

交通运输网络韧性研究现状及展望

张玉召^{1,2}, 丁欣茹¹, 侯长啸¹, 陈虎林³

(1. 兰州交通大学 交通运输学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室, 兰州 730070; 3. 中国铁路兰州局集团有限公司 科技和信息化部, 兰州 730000)

摘要:为厘清交通运输网络韧性的研究脉络,对国内外相关研究进行了系统综述。在网络模型构建上,总结了单一和多种运输方式网络建模方法;针对交通运输网络韧性评估,梳理了基于网络指标、基于网络性能、基于仿真模拟和基于数据驱动的韧性评估方法;针对韧性提升策略,从预防策略、应急策略和恢复策略3个方面总结了交通网络韧性提升措施并归纳了常用的优化模型及算法。最后,对交通运输网络韧性的研究现状进行评述并提出了该领域的未来研究方向。

关键词:交通运输系统工程;交通运输网络;研究综述;韧性评估;韧性提升

中图分类号:U113 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)03-0585-18

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250385

Research status and prospects of resilience for transportation networks

ZHANG Yu-zhao^{1,2}, DING Xin-ru¹, HOU Chang-xiao¹, CHEN Hu-lin³

(1. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Department of Science and Information Technology, China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to clarify the research context of transportation network resilience, a systematic review of domestic and international studies was provided, covering three key dimensions: network modeling, resilience assessment, and enhancement strategies. For network model construction, modeling methods for single-mode and multimodal transport networks were analyzed. Regarding the resilience assessment for transportation networks, a resilience assessment indicator system was sorted out, consisting of network topology indicators, operation indicators and attribute indicators. And four resilience assessment methods were summarized, including network indicator analysis, network performance curve evaluation, simulation modeling and data-driven techniques. Concerning resilience enhancement strategies, enhancement measures were systematically categorized into prevention, emergency response, and recovery strategies,

收稿日期:2025-04-30.

基金项目:国家自然科学基金项目(52462047, 72461018);中国铁路兰州局集团有限公司科技发展计划项目(2025018, 2025021);宜宾智慧物流研究院重点项目(YW2024ZD06).

作者简介:张玉召(1981-),男,教授,博士.研究方向:轨道交通组织与优化,客货运技术与管理.

E-mail: zhangyuzhao-81@mail.lzjtu.cn

with corresponding optimization models and algorithms summarized. Finally, the current research status of transportation network resilience was reviewed and the further research directions in this field were proposed in terms of specific disruption scenario simulation, resilience optimization strategies and multimodal transport network resilience.

Key words: engineering of communications and transportation system; transportation networks; research review; resilience assessment; resilience improvement

0 引言

交通运输系统是服务居民出行、开展货物运输的重要载体,也是保障社会发展的重要支撑。然而,现实中交通运输系统可能随时面临着自然灾害、极端天气、社会公共安全和设备故障等各种突发事件的干扰,导致交通网络站点或线路中断、系统功能部分失效或崩溃,进而引发整个网络大规模崩溃,造成不可估量的社会经济损失。如何提升交通网络性能,减轻干扰事件对网络的影响,保障网络从干扰事件中快速恢复是当前相关领域的重要研究课题。《国家综合立体交通网规划纲要》^[1]明确指出:我国交通运输发展中,互联互通和网络韧性还需增强;到 2035 年,要显著提升交通网络韧性和应对各类重大风险的能力。

在交通网络中,韧性指系统面对干扰能够抵抗、适应,吸收中断后果维持正常功能水平,并从冲击中恢复的能力^[2]。针对交通运输网络韧性的研究主要围绕网络建模、级联失效仿真、韧性评估以及韧性提升等方面。交通运输网络包括多种运输方式,目前相关研究^[3]和综述^[4,5]多集中于单一运输方式,但单一和多种运输方式在网络模型构建上有明显差异,不同运输方式在韧性指标选取上也有所不同。此外,干扰和失效场景模拟是韧性研究的重要环节,但既有综述在这方面考虑较少。从网络的物理基础和对网络的使用行为两方面,可以划分出不同的韧性评估指标以及不同阶段的韧性提升策略。因此,有必要对相关研究进行系统梳理,总结内在规律和体系框架。

本文旨在厘清交通运输网络韧性的主要研究内容、研究热点,分析当前研究存在的主要问题和未来发展趋势。首先,采用文献计量法梳理了该领域的研究概况;然后,对近几年国内外相关研究进行系统综述,从整个交通运输网络出发,分析不同运输方式网络韧性研究特点,对交通网络模型

构建方法、交通网络韧性评估指标体系和方法、交通网络韧性提升策略和优化模型进行了梳理和总结;最后,提出未来研究方向,为进一步研究交通网络失效传播过程、网络抗灾能力和恢复能力、多式联运网络韧性评估和优化等提供基础。

1 交通运输网络韧性研究概况

在中国知网(CNKI)和科学网(Web of Science, WOS)核心集中分别检索交通网络韧性相关的中、外文文献,时间跨度为 2015 年~2024 年。整理得近十年国内外交通网络韧性研究的发文量如图 1 所示(彩图参见电子版,以下同),可见国内外交通网络韧性研究的发文量日益增加,国外在交通网络韧性方面的研究更加成熟,而从 2020 年开始国内相关研究也显著增多。针对不同交通运输方式网络韧性的研究发文量如图 2 所示,可见当前大部分交通网络韧性研究聚焦于道路网络,而针对其他交通网络的研究较少,特别是多模式或多式联运网络韧性的研究尤为匮乏。

