研究基于网络韧性确定网络失效单元的最优修复序列。韧性是指系统准备和适应外界变化、承受不利事件并从中快速恢复的能力^[8],可通过突发事件下网络性能的累积损失描述韧性损失。文献[9-10]将扰动事件下网络效率的累积损失作为韧性指标,基于韧性提出了多站点失效后不同站点的修复时序。但是基于网络拓扑效率的地铁网络韧性指标无法反映出地铁运营的交通特性。因此,文献[11]在网络拓扑效率的基础上,考虑交通线路客流量的影响,基于网络服务效率构建了韧性评估指标。文献[12]在构建韧性模型时,考虑了网络不同OD对之间的交通需求量和通行时间。文献[13]在构建轨道交通网络韧性评估模型时,考虑了突发事件的持续时间以及滞留乘客的疏散速度。

然而,当前基于网络韧性评估确定网络失效单元的修复序列研究中,少有研究考虑实际地铁站点失效后公交接驳对交通网络性能的影响以及乘客通过公交接驳紧急疏散这一特性。因此,本文在现有研究的基础上,对网络拓扑效率指标进行改进,考虑了交通网络中实际的运营客流和实际应急救援中公交接驳对乘客的紧急疏散作用,构建了考虑公交接驳的网络效率可达性指标;基于改进的网络效率可达性指标,构建了网络韧性评估模型。最后以上海市地铁网络为例,对不

同失效场景下网络单元的最优修复序列问题进行研究。

1 突发事件下地铁网络韧性评估模型及故障修复策略

1.1 问题描述与假设

地铁网络遭遇突发事件后,部分地铁站及运行区段服务关闭,因突发事件导致站点失效的地铁站称为故障站点,与故障站点直接相连的地铁区段称为故障区段,故障区段两端的站点称为折返站点,本文将公交接驳线路设置在折返站点之间,用于疏散在折返站点处滞留的乘客。故障区段以外的线路区段和站点称为运营区段和运营站点。地铁列车在运营区段以小交路的方式继续出行,即列车可以在折返站点掉头折返。

本文主要研究在公交接驳场景下,地铁网络中多个站点失效后,故障站点的修复时序问题。假设如下:

- 1) 站点发生突发故障失效后,列车将无法通过该故障站点。
- 2) 假设网络中发生重大突发事件后,立即启动公交接驳,与站点相连的故障区段通过公交接驳运输乘客,并在故障结束之后恢复运营。
- 3) 对于非换乘站点,站点修复时间为 Δt ;对于换乘站点,站点修复时间为 $x \times \Delta t$,其中 x 是指可在换乘站换乘的线路数。
- 4) 假设救援资源有限,网络中多个站点突发故障后,对失效站点进行逐个修复。

1.2 考虑公交接驳的地铁网络性能指标

本文对传统网络效率指标进行改进,考虑网络中不同站点之间的客流,提出网络效率可达性指标,反映了每位乘客从出发站点到达目的站点的平均难易程度,计算公式如下:

$$E_0 = \frac{1}{\sum_i^n \sum_j^{n-1} f_{ij}} \sum_i^n \sum_j^{n-1} \frac{f_{ij}}{t_{ij}} \quad (1)$$

式中: E_0 表示初始状态下网络未发生故障时网络效率可达性的大小; n 表示地铁网络中的站点数; f_{ij} 表示从站点 i 到站点 j 的客流量; t_{ij} 表示从站点 i 到站点 j 的时间阻抗; i 和 j 表示地铁网络中的站点。事件 a 下网络效率可达性 E_a 的计算公式如下:

$$E_a = \frac{1}{\sum_i^n \sum_j^{n-1} f_{ij}} \sum_i^n \sum_j^{n-1} \frac{f_{ij}}{t_{ij}^*} \quad (2)$$

