



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Transport Engineering—Review

## 认知城市轨道交通的韧性——概念、方法与趋势

魏运<sup>a</sup>, 杨欣<sup>b,\*</sup>, 肖晓<sup>c</sup>, 马智傲<sup>b</sup>, 朱天雷<sup>b</sup>, 豆飞<sup>a</sup>, 吴建军<sup>b</sup>, Anthony Chen<sup>d</sup>, 高自友<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Beijing Mass Transit Railway Operation Corporation Ltd., Beijing 100044, China

<sup>b</sup> School of Systems Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

<sup>c</sup> Traffic Control Technology Corporation Ltd., Beijing 100160, China

<sup>d</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 11 May 2023

Revised 15 October 2023

Accepted 18 January 2024

Available online 16 March 2024

#### 关键词

城市轨道交通

韧性评估

韧性提升

网络中断

### 摘要

随着城市轨道交通网络规模的扩大,研究城市轨道交通的韧性对于安全高效的运营至关重要。本文全面回顾了城市轨道交通的韧性,并指出未来研究的潜在趋势和方向。城市轨道交通的韧性由三个主要能力(吸收能力、抗毁能力和恢复能力)定义,以及具有四个属性(鲁棒性、脆弱性、快速性和冗余性)。然后,总结了城市轨道交通韧性的度量标准和评估方法。度量标准分为三类:基于拓扑、特征和性能,评估方法分为四类:拓扑、仿真、优化和数据驱动。对各种度量指标和评估方法的比较揭示了当前城市轨道交通韧性研究的趋势越来越倾向于将传统方法(如传统复杂网络分析和运营优化理论)与新技术(如大数据和智能计算技术)相结合,以准确评估城市轨道交通的韧性。最后,确定了未来研究的五个潜在趋势和方向:基于多源数据韧性分析、多种场景下的列车运行图优化、通过新技术精确响应乘客需求、客流与交通流的耦合优化以及最优线路设计。

© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

作为城市公共交通系统的重要组成部分,城市轨道交通具有安全、高效、运量大、准时、节能和环保的特点。它在缓解大城市交通拥堵方面发挥着非常关键的作用[1–3]。因此,近年来城市轨道交通系统得到了迅速发展。截至2023年6月30日,中国内地共有57个城市开通了295条城市轨道交通线路,运营里程达到10 566.55 km。这些轨道交通线路的总客流量达到了175.9亿人次。像北京、上海这样的特大城市,已经有超过800 km的城市轨

道交通线路投入运营,平均每天客流量超过1000万人次。然而,随着网络规模的扩大和交通强度的增加,在受干扰条件下运行的城市轨道交通系统将遇到许多问题,如列车晚点、区间客流突然增加、客流与车流衔接不足、部分线路段拥堵等[4–5],这些问题将对整个城市交通系统产生重要影响[6–8]。因此,研究城市轨道交通系统的韧性是至关重要的,这不仅可以增进对其固有运行机制的理解,还可以为改善未来城市轨道交通系统的韧性提供新的研究方向,确保特大城市的正常运行,避免大规模的交通中断。

为更好地解决这些问题,研究人员在城市轨道交通系

\* Corresponding author.

E-mail address: [11111047@bjtu.edu.cn](mailto:11111047@bjtu.edu.cn) (X. Yang).

2095-8099/© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2024, 41(10): 7–18

引用本文: Yun Wei, Xin Yang, Xiao Xiao, Zhao Ma, Tianlei Zhu, Fei Dou, Jianjun Wu, Anthony Chen, Ziyou Gao. Understanding the Resilience of Urban Rail Transit: Concepts, Reviews, and Trends. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.01.022>

统的韧性领域进行了许多研究。其主要内容包括：①增强城市轨道交通系统吸收干扰的能力；②在城市轨道交通系统性能下降后快速恢复的能力；③降低城市轨道交通系统在干扰情况下的脆弱性；④提高城市轨道交通系统的冗余性。大数据技术在韧性研究中得到了广泛应用[9–10]。上述研究工作对城市轨道交通系统韧性研究的进展具有重要意义，但目前的技术仍然难以涵盖所有内容。例如，在多种干扰情景下，需要进一步推动优化列车运行图以及优化客流和车流耦合。

在交通韧性方面，有几篇综述文章与本文的工作相关。在文献[11]中提供了对各种交通方式韧性的全面综述。在文献[12]中呈现了对交通系统脆弱性和韧性的综述。这些综述侧重于广泛的方面，涵盖了各种交通方式的韧性，但关于特定交通方式的韧性研究较少。在文献[13]中进行了铁路韧性的系统性综述。然而，很少有相关综述将主题局限于城市轨道交通领域。本文旨在确立城市轨道交通领域韧性的定义，并对当前研究状况和研究方法进行全面总结。

本研究提供了一种分类方法，并回顾了城市轨道交通系统韧性评估的指标和方法。本研究的主要贡献如下：首先，确立了城市轨道交通系统韧性的全面内涵，考虑了鲁棒性、脆弱性、快速性和冗余性等属性；其次，将韧性评估指标分为拓扑、特征和系统性能指标，评估方法分为拓扑、仿真、优化和数据驱动等类别；最后，总结了城市轨道交通系统韧性领域中的各种研究方法，并提出了几个未来研究方向。

本文的其余部分组织如下：第2节提供了城市轨道交通系统韧性的定义和四个特征；第3节全面回顾了韧性评估指标和方法，并根据现有研究的不足提出了几个未来研究方向；第4节总结并得出结论。

## 2. 如何定义城市轨道交通系统的韧性

韧性一词源自拉丁语“*resilire*”，意为在被压缩或破坏后重新弹回或恢复到原始状态[14]。后来，韧性研究被广泛应用于许多领域，如生态学、工程学和经济学。例如，Holling [15]将自然系统在应对自然或人为因素时的持续性视为生态系统的韧性。Mostert和Von Solms [16]提出了一种识别和确定计算机安全和韧性需求的技术。Farber [17]研究了国家政策和气候变化对经济韧性可持续性的影响。

随着韧性概念的延伸，学者们开始将基于韧性的思维应用于复杂的生态系统和城市。这主要涉及与气候变化和

灾害风险相关的问题，强调预防和减灾措施[18]。城市韧性指的是城市抵御灾害、减少损失并有效调配资源以快速恢复的能力。从长远来看，城市可以从过去的灾害中吸取教训，提高应对灾害的韧性[19]。

交通运输的韧性属于工程领域。根据各国交通管理部门的研究和实践，交通运输的韧性可以定义为能够预测和适应不断变化的自然环境、具有高可靠性和必要冗余性、能够承受和应对紧急情况，并能实现快速恢复的交通基础设施[12]。

韧性的一个被广泛接受的定义是：社会、经济或环境在有害情景或破坏发生时，迅速响应并组织资源的能力，其使系统能够保持基本功能和结构，并不断适应、学习和转变[20]。总的来说，在定义各个领域的韧性时，核心元素是系统的抵抗力和恢复力[21–22]。在不同的破坏阶段，系统必须展现出多样的能力来保持韧性。因此，这些能力是至关重要的，并应被视为韧性的组成部分。

### 2.1. 概念

城市轨道交通系统的韧性被定义为系统对扰动立即做出反应、吸收干扰（例如，运营中的日常变化）、减轻破坏损失（如自然灾害、设施故障或恐怖袭击）的能力，并通过合理配置资源快速恢复[23]。当额外资源足够时，它们可以被恢复到超常状态。

图1显示了城市轨道交通系统对韧性需求的情况。韧性的城市轨道交通系统主要体现在三个方面：①城市轨道交通系统对内部和外部干扰具有强大的吸收能力，即在受到干扰影响的情况下，系统可以保持一定水平的运行；②城市轨道交通系统对破坏和运营中断有坚实的抵抗力，导致破坏程度最低；③城市轨道交通系统在遭受破坏后具有强大的恢复能力，即在紧急情况或运营干扰的情况下，甚至在有额外资源的情况下，系统可以迅速恢复到初始或常规运行状态，甚至恢复到超常运行状态[24–26]。

在第一个方面，城市轨道交通网络倾向于依赖系统的冗余性来吸收干扰。例如，列车无法完全按照运行图精确运行。因此，在绘制运行图时通常会留出一定的时间冗余，这是确保城市轨道交通系统韧性的战略方式。第二个方面对应于发生重大干扰或事故的情况，导致城市轨道交通系统性能突然和显著地降低甚至中断。通常需要在短期内实施紧急措施来调节客流量。这能够降低对乘客的影响，并确保了城市轨道交通系统的韧性。最后一个方面是灾后的韧性。例如，如果城市轨道交通系统遭到地震破坏，那么在向公众开放之前，系统的所有部分都必须进行全面检修，而进行这种检修所需的时间和资源成本通常是