为探索交通网络韧性相关领域的研究热点,

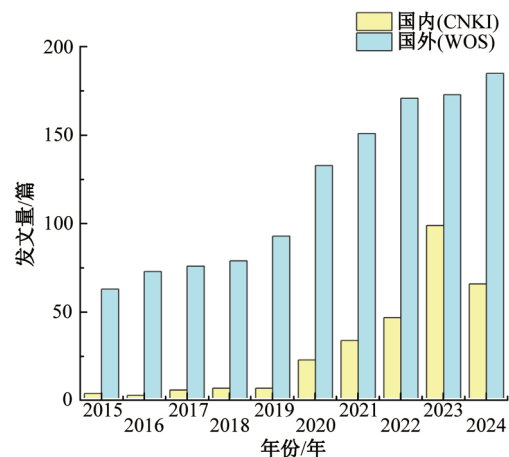


图 1 国内外交通网络韧性研究年发文量(2015~2024 年)
Fig. 1 Number of articles on transport network resilience published in China and abroad each year (2015~2024)

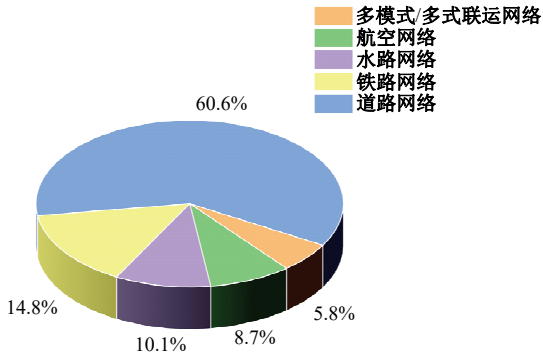


图 2 不同交通运输方式网络韧性研究发文量 (2015~至今)
 Fig. 2 Number of articles on network resilience for different transportation modes published in China and abroad (2015–present)

利用 VOSviewer 软件对相关外文文献关键词进行提炼和共现分析。如图 3 所示,已有研究可分为 3 个部分,即交通网络属性分析(如拓扑特征、脆弱性、鲁棒性等)、交通网络风险模拟分析和韧性评估,交通网络恢复与韧性优化模型。由图 4 可知,近几年基于复杂网络的脆弱性、鲁棒性、可靠性等网络属性方面的研究已取得大量成果,而由韧性展开的网络受灾过程、韧性评估和恢复已成为当前相关领域的研究热点。

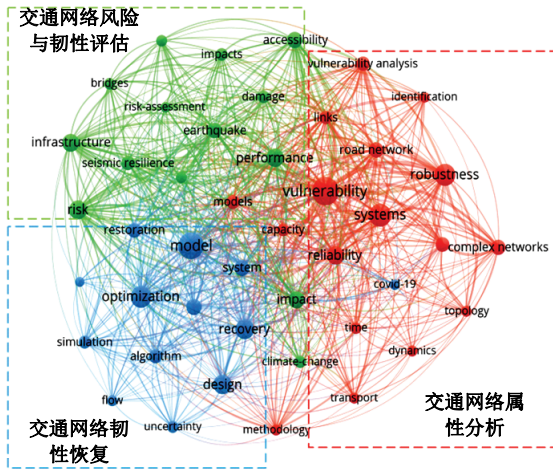


图 3 交通网络韧性关键词共现图谱
 Fig. 3 Keywords co-occurrence spectrum for transport network resilience

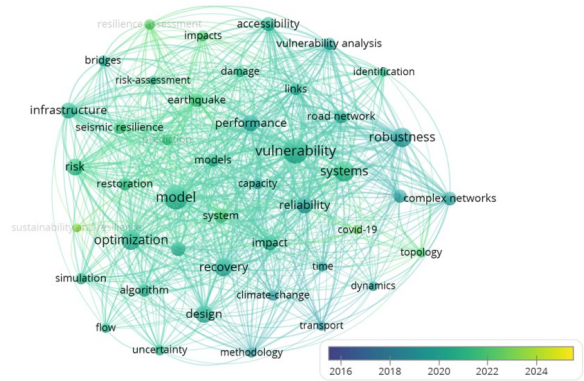


图 4 关键词共现时间线谱
 Fig. 4 Time line spectrum of keywords co-occurrence

2 交通运输网络模型构建

网络模型构建是交通网络韧性评估和优化的基础,韧性评估指标的计算、失效场景的模拟、网络优化和修复过程等都与构建的网络模型有关。交通网络模型构建可分为单一运输方式网络模型构建和多种运输方式网络模型构建。

2.1 单一运输方式网络模型构建

单一运输方式主要采用单层网络构建模型,建模方法如表 1 所示。其中,大多数学者采用 Space L、Space P 法构建单层网络模型,这两种方法能够直观反映交通网络的形状、位置,前者多用于构建物理网络,后者多用于运输网络。此外,也有一些学者针对单一运输方式构建多层网络模型。根据同一运输方式的不同属性,冯芬玲等^[8]将中欧班列运输网络按照组成关系拆解为基础路网和车流网络,进而定义了中欧班列多层复杂网络。根据运输方式的不同类载运工具,按船型(集装箱船、散货船、油船)划分单条航线,构建多层海运网络^[13]。