式中: t_{ij}^* 表示网络受到破坏后从站点 i 到站点 j 的时间阻抗, 计算公式为

$$t_{ij}^* = \begin{cases} t_{ij} & \text{未受到失效影响的乘客} \\ \sigma(t_{ij}) & \text{选择地铁网络替代线路的乘客} \\ \rho(t_{ij}) & \text{选择公交接驳线路的乘客} \end{cases} \quad (3)$$

其中, 网络受到破坏后, 选择公交接驳线路的乘客的时间阻抗 $\rho(t_{ij})$ 可表示为

$$\rho(t_{ij}) = t_{ia}^{s_m} + \nabla t_{\bar{a}} + t_{\bar{a}a}^{s_p} + \Delta t_{\bar{a}} + t_{aj}^{s_m} \quad (4)$$

式中: $t_{ia}^{s_m}$ 表示从出发站 i 到故障站点的前一站(折返站点) \bar{a} 在地铁运营区段 s_m 花费的时间; $\nabla t_{\bar{a}}$ 表示从故障站点前一折返站点 \bar{a} 出站的时间; $t_{\bar{a}a}^{s_p}$ 表示在公交接驳线路 s_p 上花费的时间; $\Delta t_{\bar{a}}$ 表示从接驳公交下车进入地铁站 \bar{a} 的时间; $t_{aj}^{s_m}$ 表示从故障站点的下一折返站点 \bar{a} 到达目的站点 j 的时间; 公交接驳花费的时间 $t_{\bar{a}a}^{s_p}$ 为

$$t_{\bar{a}a}^{s_p} = \frac{\alpha \cdot d_{\bar{a}a}^{s_m}}{\beta \cdot v_{\bar{a}a}^{s_m}} \quad (5)$$

式中: α 表示从站点 \bar{a} 到站点 \bar{a} 的接驳公交线路长度与地铁线路长度之比; β 表示从站点 \bar{a} 到站点 \bar{a} 的接驳公交平均行驶速度与地铁平均行驶速度之比; $d_{\bar{a}a}^{s_m}$ 表示地铁网络中从站点 \bar{a} 到站点 \bar{a} 的实际距离; $v_{\bar{a}a}^{s_m}$ 表示在地铁网络中列车从站点 \bar{a} 到站点 \bar{a} 的行驶速度。事件 a 下地铁网络的脆弱性 V_a 可以根据轨道交通网络效率可达性的损失得到:

$$V_a = \frac{E_0 - E_a}{E_0} \quad (6)$$

1.3 基于网络韧性的故障修复策略

基于韧性评估的决策可以从时间维度为故障修复和网络性能恢复提供科学决策, 从而降低因突发事件对网络造成的性能损失, 突发事件下网络性能的变化如图 1 所示。

韧性量化指标 R 可以表示为

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_d} [E(t)] dt}{E_0 (t_d - t_0)} \quad (7)$$

式中: $E(t)$ 是指 t 时刻的网络性能, t_0 表示网络发生故

障的时间; t_d 表示网络故障修复完成的时间。如果网络中有 y 个站点失效, 将有 $y!$ 种修复序列, 通过求解不同修复序列下网络韧性最大值, 即可得到基于韧性评估的最优修复序列, 即:

$$\max_x R(x) = \frac{\sum_{r=1}^y (E(r-1) + E(r)) (t_r - t_{r-1})}{2E_0 (t_d - t_0)} \quad (8)$$