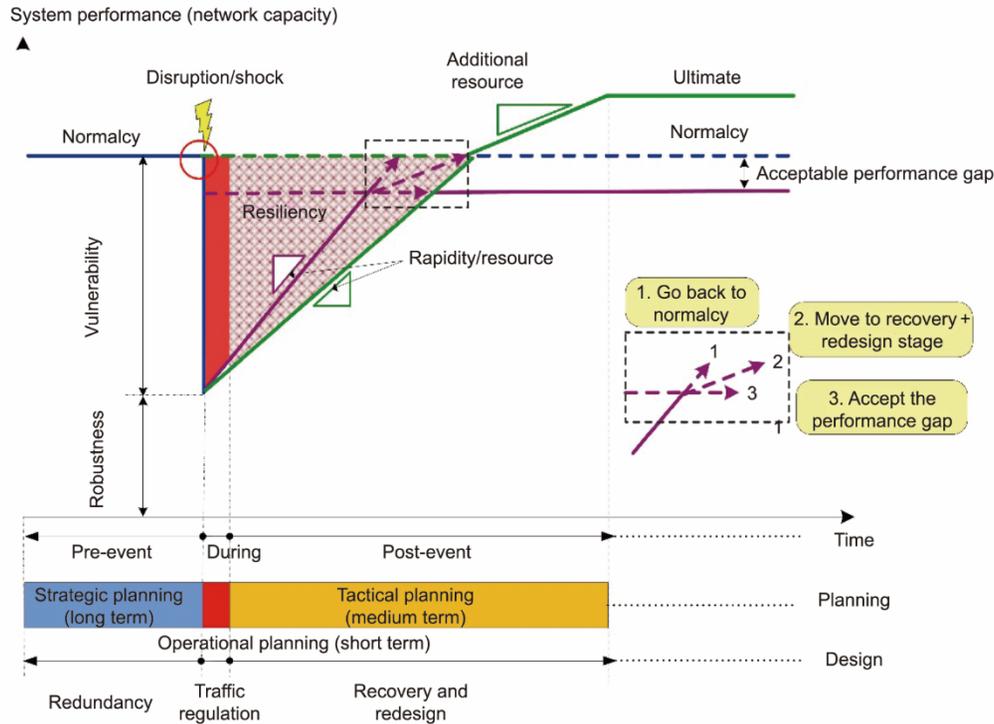


图1. 城市轨道交通韧性的概念。

衡量系统韧性的重要因素，这是确保城市轨道交通系统韧性的策略性手段。

## 2.2. 韧性特性

根据前面提出的城市轨道交通系统韧性定义，韧性特性总结为四个方面：鲁棒性、脆弱性、快速性和冗余性[27–29]。

- 鲁棒性：指城市轨道交通系统在运行过程中基于其容量吸收干扰的能力，即系统在发生干扰时能够维持运行的程度。

- 脆弱性：指城市轨道交通系统对干扰的敏感性，其特征在于由于风险而导致的后果程度或性能降级程度。

- 快速性：指城市轨道交通系统在发生干扰后的快速恢复能力。通过合理分配资源，城市轨道交通系统可以在发生中断后迅速恢复到特定的功能水平，甚至在额外资源充足时恢复到更高水平。

- 冗余性：指城市轨道交通系统中的关键设施具有备用模块。当发生干扰并且设施的某些功能受损时，备用模块可以及时补充，整个系统仍然可以在不完全瘫痪的情况下执行一定水平的功能。

## 3. 如何研究城市轨道交通的韧性

韧性研究可以分为两个主要部分：对先前工作的总结

和对未来研究的展望。韧性如何被研究？首先，有必要了解如何衡量城市轨道交通系统的韧性，重点关注所采用的评估指标和方法。因此，识别能够增强韧性的方法，特别是与乘客、列车和网络等关键系统组成部分相关的方法，是至关重要的。研究城市轨道交通韧性的一般框架如图2所示。为了便于阐述所研究的问题，将符号列在表1中。

### 3.1. 研究进展

在这一部分，总结了衡量城市轨道交通系统韧性的现有方法。首先，回顾了用于衡量城市轨道交通韧性提出的指标。接着，讨论了用于计算这些指标的代表性评估方法。

#### 3.1.1. 城市轨道交通系统韧性的评估指标

城市轨道交通网络韧性研究的现有指标可以广泛分类为：拓扑指标、特征指标和系统性能指标。

(1) 拓扑指标，如度、介数和最大连通子图的大小，主要用于衡量静态结构特性，反映了在受干扰情况下交通网络的连通性。拓扑分析源自复杂网络理论，可以为表征城市轨道交通系统韧性提供有效的逻辑基础[30]。Meng [31]等构建了城市轨道交通网络的Space-L模型，并通过计算各种拓扑统计指标来量化不同故障策略对网络韧性的影响。城市轨道交通网络具有明显的无标度特征。Zhang [32]等提出了一个评估大型复杂城市轨道交通网络韧性的

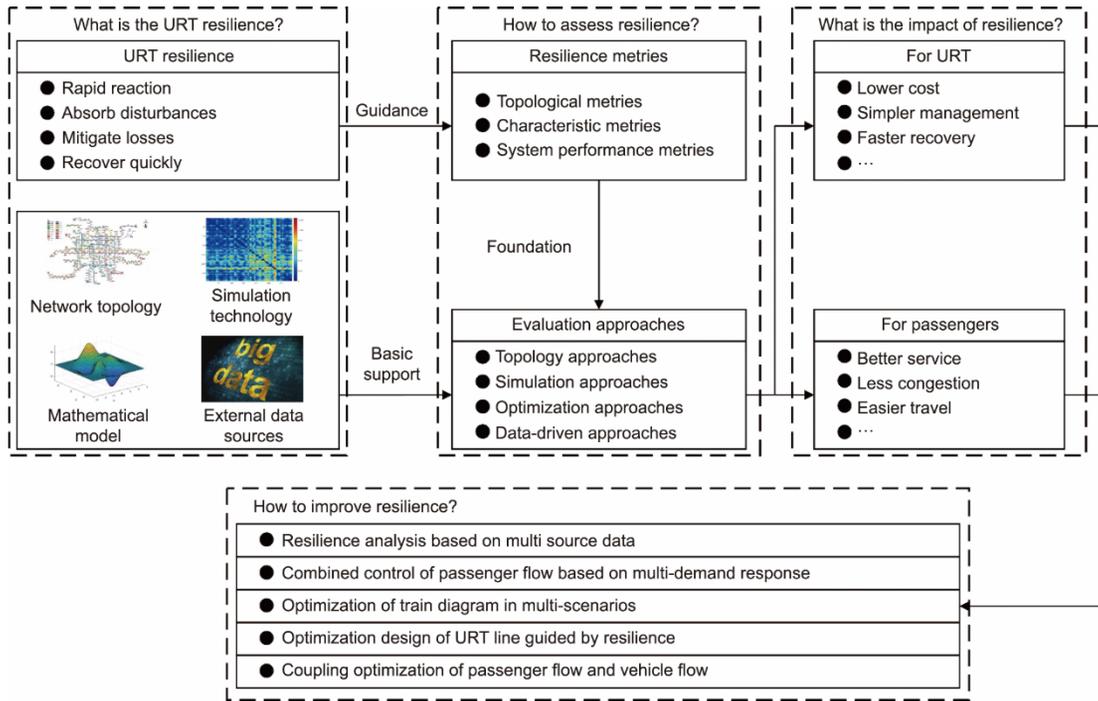


图2. 研究城市轨道交通韧性的一般框架。

通用框架，并提出了一种最佳恢复顺序的方法。对于上海城市轨道交通系统中受干扰站点的最佳修复时间进行了定量计算。文中提出的韧性评估指标用公式（1）表示，其中， $P(t)$ 表示时间的系统性能。表2 [31–34]列出了常见的网络拓扑指标及其定义。

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_h} [P(t)]dt}{(t_h - t_0)P_0} \quad (1)$$

尽管拓扑指标在一定程度上可以代表交通网络在受干扰情况下的规模 and 变化，但它们存在一定的片面性和局限性。例如，它忽略了受交通需求影响的实际供给能力，如客流量和出行时间[35]。因此，在后续研究中，拓扑通常被用作网络的基本指标，评估指标的多样性和丰富性进一步得到提高。

(2) 特征指标着重于衡量韧性表现的具体能力。这些属性中的每一个都对应于随时间变化的韧性度量，如鲁棒性、快速性或冗余性。例如，Derrible 和 Kennedy [36]将鲁棒性定义为在发生故障时提供替代路径的能力。在对33个地铁网络进行深入研究后，发现在城市轨道交通网络核心的外围建立新的换乘站有助于将网络聚类，并进一步提高其韧性。Zhang 等[37]提出了一个考虑路径距离和客流量的双加权脆弱性模型。所提出的韧性度量由公式（2）表示。

$$C = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \in V} \sum_{j \neq i} \frac{s_{ij}}{d_{ij}} \quad (2)$$