2.2 多种运输方式网络模型构建

针对单一运输方式的单层网络模型构建研究已较为成熟,而现实交通系统大多是由不同运输方式构成的多式联运复杂网络系统,呈现多层形态。因此,越来越多学者开始关注多层网络模型构建。多层网络的数学描述可分为聚合表达、矩

表 1 单层网络模型构建方法

Table 1 Methods for constructing single-layer network models

| 构建方法 | 构建形式 | 适用场景 | 相关文献 |
|---------|-----------------------------|---------------------------|---|
| Space L | 将交通站点和港口抽象为节点,直接连接的交通线路表示为边 | 针对不同节点在网络中的相互作用或网络结构的相关研究 | Zhang 等 ^[6] , Xu 等 ^[7] , 冯芬玲等 ^[8] |
| Space P | 将交通站点和港口抽象为节点,同一线路上的节点用边相连 | 针对网络中节点可达性或中转节点的研究 | 冯芬玲等 ^[8] , Jiao 等 ^[9] , Zhang 等 ^[10] |
| Space C | 将线路作为节点,共享站点的线路间建立连接 | 用于研究网络中线路之间的相关关系 | 何佳明 ^[11] , 叶森等 ^[12] |

阵表达和张量表达^[14]。

早期研究为降低复杂性多考虑聚合表达,网络邻接矩阵定义为 $B = \{b_{ij}\}$,若任意网络层 α 中节点 i 与节点 j 存在连边,则在多层网络中 $b_{ij} = 1$ 。康欢欢等^[15]针对中欧海铁运输网络,采用 Space L 法直接将车站、港口抽象为网络节点,车站或港口间的线路抽象为边,将节点间重复的运输线路数作为边权,构建了无向加权网络。李成兵等^[16]针对城市群客运交通网络,首先建立了道路、轨道、航空、水运交通子网,再通过复合节点和复合边将该城市群内所有交通子网进行叠加构建了城市群客运复合交通网络模型。然而,这种建模方法未考虑多层网络的层间交互关系,所构建的聚合网络本质上仍为单层网络。

为突出不同网络层间的连接关系,更多学者开始采用矩阵表达构建多层网络。基于单层网络构建方法,根据不同网络层中的异质节点和连边划分多个子网络,再结合层间耦合关系构建跨层连接形成多层网络。该方法采用超邻接矩阵 $G = \{A, R\}$ 表达一个包含 M 种运输方式的多层网络,其中, $A = \{A^{[1]}, A^{[2]}, \dots, A^{[M]}\}$ 为 M 个网络层层内邻接矩阵集合, $R = \{R^{[1,2]}, R^{[1,3]}, \dots, R^{[\alpha,\beta]}\}$ 为层间网络邻接矩阵集合。张玉召等^[17]首先建立了铁路运输网络层和海运网络层,基于同时具有铁路站点和海运港口的城市建立网络间的耦合关系,进而构建了中欧海铁运输双层网络。冯芬玲等^[18]首先根据矩阵表达构建了西部陆海新通道子网络模型,并将各子网络组成为复合运输网络模型,综合考虑了矩阵表达和聚合表达,降低研究复杂性的同时也不失考虑网络层间的相互关系。

早期已有国外学者提出利用张量构建多层网络模型, Domenico 等^[19]对多层网络的张量表示做出了开创性贡献。近年来,国内学者也逐渐开始采用张量表达构建多层网络。Wu 等^[20]引入基于张量的框架量化多层网络的中心性,该框架能够量化层间影响对多中心性的影响,提供了系统的方法描述多中心性如何跨不同层传播。周凌风等^[21]基于单层网络的张量表述方法,采用四阶张量表示多层网络,类似矩阵表达中的邻接矩阵,四阶张量称为邻接张量 $M = (m_{ij}^{\alpha\beta})$,元素 $m_{ij}^{\alpha\beta}$ 表示从 α 层的节点 i 到层 β 的节点 j 的有向连接强度,并引入了二阶影响张量 W_{β}^{α} 和作用张量 $H_{ij}^{\alpha\beta} = W_{\beta}^{\alpha} m_{ij}^{\alpha\beta}$ 分别表示网络层 α 对 β 的影响程度和网络层 α 指

向 β 的实际作用强度。

总体而言,现有研究多采用聚合表达和矩阵表达构建多层网络,而使用张量构建多层网络模型的研究还有所欠缺。此外,既有成果虽突出了不同网络层间的耦合关系,但未能体现不同运输方式的特点,还需融合不同运输方式的特点对多层网络模型进行修正。

3 交通运输网络韧性评估

交通网络韧性评估方法种类较多,一般可按两类标准加以区分:根据评估体系的不同,分为基于网络指标和基于网络性能的韧性评估方法;根据数据来源的不同,分为基于仿真模拟和基于数据驱动的韧性评估方法,如图 5 所示。