式中: $R(x)$ 表示修复序列 x 下网络的韧性; y 表示失效站点个数; $E(r)$ 表示第 r 阶段修复完成后 t_r 时刻的网络性能。

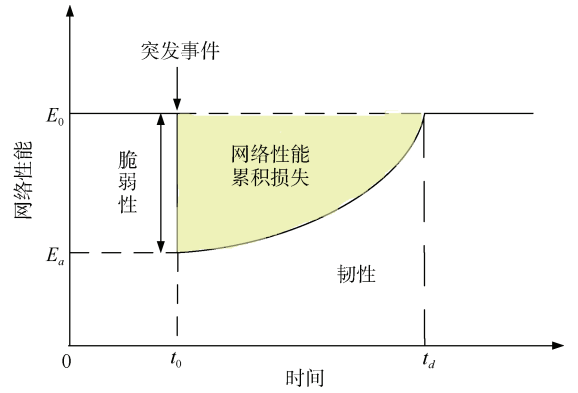


图 1 突发事件下交通网络性能变化
Figure 1 Changes in network performance under emergencies

最优修复序列的具体求解过程如下: ①根据式(1)计算出初始状态地铁网络未发生故障下网络效率可达性大小 E_0 ; ②明确故障发生时间 t_0 ; ③根据失效站点的类型和个数, 明确所有失效站点全部修复完成的时间 t_d ; ④根据第 r 阶段修复站点的类型明确所需要的修复时间 t_r , 同时根据式(2)计算出第 r 阶段修复完成后地铁网络性能; ⑤对不同修复序列下网络韧性值进行排序, 得到最优修复序列。

2 案例分析

2.1 上海市地铁网络

本文以上海市地铁网络为例, 采用空间 L 法进行网络建模, 如图 2 所示, 上海地铁网络共 281 个节点、14 条线路, 每个节点代表地铁网络中的站点, 每条边表示站点与站点之间的运营区段。

每个站点早高峰时段进出站的客流量大小如图 3 所示。通过对上海市地铁刷卡数据的处理和分析, 可以得到 OD 客流矩阵以及一年内不同地铁站点早高峰时段(7:00—9:30)进出站的平均客流量。进出站客流量最大的 6 个站点分别是徐家汇站(编号: 28)、人民广