这是对传统网络效率公式的修改，其中， $C$ 表示网络连通性。研究发现，对于不同的故障程度和故障模式，网络韧性的变化存在显著差异。此外，对于维持网络可达性最为关键的车站，其并不一定与具有最高客流量或最大结构连通性的车站相吻合[38]。在评估网络恢复能力时，Li 等[39]将并行调度算法和用户均衡算法结合起来，设计了一个两层优化模型。城市轨道交通系统的韧性是从恢复结果和恢复过程两方面来衡量的，可以用公式（3）表示。

$$P = \sum_{i \in V} \frac{q_i}{\hat{q}} p_i \quad (3)$$

此外，常见的做法是通过与公交服务整合，来提高城市轨道交通系统的韧性，以帮助受损网络恢复其基本运行[40–42]。表3 [36–37,39–47]总结了常用的基于特征的城市轨道交通韧性评估指标。

(3) 系统性能指标，如延误时间、客流损失和旅行成本，主要用于响应城市轨道交通在干扰情景下的性能变化。从供给角度看，基于性能指标的研究侧重于列车延误和相关部门的经济成本。Zhang 和 Lo [48]建立了一个数学模型，基于地铁干扰持续时间的概率分布，使替代公交服务启动成本最小化。Li 等[49]在列车延误情景中仿真了客流量拥堵传播过程，并提出了旅行介数中心性（TBC）来衡量网络韧性。在对韧性进行全面评估时，作者结合了旅行介数中心性与延误时间和其他因素。

表1 符号总结

Symbols	Description
$V$	Set of all stations
$K_{ij}$	Set of effective travel paths from station $i$ to $j$
$\Omega$	Set of all origin-destination (OD) pairs
$\Psi$	Set of all trains
$R$	Network resilience
$P$	System performance
$P_0$	Initial performance in the presence of no disruption
$t_0$	Start time point of the disruption
$t_h$	End time point of the disruption
$C$	Network connectivity
$n$	Number of rail stations
$d_{ij}$	Shortest path length from station $i$ to $j$
$s_{ij}$	Normalized connection strength of station $i$ to $j$
$q_i$	Passenger flow for station $i$
$\hat{q}$	Sum of the passenger flow of all stations
$p_i$	Performance of station $i$
$v_{ij}$	Total number of passenger trips from stations $i$ to $j$
$w_{ij}$	Travel importance from station $i$ to $j$
$p_{ij}^k$	Probability of path $k$ being selected from station $i$ to $j$
$t_{ij}^k$	Tavel time on path $k$ from station $i$ to $j$
$\rho_{ij}$	Minimum generalized travel time from station $i$ to $j$
$\epsilon$	Coupling coefficient
$L$	Relative size of the largest component
$E$	Normal operational efficiency
$\tilde{E}$	Network operational efficiency when there are failed stations
$q_i^\omega$	Passenger flow with OD pair $\omega$ queueing at station $i$
$l_v^\omega$	Passenger flow with OD pair $\omega$ on-board in train $v$

基于灾害传播理论，Huang等[50]在不同事故情景下探讨了自我恢复能力与最终失败车站数量之间的关系。更

表2 城市轨道交通韧性的拓扑指标

Metrics	Definition	Ref.
Average node degree	Average value of degrees of all nodes in the network	[32]
Characteristic path length	Average value of the shortest path length of all node pairs	[33]
Betweenness centrality	The ratio of the shortest path through a node to all shortest paths	[31]
Size of giant component	Subnetworks with the maximum number of nodes	[34]
Network efficiency	Average of the inverse of the shortest paths length between all network nodes	[32]

表3 城市轨道交通韧性的特征指标

Metrics	Simple Connotation	Refs.
Robustness	Ability to absorb disturbance during the disturbance	[36,43]
Rapidity	Speed and ability to recover after the disruption	[39–42]
Redundancy	Ability to provide alternative resources in case of the disruption	[44–45]
Vulnerability	The extent of performance degradation after the disruption	[37,46]
Adaptability	Ability to self-learn and adjust to the disruption	[47]

多研究关注需求方，并探索以乘客为导向的旅行服务的韧性指标。其中，随时间变化的客流失[51]和干扰后乘客延误的旅行成本[52]是最常见的韧性评估指标。

Chen等[53]提出了一个系统韧性指标，可以反映乘客的路径选择行为和旅行时间，其可用公式（4）表示。

$$R = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \frac{v_{ij} w_{ij}}{\sum_{k \in K_{ij}} p_{ij}^k t_{ij}^k}, i \neq j \quad (4)$$

这一指标用于描述城市轨道交通系统在遭受攻击和修复过程中的表现曲线。它被称为韧性三角形，用于衡量累积性能损失。韧性三角形最初由Bruneau等[54]提出，如图1所示，系统性能在发生干扰时降至最低点，然后在一定条件下逐渐恢复。它能有效描述基础设施网络应对灾害事件的综合能力，这一理论也被用于衡量地铁受干扰后客流恢复水平[55]。Cong等[56]通过乘客进站时间识别受到非计划城市轨道交通干扰影响的乘客，并基于乘客延误时间评估不同的救援措施。此外，在疫情期间，路线可达性和选择多样性是评估城市轨道交通网络韧性的重要指标[57–58]。表4 [48–53,55–58]列出了文献中一些常见的系统性能指标。

与拓扑和特征指标相比，系统性能指标与韧性内涵更为密切相关，因此也被广泛采用。然而，在实际应用过程中，合理量化性能变化是确保科学结果的关键。Nagurney和Qiang [59]分别开发了综合成本指数，结合多个因素评估干扰对用户最优和系统最优条件下交通系统稳健性的影响。Zimmerman等[60]通过考虑各种实际因素评估了城市轨道交通网络在天气条件下的韧性。然而，在实践中，通常需要使用不同的评估指标来评估在不同极端天气或灾难场景下的韧性变化。

表4 城市轨道交通韧性的系统性能指标

Category	Metrics	Refs.
Supply side	Economic costs	[48]
	Train delays	[49–50]
Demand side	Generalized travel costs	[52–53]
	Route accessibility	[57–58]
	Affected passenger flow	[51,55–56]

### 3.1.2. 城市轨道交通系统韧性的评估方法

在这一小节中，讨论了计算韧性指标的几种评估方法。对于本研究，评估方法被分为四类：拓扑、仿真、优化和数据驱动。

(1) 拓扑方法：前进的基石。基于图论和复杂网络理论发展起来的拓扑方法是评估城市轨道交通系统韧性的最早被广泛采用的方法之一。城市轨道交通网络的拓扑构建方法包括 Space-L 和 Space-P。不同构建方法的含义和特征有所不同，如图3 [31]所示。这些模型是基于复杂网络模型建立的，用于分析城市轨道交通网络的特性。这种度量方法主要基于城市轨道交通网络的静态结构，通过计算网络的拓扑指标来评估其鲁棒性[36,61]、脆弱性[62]、韧性[32]和效率[63]。在一些研究中，它已被用于研究节点度分布和城市轨道交通网络的演变[23,64–65]。

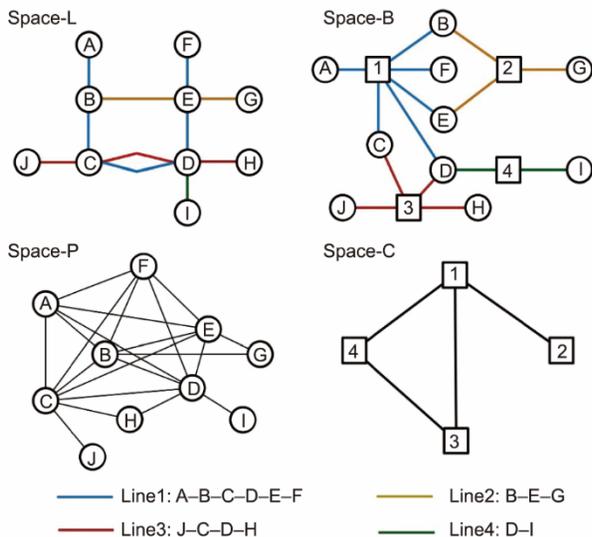


图3. 常见的拓扑网络构建方法[31]。

然而，当前观点通常认为，纯拓扑方法无法充分反映城市轨道交通系统的真实状态，其计算出的韧性指标与实际情况存在显著偏差。因此，为了更好地反映城市轨道交通系统的状态并计算其韧性，近期许多研究将拓扑和其他度量方法相结合；例如，为了评估城市轨道交通系统在随机故障和蓄意攻击下的效率，结合了拓扑和仿真分析来评

估网络性能的变化[66]。提出了基于网络拓扑的路径多样性指数和解决方案算法来评估车站的脆弱性[67]。提出了一种修改后的拓扑脆弱性分析方法，考虑了基于传统拓扑方法的广义旅行时间，用于评估城市轨道交通系统的韧性，如公式(5)所示[68]。

$$R = \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i,j \in V, i \neq j} \frac{1}{\rho_{ij}}, i \neq j \quad (5)$$

此外，为了更精确描述城市轨道交通系统内部的状态，许多研究提出了基于拓扑结构的更精细描述。例如，一项考虑交通约束的城市轨道交通系统拓扑异质性和脆弱性分析被提出[69]，以确定城市轨道交通系统的脆弱性；还有对车站或线路不同类型故障场景的仿真分析[70]；以及提出了一种综合耦合映射格用于评估加权城市轨道交通网络的車站状态和脆弱性[71]。