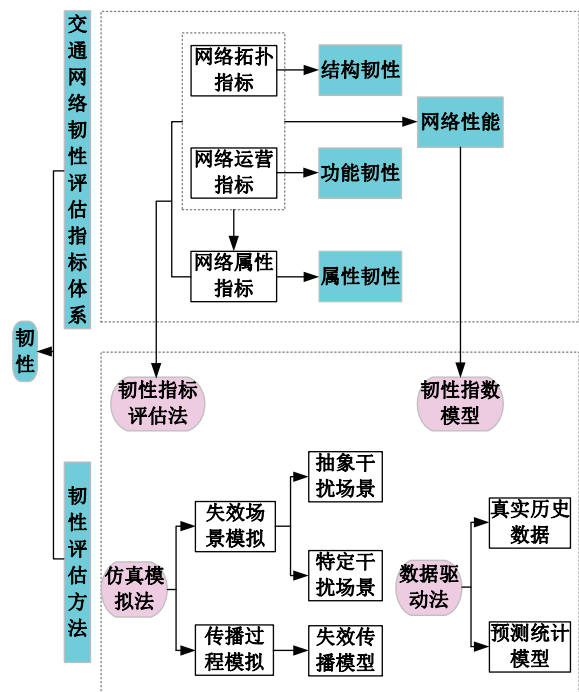


图 5 交通运输网络韧性评估框架

Fig. 5 Framework of transportation network resilience assessment

3.1 基于网络指标的韧性评估方法

交通网络韧性评估涉及多维度指标,根据评估视角的不同分为 3 类:①基于网络结构的拓扑指标,衡量网络物理连接的抗毁性,对应结构韧性;②聚焦运营功能的动态运营指标,通过运营参数评估系统服务能力,反映功能韧性;③关注阶段特征的属性指标,结合网络受干扰过程不同阶段的关键属性,表征属性韧性。

3.1.1 网络拓扑和运营指标

早期研究在韧性评估指标选取上多考虑网络

拓扑指标(如平均节点度、平均最短路径长度、平均聚类系数、介数中心性、网络效率、连通度等),将交通网络简化为节点和连边构成的拓扑网络,根据网络受干扰前、后拓扑指标的变化情况衡量网络韧性。Testa等^[22]通过比较初始网络和受损网络的拓扑指标变化情况,分析了沿海交通网络在极端气候下的韧性退化情况。然而,网络拓扑指标只能表现出网络的静态特征,忽略了交通网络的动态运营特征,如客流量、货运量、旅行时间、交通需求、运输费用等。

因此,更多研究开始考虑采用交通网络的动态运营特征衡量网络韧性。对此,一些学者采用扰动前、后网络运营特征的变化率衡量网络韧性,如需求满足比率^[23]、运输费用变化率^[24]等。还有一些学者在原来无向无权拓扑网络的基础上使用客流、车流等对网络赋权。Adjetej-Bahun等^[25]将铁路网抽象为动态图模型,通过考虑等待时间、旅行时间以及客流量与车站容量的占比,为网络中的边赋予权重。通过定义动态介数中心性和动态网络效率,根据其变化情况衡量网络韧性。研究结果显示^[23-25],动态指标在扰动场景中更实用,能够识别出静态拓扑指标忽略的关键脆弱点,从而更准确地评估交通网络的韧性。

此外,针对单一运输方式,现有研究考虑不同运输方式的运营特征,采取不同指标评估网络韧性,如表2所示。相比于单一的网络拓扑指标,综合考虑运营指标能够反映具体运输方式的特点,进而更全面地评估交通网络韧性。

表2 不同单一交通运输网络的韧性评估指标

Table 2 Indicators for assessing the resilience of transportation networks for different single transport modes

| 交通运输网络 | 韧性评估指标 | 相关文献 |
|----------|-------------------------------|--|
| 城市道路交通网络 | 路网效率(路网流量分布状态) | 吕彪等 ^[26] |
| 高速公路网络 | 网络拓扑结构、动态交通流时空特性、道路基础设施类型 | 徐鹏程等 ^[27] |
| 城市轨道交通网络 | 地铁客流量恢复正常的速度; 站间旅客人数、加权平均出行时间 | D'Lima等 ^[28] Chen等 ^[29] |
| 铁路客运网络 | 网络效率、最短出行时间、最短出行距离(网络性能指标) | 吴鹏等 ^[30] |
| 海运港口网络 | 灾害前、后港口吞吐量之比 | Li等 ^[31] |
| 机场基础设施网络 | 航班数量、载客量(网络服务效率函数) | 黄信等 ^[32] |

3.1.2 网络属性指标

(1)单一网络属性。交通运输系统具有多种属性特征,早期研究主要围绕鲁棒性(Robustness)^[9,33]、脆弱性(Vulnerability)^[6,13]、可靠性(Reliability)^[34,35]等单一属性,其中,鲁棒性反映对预期干扰的抵抗能力,属于韧性特征框架的一部分;脆弱性侧重于网络受到干扰时性能下降的敏感程度,可识别网络易受干扰的关键组件,而韧性则侧重于如何保护关键组件抵抗干扰以及中断后如何恢复,与脆弱性互补。系统韧性研究与可靠性相关。可靠性指网络在受到干扰后仍能维持可接受服务水平的概率,Su等^[34]通过地铁路段在受到干扰时能够维持某一容量水平的概率反映地铁系统的服务可靠性。Soltani-Sobh等^[35]提出了两种评估可靠性的方法,分别是计算事件前、后网络性能的比值(安全系数)或差值(安全边际),当网络受干扰后性能表现处于可接受范围内,则具有可靠性,比如通过高峰时段与自由流时段下行程时间之比量化公路客运交通网络的时间可靠性^[36]。网络的可靠性高,则不容易受到干扰事件的影响或在受到干扰后自身抵抗干扰的能力强,后续恢复快,是网络高韧性的基础。