场站(编号: 97)、上海火车站站(编号: 94)、陆家嘴站(编号: 232)、莘庄站(编号: 122)和陕西南路站(编号: 68)。

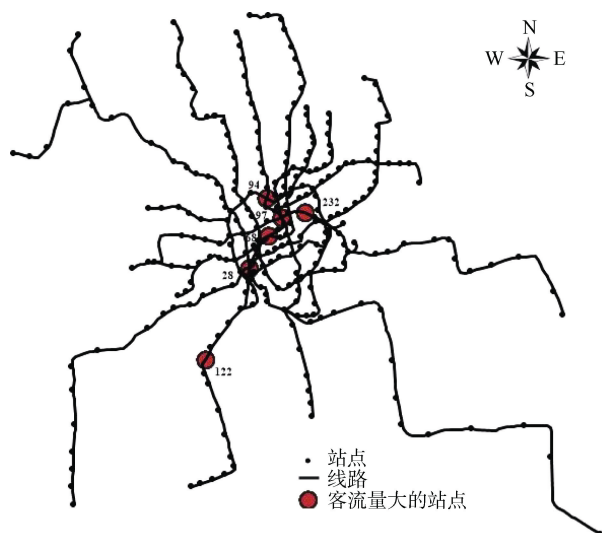


图2 上海市地铁网络

Figure 2 Shanghai Metro Network

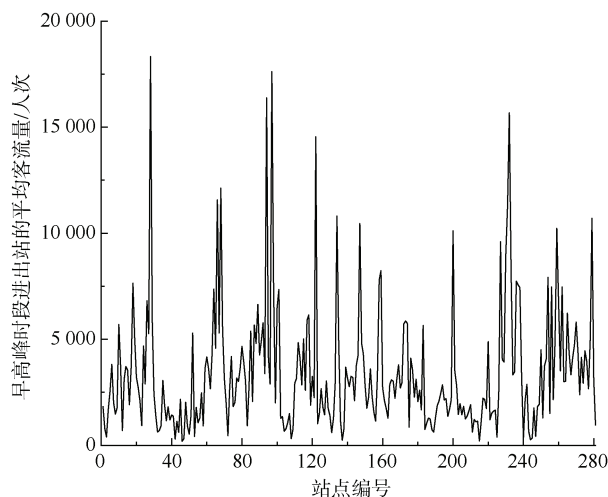


图3 早高峰期间不同站点客流量

Figure 3 Volume of passengers at different stations during morning peak hours

2.2 地铁网络性能分析

模拟进出站客流量最大的6个站点失效,如图4所示。由图4可以看出,通过启动公交接驳可以有效降低站点失效后网络效率可达性损失。

对于不同的失效站点,启动公交接驳对降低网络效率可达性损失不同。例如,上海火车站失效后,启动公交接驳,网络效率可达性损失可降低5.1%;但陕西南路失效后,启动公交接驳,网络效率可达性损失

仅降低1.91%。对于经过站点客流量越大、站点周边线路越稀疏的站点,启动公交接驳后对降低网络效率可达性损失的效果越显著。

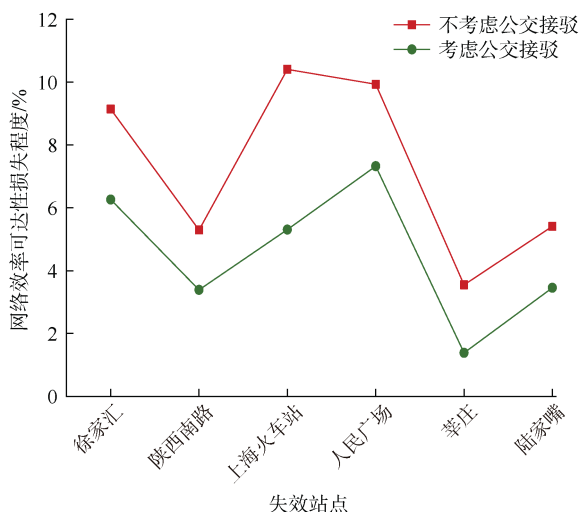


图4 单个站点失效场景下网络性能损失

Figure 4 Performance loss under single station failure

2.3 地铁网络韧性评估

公交接驳场景下,模拟上海市地铁网络中进出站客流量最大的6个站点失效,假设在救援资源有限条件下对站点进行逐个修复,那么共有720种修复序列,不同修复序列下网络韧性值如图5所示。

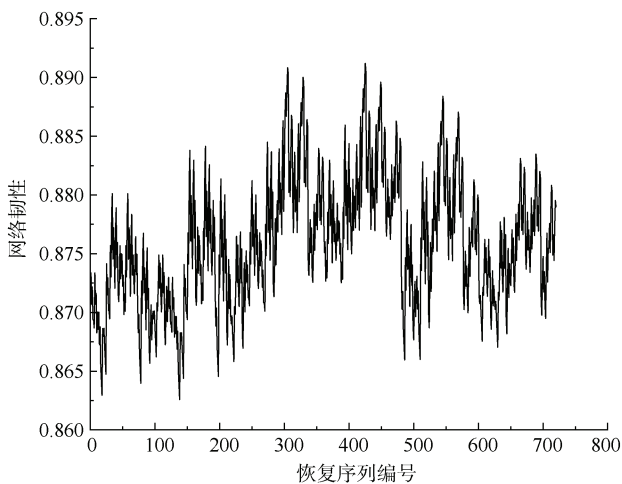


图5 不同修复序列下的网络韧性值

Figure 5 Resilience under different recovery sequences

由图5可以看出,基于不同的修复序列,得到的网络韧性值是不同的,同理,也可以得到不考虑公交接驳场景下,网络中进出站客流量最大的6个站点失效后,不同修复序列下网络性能的变化,如图6所示。