(2) 仿真模拟：思想的碰撞。根据文献综述发现，单独评估城市轨道交通系统网络的韧性具有挑战性，通常会采用基于属性或性能的网络评估指标。为了衡量系统的韧性，必须仿真一系列攻击。最常见的攻击模式包括蓄意和随机攻击。如果遭遇极端天气事件，如洪水或飓风，还会发生区域性损害。常见的仿真模式如图4所示。一般来说，蓄意和区域攻击对网络的影响要比随机攻击严重得多。

D'Lima 和 Medda [51]使用随机模型调查了伦敦地下的冲击扩散。Zhu 等[72]通过仿真验证了他们的广度树系数策略对增强城市轨道交通系统鲁棒性的有效性。Huang 等[50]使用五个评估因素和仿真方法分析了成都城市轨道交通系统中的级联故障。Cong 等[56]开发了一个多智能体仿真系统，用于估计城市轨道交通系统中非计划中断对乘客出行行为的影响。

此外，在一些研究中，仿真已经与其他方法结合使

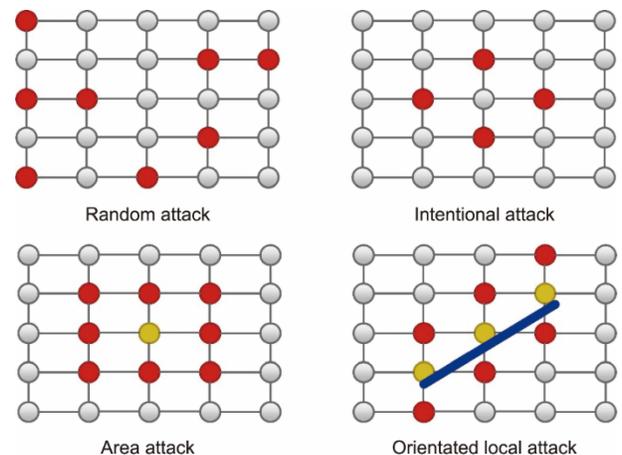


图4. 受到攻击的模式示例。

用。例如, Hassannayebi等[73]将仿真方法与优化技术相结合,旨在将乘客等待时间最小化作为优化目标。他们通过仿真评估了均匀发车间隔的时间表,并推导出抗干扰的列车时刻表。Fan等[74]使用线性阈值模型仿真了动态时间地铁网络的演变。鲁棒性指标由公式(6)给出。

$$R(t) = \varepsilon \cdot L + (1 - \varepsilon) \frac{E(t) - \tilde{E}(t)}{\max_{T \in \{t_1, t_2, t_3, \dots\}} \{E(T)\}} \quad (6)$$

式中,  $\max \{E(T)\}$ 代表不同时间下的最大运营效率。他们不仅考虑了静态网络结构,还有客流作为重要因素,并最终评估了网络的鲁棒性。

(3) 优化方法: 关键部分。优化方法通常专注于提高城市轨道交通系统的韧性或在特定灾难情景下恢复系统容量[75]。

Jin等[76]开发了一个两阶段随机规划模型,用于评估城市轨道交通网络的韧性,并优化整合本地公交服务与城市轨道交通系统。Chen等[77]提出了一个双层规划模型,通过最小化网络可达性[使用公式(7)]和最大化城市轨道交通系统的网络效率[使用公式(8)],来优化城市轨道交通网络的效率。

$$\min Z_1 = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} t_{ij} w_{ij}, i \neq j \quad (7)$$

$$\max Z_2 = \frac{\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K_y} \min(1/t_{ij}^k)}{n(n+1)}, i \neq j \quad (8)$$

另一方面,许多学者已经研究了在特定灾难情景下恢复城市轨道交通系统容量的问题。例如,城市轨道交通系统的恢复时间是不确定的(服务可能在较长时间内不可用),在适当的时机启用巴士服务而不是城市轨道交通系统至关重要。因此,提出了一种用于解决城市轨道交通系统故障的优化模型[48]。在车站中断的情况下,乘客重新分配通常是一个问题,使用流量分配方法来增强城市轨道交通网络抵御干扰的能力[78]。为了尽快恢复城市轨道交通系统的能力,提出了一种名为仿真修复策略的新修复策略,以在干扰后增强网络的韧性[77]。此外,多次干扰下进行最佳客流分配的问题在文献[55]中进行了研究,并由

公式(9)表示。

$$\min Z = \frac{\left( \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{i \in V} q_i^\omega + \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{v \in V} l_v^\omega \right)}{t_h - t_0} \quad (9)$$

此外,优化方法已被用于研究新城市轨道交通线路的布局[52]。表5总结了上述优化模型。

(4) 数据驱动方法。随着大数据技术的持续发展,数据驱动方法展示出越来越强大的能力。因此,这些方法已被应用于城市轨道交通系统韧性研究中。数据驱动方法基于大量历史乘客和交通流量数据[43],计算不同指标以确定系统在不同情景下的性能变化,从而帮助人们评估城市轨道交通系统的状态[79],并制定合理方法来提高城市轨道交通系统的韧性。

在许多交通网络研究中,由客流和车流组成的网络通常被称为动态交通网络。在城市轨道交通领域,最常用的动态交通网络是客流数据,通常来自自动收费系统,而列车运行信息可以从管理系统中获取[80–82]。在这篇文献综述中,发现了许多研究利用客流数据来检查城市轨道交通系统的脆弱性。例如,参考文献[83]评估了旧金山城市轨道交通系统的脆弱部分。Sun等[46]利用上海城市轨道交通系统的大量客流数据,分析了网络在遭受攻击时的脆弱性。Sun等[84]结合网络拓扑结构和客流数据,评估了北京城市轨道交通系统的脆弱性。Lu和Lin[38]利用客流数据分析了深圳多模式公共交通网络在城市轨道交通站点受到干扰时的脆弱性。Deng等[85]还通过访谈获取了南京地铁的定量数据,以评估城市轨道交通网络的脆弱性。

此外,数据驱动方法已被应用于城市轨道交通系统网络可靠性分析、评估网络韧性[86–87]、识别关键车站[57]以及评估城市轨道交通系统基础设施的韧性。这些研究中使用的数据来源列在表6[88]中。正如表6所示,研究人员的主要数据来源包括城市轨道交通系统运营商、政府统计数据 and 自动售票系统数据。

数据驱动方法使得能够探索大数据中固有的多样特征,从而有助于增强对城市轨道交通系统中列车运行、乘

表5 上述优化模型包含的目标函数和约束条件

Objective	Constraints	Ref.
Minimize total costs and operational disruptions	Timetabling; passengers; rolling stock	[75]
Maximize travel demand fulfillment rate	Budget; number of plans; travel demand; line capacity; station capacity	[76]
Maximize network accessibility and efficiency	Travel time; line capacity; network scale; station connectivity	[77]
Minimize total costs	Substitute bus service initiation time; URT service recovery time; substitute bus service capacity	[48]
Minimize passenger delays	Flow balance; capacity limit; accessibility; train operation	[55]
Minimize network vulnerability and maximize new ridership utility	Total construction costs	[52]

客出行和干扰事件等因素之间复杂非线性关系的理解[73, 89]。这为评估或增强城市轨道交通系统的韧性提供了一种新颖的视角和方法论。然而, 如果有多个数据源可用, 数据驱动方法可以进一步推动城市轨道交通系统韧性研究的发展。

### 3.2. 未来展望

现有的城市轨道交通系统韧性研究主要基于网络的物理拓扑结构, 很少考虑列车运行和客流信息等多源数据。在优化方面, 现有研究主要基于大量假设, 并应用传统的运筹学方法构建分阶段决策优化模型, 忽略了研究过程中的许多实际因素[90–91]。此外, 获得考虑乘客和车流的

全局最优解是困难的。因此, 结合人工智能、大数据和分布式计算等新技术与传统运筹学优化方法是至关重要的[92]。此外, 构建精确的耦合优化模型并为大规模问题设计有效算法, 在提高网络韧性方面起着关键作用[93–94]。以下总结了增强城市轨道交通系统韧性的五个方向, 图5和图6分别展示了技术路线图和具体实施方法。

(1) 基于多源数据的城市轨道交通系统韧性分析。Zhan等[95]从城市轨道交通网络拓扑结构、客流、列车时刻表和车辆参数的多源数据出发, 构建了一个考虑干扰前吸收能力、干扰期间抵抗破坏能力和干扰后恢复能力的多维城市轨道交通网络韧性评估系统。文献[96]还研究了事