(2)韧性特征框架。单一的网络属性指标只能表示系统应对扰动的某一部分韧性能力,衡量交通网络韧性则需综合考虑多个属性、不同阶段的抗干扰能力。交通运输系统韧性主要包含预防性、冗余性、鲁棒性、适应性和快速恢复性^[37],其含义和度量方法如表3所示。

根据网络受干扰过程的性能变化和阶段可划分不同的韧性能力,各阶段能力又与不同属性特征相对应,如图6所示^[40]。其中,预防能力对应预防性;吸收(抵抗)能力对应鲁棒性,是网络抵抗干扰、维持正常功能的能力;缓冲(适应)能力是网络性能降到最低时仍存在其他替代服务保障网络的基本运输能力;恢复能力对应快速恢复性。既有研究主要基于网络拓扑指标度量各韧性能力,马书红等^[41]从吸收能力、缓冲能力、可恢复能力3个维度构建网络结构韧性模型,其中,通过受攻击后的网络效率反映吸收能力,通过网络受攻击后与受攻击前各节点间独立路径数量之和的比值反映缓冲能力,基于各节点的节点度与网络总节点之比计算不确定扰动下传递的平均信息量,该值越大,所需的修复时间越长,网络恢复到正常状态的

表 3 网络属性特征的含义及度量方法

Table 3 Meaning and measurement of network attribute characteristics

| 属性特征 | 含义 | 度量方法 |
|-----------------------|--|---|
| 预防性(Preparedness) | 在网络受干扰前做好准备,尽可能减少网络攻击受到的影响,提升抗干扰能力 | 基于网络拓扑指标 ^[7] ;采取预防措施前后的网络性能水平 |
| 冗余性(Redundancy) | 网络受干扰后能提供可替代服务,维持可接受性能的能力 | 节点间可用备选路径的数量 ^[36] |
| 鲁棒性(Robustness) | 承受或吸收干扰,面对干扰时维持正常功能的能力 | 受干扰后系统的剩余性能水平 ^[7] ;干扰后与干扰前网络性能比值 ^[36] |
| 适应性(Resourcefulness) | 网络通过自行调整,以应对、管理和适应风险扰动 ^[38] | 受干扰后重新分配货源、转换运输方式的能力(使用贝叶斯网络概率建模和量化 ^[39]) |
| 快速恢复性(Rapid recovery) | 通过采取修复措施,网络快速高效恢复到正常状态的能力 | 网络从受损状态恢复到初始状态的时间;一定修复资源或一定时间下网络性能的恢复程度 |

能力越差,进而反映可恢复能力。然而,网络的抗干扰能力与多种因素有关,这种度量方法仅从单一拓扑结构指标考虑,存在一定局限性,还应当结

合具体运输方式的特点、相关动态运营指标进行度量。

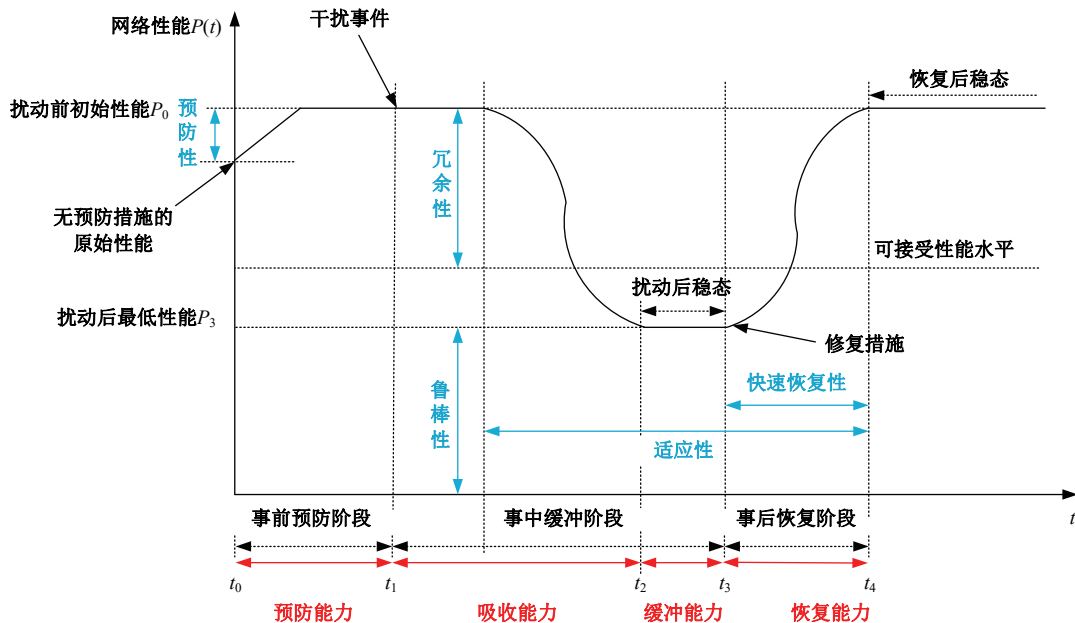


图 6 网络受干扰过程不同阶段的属性特征和能力

Fig. 6 Attribute characteristics and abilities at different stages of the network disruption process