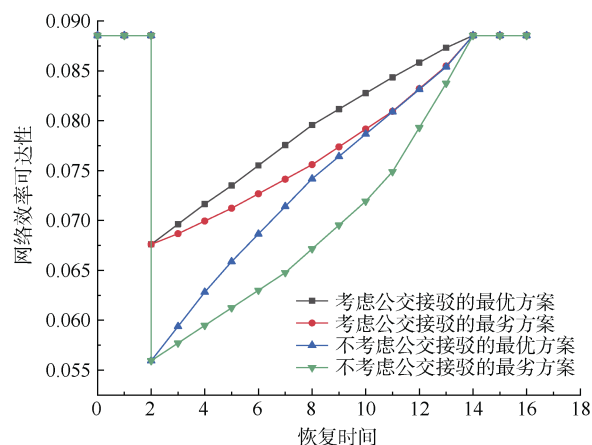


图6 多站点失效后公交接驳对网络性能恢复的影响
Figure 6 Impact of bus connection on network performance recovery under multiple stations failures

由图6可以看出,多个站点失效后启动公交接驳可以显著降低网络性能损失。在公交接驳场景下,基于最优修复序列的网络韧性值仅比基于最劣修复序列的网络韧性值高2.86%;不考虑公交接驳场景下,基于最优修复序列的网络韧性值要比基于最劣修复序列的网络韧性值高5.36%,这是因为不考虑公交接驳时,站点失效对网络性能损失的影响程度更大,因此采取不同的修复序列对网络韧性的影响更显著。

2.4 多站点失效场景下修复时序决策

公交接驳场景下,进出站客流量最大的6个站点失效后,将基于韧性评估的最优修复序列与4种偏好修复策略进行比较,如表1所示。

表1 不同修复策略下网络性能累积损失
Table 1 Cumulative loss of network performance under different recovery strategies

修复策略	修复序列	网络性能累积损失/%
基于韧性评估	94-232-97-28-68-122	10.9
基于站点进出站客流量	28-97-94-232-122-68	12.1
基于站点度	97-28-94-68-232-122	12.3
基于站点紧密中心性	97-68-28-94-232-122	12.9
基于站点介数中心性	97-28-68-94-232-122	12.6

由表1可以看出,基于站点客流量、度、紧密中心性以及介数中心性的偏好修复策略仅能得到次优修复方案,相比于基于韧性评估得到的最优修复序列,采取偏好修复策略对交通网络性能的累积损失更大。除了与偏好修复策略比较外,本文还将基于韧性评估

的最优修复序列与基于脆弱性评估的最优修复序列进行对比,如图7所示。

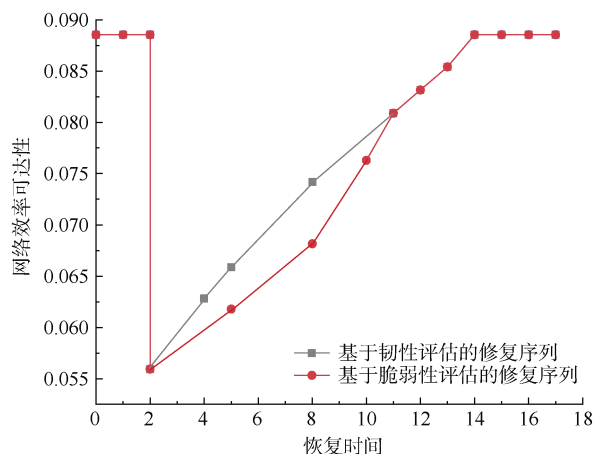


图7 不同修复序列下网络性能变化
Figure 7 Changes of network performance under different recovery sequences

由图7可以看出,相比基于韧性评估得到的最优修复序列(94-232-97-28-68-122),基于脆弱性评估得到的修复序列(97-28-94-232-68-122)下交通网络性能的累积损失更大。这是因为虽然站点97和站点28失效后造成的网络性能损失大,但所需要的修复时间长,相比之下,先修复造成网络性能损失大但修复时间短的站点94和站点232对网络性能恢复的效果更显著。考虑实际情况,多个站点失效后,不同站点的修复时间会存在差异,因此基于韧性评估得到的最优修复序列要优于基于脆弱性评估得到的修复序列。