表6 上述数据驱动方法中使用的数据信息

Data used	Data source	Ref.
Between 5:00 a.m. and 9:00 a.m., 256 958 passengers flow data	Provided by the operator	[43]
Daily commuting data	or government	[83]
Average daily OD trip matrix		[38]
Unexpected events in the Beijing URT network from 2013 to 2018		[87]
Passenger flow data from 06:00 a.m. to 01:00 a.m. (+1 day)		[88]
Between 7:45 a.m. and 8:00 p.m., within 8 weeks, passenger flow data	AFC data	[79]
The OD matrix of 16 September 2013, from 7:30 a.m. to 8:30 a.m., a total of 370414 raw records		[46]
Weekday morning peak (7:30–9:30 a.m.) within a week in August 2016		[84]
Peak hour OD data		[86]
Data of constructing rail transit network, passenger flow of rail transit station, OD passenger flow, and the spatial distribution data of epidemic		[57]
Face-to-face interviews in June 2015 and a special meeting held on July 2, 2015	Interview and meeting	[85]

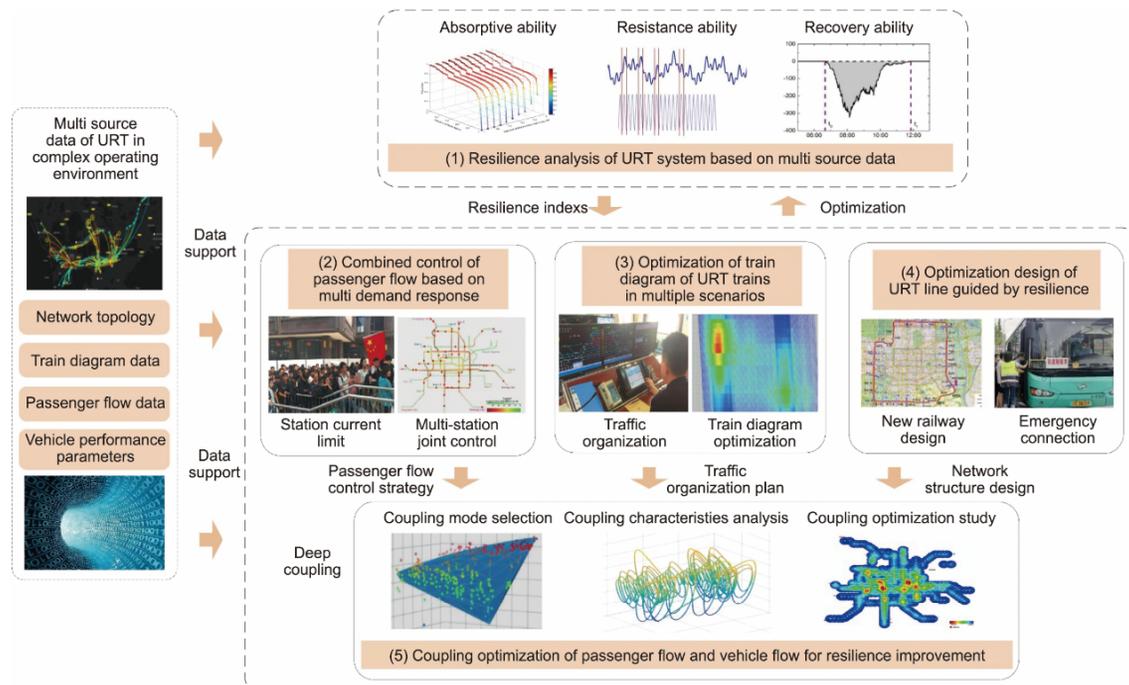


图5. 未来研究中如何提高韧性的技术路线图。

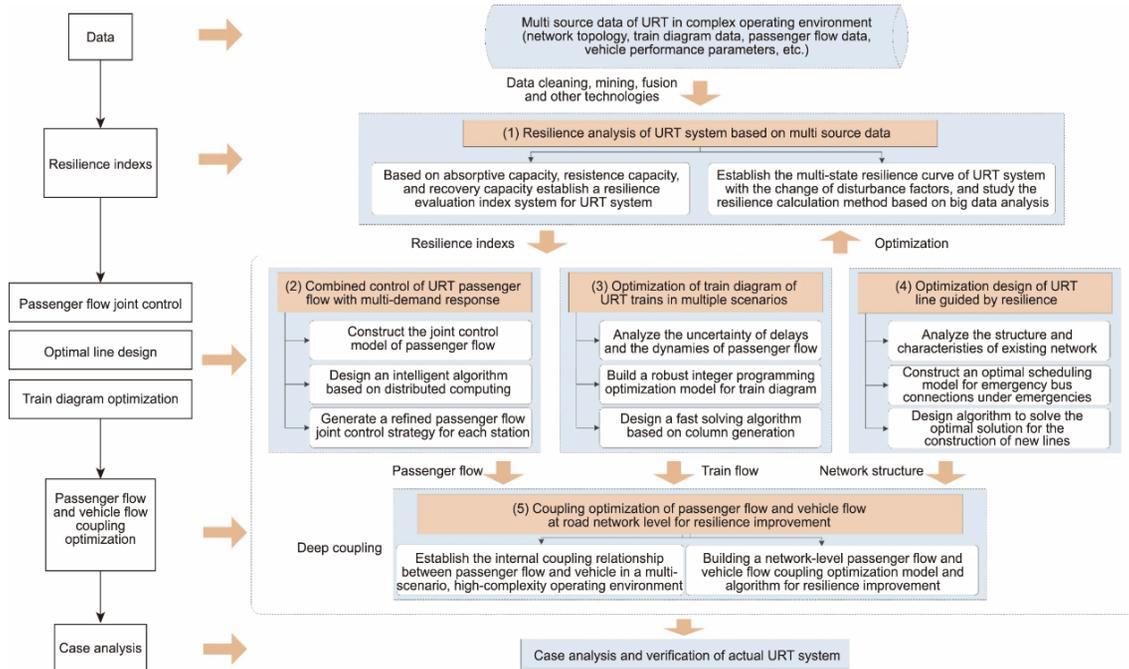


图6. 针对不同研究方向的具体实施方法。

件对城市轨道交通网络运营效率的影响，利用大量交通数据相关方法确定了城市轨道交通在不同干扰下的不同运行状态。考虑到干扰因素的变化，建立城市轨道交通系统的多状态韧性曲线，以审视网络中不同场景和时段之间的相关性和计算方法。分析和评估了城市轨道交通系统在多种场景和时段下的性能。

(2) 基于多需求的城市轨道交通网络客流组合控制。利用深度学习学习方法分析了拥挤期间各种客流入口场景以及点、线和网络的特征[93,97]。Lu等[98]结合不同拥挤场景下的运输能力和乘客个性化出行需求，建立了城市轨道交通客流控制优化模型。基于此，设计了基于分布式计算的高效智能解决方案算法。最终为每个车站生成了独特精细的联合网络交通控制最优解。此外，网络中多条线路和车站客流控制策略的智能联动[99]实现了快速客流疏散，提高了网络的承载能力[100]，确保城市轨道交通网络和车站的顺畅运行，并增强了城市轨道交通系统在各种需求时期抵御大客流干扰的能力。

(3) 优化多种场景下的城市轨道交通列车图。基于客流需求的动态演化特征和列车运行延误的不确定性，建立了针对高峰场景下列车时刻表的鲁棒优化模型[101–102]。考虑了城市轨道交通网络在末班车运营期间的客流需求、末班车连接网络的可达性以及乘客换乘等待时间等因素，建立了考虑随机干扰的末班车时刻表优化模型。通过这种方式，可以增强城市轨道交通系统在多种场景和时段下的抗干扰和恢复能力，实现列车运行和乘客出行效率的整体

提升[21,57,103]。

(4) 以抗灾能力为导向优化城市轨道交通线路。分析了现有城市交通复杂网络的结构和特征，并探讨了城市轨道交通系统与其他交通方式之间的耦合方向。建立韧性度量标准，定量评估网络乘客运输性能的变化，并设计了一种针对城市轨道交通事故情况下的应急摆渡巴士调度模型[76]。通过快速疏散受干扰影响的滞留乘客来增强网络的韧性[104]。重建交通网络，合理分配车辆资源，确保交通可持续性，并提高系统的恢复能力。改进城市轨道交通系统网络功能，设计启发式算法，解决具有最佳韧性的新线路建设方案[65]。促进城市轨道交通网络的跨线路运营，提高乘客出行效率，降低出行成本。这些额外的链接和线路有助于在干扰期间改善出行路径的冗余性。

(5) 城市轨道交通网络层面客流和车流耦合优化提升系统韧性。基于对高密度强时空相关环境下城市轨道交通网络客流的准确分析，结合多尺度客流出行规律、线网关联规则以及列车运行过程的复杂性和不确定性，全面考虑客流需求的动态性。随后，在多场景、高复杂度运行环境下建立交通和客流之间的内部耦合关系[105]。阐明城市轨道交通网络中客流的耗散和演化机制，研究城市轨道交通网络的静态凝聚组织和动态协同运行建模方法。随后，提出了针对不确定干扰场景下乘客-车辆流量协同管理机制，突破了车流分开管理的固有模式[106]。这确保了车流在高度复杂的运行环境中具有强大的吸收能力、抗破坏能力和恢复能力，以增强系统对运营干扰的应对能力。