3.1.3 韧性指标评估法

以上基于网络指标的韧性评估主要有 3 种量化形式,如表 4 所示。

一是计算网络受干扰后与受干扰前某一特定指标的比值度量韧性,如下所示:

$$R = I_1/I_0 \quad (1)$$

式中:R 为网络韧性值;I₀和 I₁分别为受干扰前和受干扰后的指标值。

Miller-Hooks 等^[23]以吞吐量为指标,通过灾后能够满足的总需求比例衡量货运网络的韧性。

二是将韧性分为不同维度的属性特征或能力,分别衡量这些属性值,进而分析不同层面的韧

性水平,如 Xu 等^[7]从预防性、鲁棒性和互操作性(受干扰车站乘客可转移到邻近站点的比例)3 个维度评估城市公共交通网络韧性。

三是选取多个指标经数学表达综合为一个指标作为网络韧性值,如陈沿伊等^[24]采用加权求和,马书红等^[41]将各指标投射到坐标轴得到韧性向量,以向量模长作为交通网络结构韧性值,如下所示:

$$R = \sqrt{\alpha_1 A^2 + \alpha_2 B^2 + \alpha_3 C^2} \quad (2)$$

式中:A、B、C 分别为所选取的指标值;α₁、α₂、α₃分别为各指标权重,α₁ + α₂ + α₃ = 1。

表 4 韧性指标评估法的主要形式

Table 4 Main forms of resilience indicator assessment methodology

| 韧性量化形式 | 应用 | 特点 |
|------------------------|---|--------------------------------|
| 网络受干扰前、后指标变化情况 →韧性值 | 拓扑指标变化情况 ^[22] 、需求满足比率 ^[23] | 指标选取较为片面,无法全面度量网络韧性值 |
| 韧性→不同维度网络功能属性 | 预防性、鲁棒性、互操作性 ^[7] ,吸收能力、缓冲能力、 恢复能力 ^[41] | 区分了不同阶段的韧性能力;未能对网络整体 韧性量化评估 |
| 不同指标分配权重加权求和→ 韧性值 | 需求满足比率和运输费用比率加权求和 ^[24] ,吸收 能力、缓冲能力和恢复能力加权求空间向量模 ^[41] | 将所有指标综合为一个指标;存在主观因素的 影响 |

以上研究将各指标看作同等重要,赋予相同权重,存在主观性。整体而言,考虑不同维度的网络指标,能够更全面地评估网络韧性,而对不同指标加权求和得到一个韧性值,可对网络韧性进行数值量化。以上方法在选取网络指标和定义韧性表达式上都存在一定局限性和主观性,还需全面地选取网络指标,考虑两两阶段与指标之间的耦合关系,客观确定指标权重,以保证韧性评估结果的全面性、准确性和客观性。

3.2 基于网络性能的韧性评估方法

近年来,大多数研究根据网络受干扰时的性能响应曲线(韧性三角形)量化韧性值,如图 7 所示。根据积分区域的不同分为网络性能保留率和韧性损失程度。

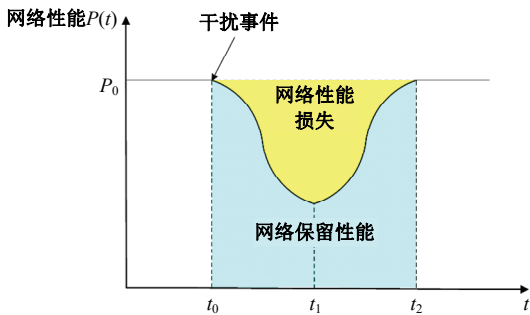


图 7 网络性能响应曲线

Fig. 7 Curve of network performance response

3.2.1 韧性指数模型

韧性损失程度,即相比于正常状态下,网络在受干扰状态下性能损失的程度。通过计算正常状态下网络性能曲线与干扰事件下性能响应曲线之间的区域面积(即韧性三角形的面积)衡量^[42],如下所示:

$$R = \int_{t_0}^{t_2} P_0 - P(t) dt \quad (3)$$

式中: $P(t)$ 为 t 时刻的网络性能; P_0 为正常状态下的网络性能,即网络未受到攻击(初始时刻 $t=0$)时网络性能响应函数 $P(t)$ 的值; t_0 为干扰发生时

刻; t_2 为干扰发生后网络恢复完成时刻。

网络性能保留率,即网络在受干扰状态下剩余的网络累计性能占原来正常状态下网络累计性能的比例^[30]。从网络受干扰时刻起到网络完全恢复这段时间,对网络性能进行积分,受干扰状态下与正常状态下性能积分的比值即为韧性值(网络性能保留率),如下所示:

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_2} P(t) dt}{P_0(t_2 - t_0)} \quad (4)$$

相比于韧性指标评估法,韧性指数模型给出了量化韧性的一般表达式,更具有普适性;此外,一个或几个网络指标通常难以直接衡量网络韧性,而先量化网络性能、再通过性能响应曲线积分计算韧性值将是当前和未来的研究重点。