3 结论

1) 地铁网络中单个站点失效后,通过启动公交接驳,网络效率可达性损失可降低5.1%;占网络站点总数2.14%的多个站点失效后,通过启动公交接驳网络效率可达性损失可降低13.48%。对于进出站和经过站点客流量大、周边线路稀疏的站点,启动公交接驳对降低网络性能损失的成效更显著。

2) 当失效站点所需的修复时间存在差异时,相比基于脆弱性评估的修复序列,基于韧性评估得到的修复序列下网络性能的累积损失更小;优先修复造成网络性能损失大但修复时间短的站点有助于网络性能的快速恢复。

3) 相比基于站点度、介数、紧密中心性和客流大小等偏好修复策略以及随机修复策略,公交接驳下多

个站点失效后基于韧性评估得到的最优修复序列可使网络性能累积损失降低 2.86%；在不考虑公交接驳场景下，基于韧性评估得到的最优修复序列可使网络性能累积损失降低 5.36%。

参考文献

- [1] 夏泽郁, 汤育春, 李启明. 基于韧性理论的中国城市轨道交通交通事故统计分析[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(3): 148-156.
XIA Zeyu, TANG Yuchun, LI Qiming. Statistical analysis of urban rail transit accidents in China based on resilience theory[J]. Urban rapid rail transit, 2020, 33(3): 148-156.
- [2] 王璞, 赵小龙, 谭淮锐, 等. 地铁突发故障下的公交接驳和客流管控协同模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(6): 1604-1612.
WANG Pu, ZHAO Xiaolong, TAN Huairui, et al. A coordinated model of bus bridging and passenger flow management and control in response to urban metro failure[J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18(6): 1604-1612.
- [3] WANG J D, YUAN Z Z, YIN Y H. Optimization of bus bridging service under unexpected metro disruptions with dynamic passenger flows[J]. Journal of Advanced Transportation, 2019, 2019: 6965728. [LinkOut]
- [4] PENDER B, CURRIE G, DELBOSC A, et al. Disruption recovery in passenger railways: International survey[J]. Transportation Research Record, 2013, 2253(1): 22-32.
- [5] 王正武, 周振宇, 胡静. 基于节点修复效果的故障路网修复策略[J]. 长沙理工大学学报, 2014, 11(4): 25-31.
WANG Zhengwu, ZHOU Zhenyu, HU Jing. Evacuation strategy for the failure road network based on the node evacuation effect[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology, 2014, 11(4): 25-31.
- [6] LÓPEZ F A, PÁEZ A, CARRASCO J A, et al. Vulnerability of nodes under controlled network topology and flow autocorrelation conditions[J]. Journal of Transport Geography, 2017, 59: 77-87.
- [7] 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.
- [8] 黄莺, 刘梦茹, 魏晋果, 等. 基于韧性曲线的城市地铁网络恢复策略研究[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 32-36.
HUANG Ying, LIU Mengru, WEI Jinguo, et al. Research on urban metro network recovery strategy based on resilience curve[J]. Journal of catastrophology, 2021, 36(1): 32-36.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 吕彪, 管心怡, 高自强. 地铁网络服务韧性评估与最优恢复策略[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 198-205.
LV Biao, GUAN Xinyi, GAO Ziqiang. Evaluation and optimal recovery strategy of metro network service resilience[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2021, 21(5): 198-205.
- [12] 李兆隆, 金淳, 胡畔, 等. 基于弹复性的交通网络应急恢复阶段策略优化[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(11): 2828-2841.
LI Zhaolong, JIN Chun, HU Pan, et al. Resilience-based recovery strategy optimization in emergency recovery phase for transportation networks[J]. Systems engineering-theory & practice, 2019, 39(11): 2828-2841.
- [13] LU Q C. Modeling network resilience of rail transit under operational incidents[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 117: 227-237.

(编辑: 王艳菊)