## 4. 总结

本文对城市轨道交通系统韧性的研究进行了系统全面的回顾。文中从韧性定义的起源开始，介绍了不同领域对韧性的理解，然后阐述了城市轨道交通系统中韧性的含义。在本研究中，城市轨道交通系统的韧性被分为三个方面：①城市轨道交通系统吸收干扰的能力；②城市轨道交通系统抵抗干扰的能力；③城市轨道交通系统在干扰后恢复的能力。基于这三点，结合先前关于城市轨道交通系统韧性的研究结果，可以总结城市轨道交通系统韧性的四个属性：鲁棒性、脆弱性、快速性和冗余性。随后，回顾了用于城市轨道交通系统韧性的度量和计算方法，并将其分类为三类：拓扑、特征和系统性能。此外，这些度量的计算方法被归类为四种不同类型：拓扑、仿真、优化和数据驱动。最后，提出了未来研究的五个方向。本文为这一领域的研究人员提供了一个研究框架，也为与城市轨道交通系统韧性相关的未来工作提供了参考。对于类似研究领域，我们的工作提供了一些可以参考的经验，比如道路和铁路网络的韧性[107]。

现有的研究结果和正在进行的研究趋势表明，利用静态网络数据来计算用于评估网络韧性的拓扑指标的传统做法，已不再足以准确捕捉动态因素（如乘客和交通流量）对城市轨道交通系统的影响。因此，许多研究已将拓扑方法与其他方法相结合分析韧性，从而实现从静态拓扑到动态拓扑的过渡。基于仿真的技术提供了多种方法，已被用于研究在各种情景下的城市轨道交通系统韧性，包括干扰仿真和干扰后恢复策略仿真[108–109]。然而，更为成熟和快速发展的优化方法已被证明在解决城市轨道交通系统韧性领域中的高度复杂问题方面是有效的。值得注意的是，优化方法已被广泛应用于列车运行图优化、灾后恢复的最佳策略、公共交通系统的集成优化以及客流量分配优化。此外，信息技术的出现为研究人员提供了越来越多与城市轨道交通系统运营相关的历史数据，导致数据驱动方法在城市轨道交通系统韧性研究中的应用日益增多。通常，数据驱动方法与其他研究方法（如拓扑、仿真和优化）相结合，以获得对网络韧性更精确的评估，在实际场景中提高模型准确性，并为优化结果增加更大的可信度[110–112]。

增强城市轨道交通系统的韧性是一个综合性工程，包括韧性评估[113]、实际场景[114]的仿真以及系统韧性的优化[115]，这些方面密切相互关联。精确评估系统的韧性通常需要更精细和多样化的数据来源。准确评估城市轨道交通系统的韧性在识别网络中的关键车站和区段方面起

着至关重要的作用，并且是确立后续韧性增强目标的重要一步[116]。网络韧性的优化可以有效减轻城市轨道交通系统在干扰期间遭受的损失，减少乘客感知到的中断程度，提升乘客的满意度。在整个过程中，实际场景的仿真仍然至关重要，因为它不仅确保了韧性评估方法的准确性，还验证了韧性增强策略的有效性。因此，必须完善扰动场景，并根据预先制定的应急计划采取各种措施，如流量控制和车站封闭，以最小化干扰对城市轨道交通系统的影响[117]。

城市轨道交通系统的韧性已成为一个日益重要的研究方向，引起了许多研究人员的关注。本研究不仅完善了城市轨道交通系统运营的优化理论，还为在系统遭受破坏时的实际运营和快速处理提供了重要指导。当前的韧性评估指标已经尽可能接近现实，但现实与理论之间仍然存在差距。新的方法和技术正在被提出，现有的技术方法也在不断成熟。未来，结合各种方法可能会促进对城市轨道交通系统韧性的高效研究。

## 致谢

本研究受到国家自然科学基金(72288101、72331001、72071015)、香港特别行政区研究资助委员会(香港理工大学15222221)、111计划(B20071)和科学探索奖资助。

## Compliance with ethics guidelines

Yun Wei, Xin Yang, Xiao Xiao, Zhiao Ma, Tianlei Zhu, Fei Dou, Jianjun Wu, Anthony Chen, and Ziyou Gao declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Hayes S, Desha C, Burke M, Gibbs M, Chester M. Leveraging socio-ecological resilience theory to build climate resilience in transport infrastructure. *Transp Rev* 2019;39:677–99.
- [2] Cañavera-Herrera JS, Tang J, Nocht T, Schooling JM. On the relation between ‘resilience’ and ‘smartness’: A critical review. *Int J Disaster Risk Reduct* 2022;75:102970.
- [3] Lacinák M. Resilience of the Smart Transport System - Risks and Aims. *Transp Res Procedia* 2021;55:1635–40.
- [4] Hasselwander M, Tamagusko T, Bigotte JF, Ferreira A, Mejia A, Ferranti EJS. Building back better: The COVID-19 pandemic and transport policy implications for a developing megacity. *Sustain Cities Soc* 2021;69:102864.
- [5] Chakwizira J. Stretching resilience and adaptive transport systems capacity in South Africa: Imperfect or perfect attempts at closing COVID -19 policy and planning emergent gaps. *Transp Policy* 2022;125:127–50.
- [6] Wu Z, Zhang Y. Integrated Network Design and Demand Forecast for On-