3.2.2 网络性能衡量指标

网络性能响应函数并没有统一的定义,因此不同学者采用不同指标衡量网络性能,进而定义网络性能响应函数 $P(t)$ 。与前文衡量网络韧性类似,现有研究主要采用网络拓扑指标和运营特征衡量网络性能。张洁斐等^[43]选取网络平均效率为性能指标,构建韧性指数,但指标选取较为单一,没有考虑其他网络结构指标。陈津怡等^[44]则综合考虑了网络效率、平均最短路径长度和最大连通子图构建网络性能响应函数,如下所示:

$$P(t) = \omega_1 \cdot E(t) + \omega_2 \cdot l(t) + \omega_3 \cdot N(t) \quad (5)$$

式中: $E(t)$ 、 $l(t)$ 、 $N(t)$ 分别为 t 时刻的网络效率、平均最短路径长度和最大连通子图节点数; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 均为指标系数, $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。

近年来,更多学者根据不同研究对象,结合不同运营特征衡量网络性能。吴鹏等^[30]针对无权、空间加权和加权铁路网络,分别采用网络效率、时间可达性和空间可达性衡量对应的网络性能。Chen等^[29]针对城市轨道交通网络,考虑站间旅客人数和加权平均出行时间的网络效率构建网

络性能响应函数。马敏等^[45]则兼顾网络拓扑结构和服务质量,对 OD 客流损失率和网络服务效率损失率加权求和,衡量网络性能。马壮林等^[46]针对大客流干扰事件,综合考虑了乘客出行效率和网络服务效率。

3.3 基于仿真模拟的韧性评估方法

仿真模拟法通过对网络受干扰过程进行仿真模拟,得到网络指标和性能变化的相关数据,进而分析网络韧性演化情况。根据模拟对象的不同,分为对干扰场景的模拟和对失效传播过程的模拟,前者又分为抽象干扰场景和特定干扰场景。

3.3.1 抽象干扰场景模拟

大多数研究将一系列或某类具体的干扰场景抽象为一般干扰场景^[36],进行随机攻击和蓄意攻击,通过从网络中移除节点和连边,模拟交通网络失效形式,评估网络韧性。

(1) 随机攻击。实际交通网络中的故障通常随机出现、没有规律,如自然灾害、突发事件等非人为因素引起的网络组件失效,随机攻击即对这些广泛存在的异常故障进行模拟,将节点以同样的失效概率从网络中随机移除^[47]。此外,一些研究采用蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟,并考虑概率分布函数对网络进行随机失效场景模拟。Miller-Hooks 等^[23]对 5 种灾害场景分别进行 Monte Carlo 模拟,计算各场景下的货运吞吐量,按不同场景的灾害概率加权平均得到货运网络在一系列灾害场景下的整体韧性值。Fang 等^[48]采用空间局部失效模型(Spatially localized failure, SLF)模拟台风等自然灾害对运输网络的破坏,通过 Monte Carlo 模拟生成台风在局部区域随机发生的不同失效场景。相比于直接从网络中随机移除节点, Monte Carlo 方法根据不同灾害场景的特征设定相关参数,更贴近实际情况。

(2) 蓄意攻击。对应一些人为引起的干扰事件(如恐怖袭击、交通事故等),蓄意攻击通常具有一定指向性,基于不同角度以某种序列使节点依次失效。早期研究主要根据网络拓扑特征模拟蓄意攻击,比如一些学者基于节点度最大、介数最大对网络进行蓄意攻击^[49-51]。也有一些研究首先对网络中节点重要度进行排序,然后根据节点重要度依次攻击网络中的重要节点,分析节点失效过程中网络性能的变化情况^[8,17]。邵志豪^[52]根据暴雨内涝对城市公共交通网络的破坏程度,对网络

进行单节点和累计节点蓄意攻击,对城市公共交通网络抗涝韧性进行研究。但该研究没有体现暴雨内涝灾害的特点,仍然停留在攻击节点个数和按照某种序列攻击节点,仅是城市公共交通网络在不同受损情况下的韧性研究,泛化了干扰场景。

3.3.2 特定干扰场景模拟

无论随机攻击还是蓄意攻击,这些攻击策略都泛化了攻击场景,不能很好地表征不同干扰对交通网络的影响。因此,一些研究针对特定场景,分析具体干扰事件的特点模拟干扰事件的发生,量化网络韧性。部分学者通过分析灾害多发区域,对关键区域进行攻击模拟灾害过程。比如针对洪水灾害,根据交通网络中节点到水域的距离对网络中的节点进行分类,靠近水域的节点优先失效^[53];针对暴雨灾害,根据暴雨灾害频繁发生的区域,使该区域机场节点失效,模拟暴雨灾害干扰场景^[32]。但这些研究仍是通过使节点失效模拟干扰场景,未能完全突出干扰场景的具体特征。因此,一些学者基于具体的灾害模型,对灾害过程进行模拟。Kasmalkar 等^[54]通过整合洪水地图与交通模型,模拟不同水位下的交通状况,量化了洪水风险暴露程度、区域通勤模式及道路网络特征对交通韧性的影响。徐鹏程等^[27]考虑暴雨频率、强度、持续时间等特征,提出了一种全周期暴雨灾害下道路网络时变韧性模型,根据灾害模拟下不同路段的水位值是否超过警戒值判断路段是否失效,通过网络连通效率衡量网络韧性。相比于前者,基于具体灾害模型的特定干扰场景模拟更贴近实际情况,更能反映干扰场景下网络韧性的演化特征。