- Demand Urban Air Mobility. *Engineering* 2021;7:473–87.
- [7] Cats O, Koppenol G-J, Warnier M. Robustness assessment of link capacity reduction for complex networks: Application for public transport systems. *Reliab Eng Syst Saf* 2017;167:544–53.
  - [8] Zeng Z, Wang S, Qu X. Consolidating Bus Charger Deployment and Fleet Management for Public Transit Electrification: A Life-Cycle Cost Analysis Framework. *Engineering* 2023;21:45–60.
  - [9] Mudigonda S, Ozbay K, Bartin B. Evaluating the resilience and recovery of public transit system using big data: Case study from New Jersey. *J Transp Saf Secur* 2019;11:491–519.
  - [10] Sinha KC, Labi S, Agbelie BRDK. Transportation infrastructure asset management in the new millennium: continuing issues, and emerging challenges and opportunities. *Transp Transp Sci* 2017;13:591–606.
  - [11] Zhou Y, Wang J, Yang H. Resilience of Transportation Systems: Concepts and Comprehensive Review. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2019;20:4262–76.
  - [12] Pan S, Yan H, He J, He Z. Vulnerability and resilience of transportation systems: A recent literature review. *Phys Stat Mech Its Appl* 2021;581:126235.
  - [13] Bešinović N. Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda. *Transp Rev* 2020;40:457–78.
  - [14] Weis-Fogh T. Thermodynamic properties of resilin, a rubber-like protein. *J Mol Biol* 1961;3:520–31.
  - [15] Holling CS. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annu Rev Ecol Syst* 1973;4:1–23.
  - [16] Mostert DNJ, Von Solms SH. A technique to include computer security, safety, and resilience requirements as part of the requirements specification. *J Syst Softw* 1995;31:45–53.
  - [17] Farber S. Economic resilience and economic policy. *Ecol Econ* 1995;15:105–7.
  - [18] Godschalk DR. Urban Hazard Mitigation: Creating Resilient Cities. *Nat Hazards Rev* 2003;4:136–43.
  - [19] Meerow S, Newell JP, Stults M. Defining urban resilience: A review. *Landsc Urban Plan* 2016;147:38–49.
  - [20] Alexander DE. Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 2013;13:2707–16.
  - [21] Twumasi-Boakye R, Sobanjo JO. A computational approach for evaluating post-disaster transportation network resilience. *Sustain Resilient Infrastruct* 2021;6: 235–51.
  - [22] Dimayuga PI, Galloway T, Widener MJ, Saxe S. Air transportation as a central component of remote community resilience in northern Ontario, Canada. *Sustain Resilient Infrastruct* 2022;7:624–37.
  - [23] Ma Z, Yang X, Wu J, Chen A, Wei Y, Gao Z. Measuring the resilience of an urban rail transit network: A multi-dimensional evaluation model. *Transp Policy* 2022;129:38–50.
  - [24] Kaviani A, Thompson RG, Rajabifard A. Improving regional road network resilience by optimised traffic guidance. *Transp Transp Sci* 2017;13:794–828.
  - [25] Achilloupolou DV, Mitoulis SA, Argyroudis SA, Wang Y. Monitoring of transport infrastructure exposed to multiple hazards: a roadmap for building resilience. *Sci Total Environ* 2020;746:141001.
  - [26] Azadeh A, Salehi V, Kianpour M. Performance evaluation of rail transportation systems by considering resilience engineering factors: Tehran railway electrification system. *Transp Lett* 2018;10:12–25.
  - [27] Fatorechi R, Miller-Hooks E. Measuring the Performance of Transportation Infrastructure Systems in Disasters: A Comprehensive Review. *J Infrastruct Syst* 2015;21:04014025.
  - [28] Reggiani A, Nijkamp P, Lanzi D. Transport resilience and vulnerability: The role of connectivity. *Transp Res Part Policy Pract* 2015;81:4–15.
  - [29] Serdar MZ, Koç M, Al-Ghamdi SG. Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods. *Sustain Cities Soc* 2022;76:103452.
  - [30] Mattsson L-G, Jenelius E. Vulnerability and resilience of transport systems - A discussion of recent research. *Transp Res Part Policy Pract* 2015;81:16–34.
  - [31] Meng Y, Tian X, Li Z, Zhou W, Zhou Z, Zhong M. Comparison analysis on complex topological network models of urban rail transit: A case study of Shenzhen Metro in China. *Phys Stat Mech Its Appl* 2020;559:125031.
  - [32] Zhang D, Du F, Huang H, Zhang F, Ayyub BM, Beer M. Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example. *Saf Sci* 2018;106: 230–43.
  - [33] Ma F, Liang Y, Yuen KF, Sun Q, Zhu Y, Wang Y, et al. Assessing the vulnerability of urban rail transit network under heavy air pollution: A dynamic vehicle restriction perspective. *Sustain Cities Soc* 2020;52:101851.
  - [34] Berche B, Von Ferber C, Holovatch T, YuHolovatch. Resilience of public transport networks against attacks. *Eur Phys J B* 2009;71:125–37.
  - [35] Liu M, Agarwal J, Blockley D. Vulnerability of road networks. *Civ Eng Environ Syst* 2016;33:147–75.
  - [36] Derrible S, Kennedy C. The complexity and robustness of metro networks. *Phys Stat Mech Its Appl* 2010;389:3678–91.
  - [37] Zhang Y, Ayyub BM, Saadat Y, Zhang D, Huang H. A double-weighted vulnerability assessment model for metrorail transit networks and its application in Shanghai metro. *Int J Crit Infrastruct Prot* 2020;29:100358.
  - [38] Lu Q-C, Lin S. Vulnerability Analysis of Urban Rail Transit Network within Multi-Modal Public Transport Networks. *Sustainability* 2019;11:2109.
  - [39] Li M, Hongwei, Wang H. Resiliency assessment of urban rail transit networks: A case study of Shanghai metro. 2017 IEEE 20th Int. Conf. Intell. Transp. Syst. ITSC, Yokohama: IEEE; 2017, p. 620–5.
  - [40] Chen Y, An K. Integrated optimization of bus bridging routes and timetables for rail disruptions. *Eur J Oper Res* 2021;295:484–98.
  - [41] Wang X, Jin JG, Sun L. Real-time dispatching of operating buses during unplanned disruptions to urban rail transit system. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2022;139:103696.
  - [42] Liu Z, Chen H, Liu E, Zhang Q. Evaluating the dynamic resilience of the multi-mode public transit network for sustainable transport. *J Clean Prod* 2022;348: 131350.
  - [43] De-Los-Santos A, Laporte G, Mesa JA, Perea F. Evaluating passenger robustness in a rail transit network. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2012;20: 34–46.
  - [44] Jing W, Xu X, Pu Y. Route redundancy-based approach to identify the critical stations in metro networks: A mean-excess probability measure. *Reliab Eng Syst Saf* 2020;204:107204.
  - [45] Xu X, Chen A, Jansuwan S, Yang C, Ryu S. Transportation network redundancy: Complementary measures and computational methods. *Transp Res Part B Methodol* 2018;114:68–85.
  - [46] Sun D, Zhao Y, Lu Q-C. Vulnerability Analysis of Urban Rail Transit Networks: A Case Study of Shanghai, China. *Sustainability* 2015;7:6919–36.
  - [47] Ying C, Chow AHF, Nguyen HTM, Chin K-S. Multi-agent deep reinforcement learning for adaptive coordinated metro service operations with flexible train composition. *Transp Res Part B Methodol* 2022;161:36–59.
  - [48] Zhang S, Lo HK. Metro disruption management: Optimal initiation time of substitute bus services under uncertain system recovery time. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2018;97:409–27.
  - [49] Li M, Zhou X, Wang Y, Jia L, An M. Modelling cascade dynamics of passenger flow congestion in urban rail transit network induced by train delay. *Alex Eng J* 2022;61:8797–807.
  - [50] Huang W, Zhou B, Yu Y, Sun H, Xu P. Using the disaster spreading theory to analyze the cascading failure of urban rail transit network. *Reliab Eng Syst Saf* 2021;215:107825.
  - [51] D’Lima M, Medda F. A new measure of resilience: An application to the London Underground. *Transp Res Part Policy Pract* 2015;81:35–46.
  - [52] Nian G, Chen F, Li Z, Zhu Y, Sun D (Jian). Evaluating the alignment of new metro line considering network vulnerability with passenger ridership. *Transp Res Part C* 2019;15:1402–18.
  - [53] Chen J, Liu J, Peng Q, Yin Y. Resilience assessment of an urban rail transit network: A case study of Chengdu subway. *Phys Stat Mech Its Appl* 2022;586: 126517.
  - [54] Bruneau M, Chang SE, Eguchi RT, Lee GC, O’Rourke TD, Reinhorn AM, et al. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthq Spectra* 2003;19:733–52.
  - [55] Tang J, Xu L, Luo C, Ng TSA. Multi-disruption resilience assessment of rail transit systems with optimized commuter flows. *Reliab Eng Syst Saf* 2021;214: 107715.
  - [56] Cong C, Li X, Yang S, Zhang Q, Lu L, Shi Y. Impact Estimation of Unplanned Urban Rail Disruptions on Public Transport Passengers: A Multi-Agent Based Simulation Approach. *Int J Environ Res Public Health* 2022;19:9052.
  - [57] Jia J, Chen Y, Wang Y, Li T, Li Y. A new global method for identifying urban rail transit key station during COVID-19: A case study of Beijing, China. *Phys Stat Mech Its Appl* 2021;565:125578.
  - [58] Hong L, Yan Y, Ouyang M, Tian H, He X. Vulnerability effects of passengers’ intermodal transfer distance preference and subway expansion on complementary urban public transportation systems. *Reliab Eng Syst Saf* 2017; 158:58–72.
  - [59] Nagurney A, Qiang Q. A relative total cost index for the evaluation of transportation network robustness in the presence of degradable links and alternative travel behavior. *Int Trans Oper Res* 2009;16:49–67.
  - [60] Zimmerman R, Restrepo CE, Sellers J, Amirapu A, Pearson TR, Kates HB. Multimodal Transit Connectivity for Flexibility in Extreme Events. *Transp Res Rec J Transp Res Board* 2015;2532:64–73.

- [61] Frutos Bernal E, Martín Del Rey A. Study of the Structural and Robustness Characteristics of Madrid Metro Network. *Sustainability* 2019;11:3486.
- [62] Wu Z, Sun J, Xu R. Calculating vulnerability index of urban metro systems based on satisfied route. *Phys Stat Mech Its Appl* 2019;531:121722.
- [63] Qiao K, Zhao P, Yao X. Performance Analysis of Urban Rail Transit Network. *J Transp Syst Eng Inf Technol* 2012;12:115–21.
- [64] Angeloudis P, Fisk D. Large subway systems as complex networks. *Phys Stat Mech Its Appl* 2006;367:553–8.
- [65] Chan H-Y, Chen A, Li G, Xu X, Lam W. Evaluating the value of new metro lines using route diversity measures: The case of Hong Kong's Mass Transit Railway system. *J Transp Geogr* 2021;91:102945.
- [66] Yang Y, Liu Y, Zhou M, Li F, Sun C. Robustness assessment of urban rail transit based on complex network theory: A case study of the Beijing Subway. *Saf Sci* 2015;79:149–62.
- [67] Yang X, Chen A, Ning B, Tang T. Measuring Route Diversity for Urban Rail Transit Networks: A Case Study of the Beijing Metro Network. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2017;18:259–68.
- [68] Cai H, Zhu J, Yang C, Fan W, Xu T. Vulnerability Analysis of Metro Network Incorporating Flow Impact and Capacity Constraint after a Disaster. *J Urban Plan Dev* 2017;143:04016031.
- [69] Xiao X, Jia L, Wang Y, Zhang C. Topological characteristics of metro networks based on transfer constraint. *Phys Stat Mech Its Appl* 2019;532:121811.
- [70] Cats O, Krishnakumari P. Metropolitan rail network robustness. *Phys Stat Mech Its Appl* 2020;549:124317.
- [71] Zhang J, Che H, Chen F, Ma W, He Z. Short-term origin-destination demand prediction in urban rail transit systems: A channel-wise attentive split-convolutional neural network method. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2021; 124:102928.
- [72] Zhu W, Liu K, Wang M, Yan X. Enhancing robustness of metro networks using strategic defense. *Phys Stat Mech Its Appl* 2018;503:1081–91.
- [73] Hassannayebi E, Sajedinejad A, Mardani S. Urban rail transit planning using a two-stage simulation-based optimization approach. *Simul Model Pract Theory* 2014;49:151–66.
- [74] Fan Y, Zhang F, Jiang S, Gao C, Du Z, Wang Z, et al. Dynamic Robustness Analysis for Subway Network With Spatiotemporal Characteristic of Passenger Flow. *IEEE Access* 2020;8:45544–55.
- [75] Cadarso L, Marín Á, Maróti G. Recovery of disruptions in rapid transit networks. *Transp Res Part E Logist Transp Rev* 2013;53:15–33.
- [76] Jin JG, Tang LC, Sun L, Lee D-H. Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services. *Transp Res Part E Logist Transp Rev* 2014;63:17–30.
- [77] Chen J, Liu J, Peng Q, Yin Y. Strategies to Enhance the Resilience of an Urban Rail Transit Network. *Transp Res Rec J Transp Res Board* 2022;2676:342–54.
- [78] Shen Y, Ren G, Ran B. Cascading failure analysis and robustness optimization of metro networks based on coupled map lattices: a case study of Nanjing, China. *Transportation* 2021;48:537–53.
- [79] Sun H, Wu J, Wu L, Yan X, Gao Z. Estimating the influence of common disruptions on urban rail transit networks. *Transp Res Part Policy Pract* 2016;94: 62–75.
- [80] Li D, Fu B, Wang Y, Lu G, Berezin Y, Stanley HE, et al. Percolation transition in dynamical traffic network with evolving critical bottlenecks. *Proc Natl Acad Sci* 2015;112:669–72.
- [81] Zeng G, Li D, Guo S, Gao L, Gao Z, Stanley HE, et al. Switch between critical percolation modes in city traffic dynamics. *Proc Natl Acad Sci* 2019;116:23–8.
- [82] Zeng G, Gao J, Shekhtman L, Guo S, Lv W, Wu J, et al. Multiple metastable network states in urban traffic. *Proc Natl Acad Sci* 2020;117:17528–34.
- [83] Wang J, Li Y, Liu J, He K, Wang P. Vulnerability Analysis and Passenger Source Prediction in Urban Rail Transit Networks. *PLOS ONE* 2013;8:8.
- [84] Sun L, Huang Y, Chen Y, Yao L. Vulnerability assessment of urban rail transit based on multi-static weighted method in Beijing, China. *Transp Res Part Policy Pract* 2018;108:12–24.
- [85] Deng Y, Li Q, Lu Y. A research on subway physical vulnerability based on network theory and FMECA. *Saf Sci* 2015;80:127–34.
- [86] Lu Q-C. Modeling network resilience of rail transit under operational incidents. *Transp Res Part Policy Pract* 2018;117:227–37.
- [87] Yin J, Ren X, Liu R, Tang T, Su S. Quantitative analysis for resilience-based urban rail systems: A hybrid knowledge-based and data-driven approach. *Reliab Eng Syst Saf* 2022;219:108183.
- [88] Xu Z, Chopra SS. Network-based Assessment of Metro Infrastructure with a Spatial-temporal Resilience Cycle Framework. *Reliab Eng Syst Saf* 2022;223: 108434.
- [89] Müller-Hannemann M, Rückert R, Schiewe A, Schöbel A. Estimating the robustness of public transport schedules using machine learning. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2022;137:103566.
- [90] Yan L, Si-Rui N, Yue G, Cai-Hua Z, Duo L. Detection and analysis of transfer time in urban rail transit system using WIFI data. *Transp Lett* 2023;15:634–44.
- [91] Leurent F, Xie X. Exploiting smartcard data to estimate distributions of passengers' walking speed and distances along an urban rail transit line. *Transp Res Procedia* 2017;22:45–54.
- [92] Esposito Amideo A, Starita S, Scaparra MP. Assessing Protection Strategies for Urban Rail Transit Systems: A Case-Study on the Central London Underground. *Sustainability* 2019;11:6322.
- [93] Yang X, Xue Q, Ding M, Wu J, Gao Z. Short-term prediction of passenger volume for urban rail systems: A deep learning approach based on smart-card data. *Int J Prod Econ* 2021;231:107920.
- [94] Zhang J, Wang Z, Wang S, Shao W, Zhao X, Liu W. Vulnerability assessments of weighted urban rail transit networks with integrated coupled map lattices. *Reliab Eng Syst Saf* 2021;214:107707.
- [95] Zhan Q, Jia Y, Zheng Z, Zhang Q, Luo L. Associations of land use around rail transit stations with jobs-housing distribution of rail commuters from smart-card data. *Geo-Spat Inf Sci* 2023;26:346–61.
- [96] Li D, Zhang T, Dong X, Yin Y, Cao J. Trade-off between efficiency and fairness in timetabling on a single urban rail transit line under time-dependent demand condition. *Transp B Transp Dyn* 2019;7:1203–31.
- [97] He Y, Zhao Y, Tsui K-L. Short-term forecasting of origin-destination matrix in transit system via a deep learning approach. *Transp Transp Sci* 2023; 19: 2033348.
- [98] Lu Y, Yang L, Yang K, Gao Z, Zhou H, Meng F, et al. A Distributionally Robust Optimization Method for Passenger Flow Control Strategy and Train Scheduling on an Urban Rail Transit Line. *Engineering* 2022;12:202–20.
- [99] Saidi S, Wirasinghe SC, Kattan L, Esmailnejad S. A generalized framework for complex urban rail transit network analysis. *Transp Transp Sci* 2017; 13: 874–92.
- [100] Jin H, Chen S, Ran X, Liu G, Liu S. Column generation-based optimum crew scheduling incorporating network representation for urban rail transit systems. *Comput Ind Eng* 2022;169:108155.
- [101] Cao Z, (Avi)Ceder A, Li D, Zhang S. Robust and optimized urban rail timetabling using a marshaling plan and skip-stop operation. *Transp Transp Sci* 2020;16:1217–49.
- [102] Zhu L, Li S, Hu Y, Jia B. Robust collaborative optimization for train timetabling and short-turning strategy in urban rail transit systems. *Transp B Transp Dyn* 2023;11:147–73.
- [103] Vishnu N, Kameshwar S, Padgett JE. Road transportation network hazard sustainability and resilience: correlations and comparisons. *Struct Infrastruct Eng* 2021;19:345–65.
- [104] Jin JG, Teo KM, Odoni AR. Optimizing Bus Bridging Services in Response to Disruptions of Urban Transit Rail Networks. *Transp Sci* 2016;50:790–804.
- [105] Shang P, Yang L, Yao Y, (Carol) Tong L, Yang S, Mi X. Integrated optimization model for hierarchical service network design and passenger assignment in an urban rail transit network: A Lagrangian duality reformulation and an iterative layered optimization framework based on forward-passing and backpropagation. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2022;144:103877.
- [106] Zhang P, Yang X, Wu J, Sun H, Wei Y, Gao Z. Coupling analysis of passenger and train flows for a large-scale urban rail transit system. *Front Eng Manag* 2023;10:250–61.
- [107] Nieves-Meléndez ME, De La Garza JM. Resilience frameworks instantiated to vehicular traffic applications. *Sustain Resilient Infrastruct* 2017;2:75–85.
- [108] Bešinović N, Ferrari Nassar R, Szymula C. Resilience assessment of railway networks: Combining infrastructure restoration and transport management. *Reliab Eng Syst Saf* 2022;224:108538.
- [109] Somy S, Shafaei R, Ramezani R. Resilience-based mathematical model to restore disrupted road-bridge transportation networks. *Struct Infrastruct Eng* 2022;18:1334–49.
- [110] Aparicio JT, Arsenio E, Henriques R. Assessing robustness in multimodal transportation systems: a case study in Lisbon. *Eur Transp Res Rev* 2022;14:28.
- [111] Malandri C, Mantecchini L, Postorino MN. A comprehensive approach to assess transportation system resilience towards disruptive events. Case study on airside airport systems. *Transp Policy* 2023;139:109–22.
- [112] Markolf SA, Hoehne C, Fraser A, Chester MV, Underwood BS. Transportation resilience to climate change and extreme weather events - Beyond risk and robustness. *Transp Policy* 2019;74:174–86.
- [113] Kizhakkedath A, Tai K. Vulnerability analysis of critical infrastructure network. *Int J Crit Infrastruct Prot* 2021;35:100472.
- [114] Borowski E, Soria J, Schofer J, Stathopoulos A. Does ridesourcing respond to

- unplanned rail disruptions? A natural experiment analysis of mobility resilience and disparity. *Cities* 2023;140:104439.
- [115] Hassannayebi E, Zegordi SH, Amin-Naseri MR, Yaghini M. Train timetabling at rapid rail transit lines: a robust multi-objective stochastic programming approach. *Oper Res* 2017;17:435–77.
- [116] Van Wee B. Accessible accessibility research challenges. *J Transp Geogr* 2016; 51:9–16.
- [117] Ingvardson JB, Nielsen OA. How urban density, network topology and socio-economy influence public transport ridership: Empirical evidence from 48 European metropolitan areas. *J Transp Geogr* 2018;72:50–63.