3.3.3 失效传播过程模拟

干扰场景模拟主要考虑攻击方式和干扰类型,而实际交通网络受干扰后会产生级联失效(单个节点故障引发大规模崩溃),对此现有研究建立了失效传播模型模拟此过程并分析性能变化,常见的失效传播模型如表 5 所示。

其中,大多数学者采用负载-容量级联失效模型描述网络级联失效过程。首先对节点的状态、初始负载和容量进行设定,然后攻击网络节点,使其变为失效状态,根据制定的负载重分配策略将失效状态的节点的负载按比例分配给其邻居节点,更新节点状态,进行负载重分配,往复进行直至覆盖整个网络。现有研究多将节点分为正常和

表5 交通网络失效传播模型

Table 5 Failure propagation models of transport networks

| 失效传播模型 | 建模思路 | 应用案例 |
|------------------------------------|--|--|
| 负载-容量级联失效模型 | 通过节点负载与容量的关系界定节点状态,模拟负载重分配导致的级联失效 | 城市群客运复合网络 ^[16] ;中欧海铁运输网络 ^[17] ;工程物流网络级联失效模型 ^[55] |
| 耦合映像格子模型(Coupled map lattice, CML) | 定义节点间耦合作用机制,通过节点状态迭代反映级联失效的动态传播 ^[56] | 基于拥堵传播的CML模型 ^[46] ;客流强度加权的CML模型 ^[57] ;考虑节点抵抗特性H的HCML模型 ^[58] ;考虑道路抵抗拥堵能力的M-CML模型 ^[59] |
| 传播动力学模型 | 借鉴疾病传播理论,模拟风险在交通网络中的扩散与恢复过程;节点状态分为易染态(Susceptible, S)、感染态(Infected, I)和恢复态(Recovered, R) ^[60] | 港口风险传播SIS模型 ^[61] ;多式联运网络风险传播SIRS模型 ^[62] |
| 灾害蔓延动力学模型 | 结合节点自修复能力和灾害扩散机制,分析网络在干扰下的演化与稳定性 | 城市路网灾害演化 ^[63] ;多式联运网络风险传播 ^[64] |
| 基于渗流理论的风险传播机理 | 类比流体扩散过程,分析负载流动与节点/边状态变化的相互作用,最终达到平衡态 | 城市道路网络拥堵传播 ^[65] ;不同拥堵率下城市交通网络性能状态 ^[66] ;多式联运风险传播 ^[67] |

完全失效两种状态^[47],但实际中,有些节点受干扰后不一定完全失效,可能只是部分受损。因此,有学者^[17,18]根据节点负载与容量间的关系,将节点状态进一步细分为正常状态、暂停状态和失效状态,如下所示^[17]:

$$\Delta L_i(t) = \begin{cases} 0, & 0 < L_i(t) < Q_i, \text{ 正常状态} \\ L_i(t) - Q_i, & Q_i < L_i(t) < S_i, \text{ 暂停状态} \\ L_i(t), & L_i(t) > S_i, \text{ 完全失效状态} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta L_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 需要转移的负载量; $L_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 的负载量; Q_i 为节点的安全容量,即站点在设计时预留一定冗余空间,满足运输网络出现负载时的运转; S_i 为节点的极限容量,即站点所能接受的最大负载量。

除节点失效外,也有一些学者^[55,68]采用负载-容量模型对路段失效的网络级联失效过程进行研究。

3.4 基于数据驱动的韧性评估方法

近年来,随着数据采集技术的快速发展,除了直接对干扰场景进行假设模拟,越来越多学者开始从数据驱动视角,基于已有数据和预测统计模型评估具体干扰场景的事后影响,进而分析韧性演化过程。Hong等^[69]利用智能手机地理位置数据分析社区灾害响应与恢复模式,提出基于活动水平曲线下面积的韧性容量指标,识别出不同社区在灾害中的不平等韧性并结合灾害损失数据验证了该指标的有效性。Yin等^[70]提出了一个混合知识驱动和数据驱动的方法,使用北京地铁历史故障数据训练贝叶斯网络模型,综合考虑事件严重性和恢复时间定量分析系统韧性。Wong等^[71]

通过分析历史航班延误数据,计算每日各机场的平均延误,并构建协方差矩阵,衡量某一天的延误模式与正常状态的偏离程度,进而评估航空网络韧性。该研究还将数据驱动方法和复杂网络仿真模拟方法进行结合,通过统计信息识别异常延误的机场,并基于航班取消阈值移除节点,计算网络指标。相比于单一的仿真模拟方法,基于历史数据的仿真模拟过程更贴近实际情况,对于灾害发生过程、风险传播过程的预测和评估更为准确。

总体而言,韧性评估指标日趋多样化,尤其针对单一运输方式网络韧性评估已较为成熟,而在多式联运网络韧性评估上还需深入研究,尤其考虑不同运输方式的特点;在干扰场景模拟上,采取不同攻击方式的蓄意攻击模拟以及失效传播模型已取得大量研究成果,但这些方法可能存在假设条件、模拟场景与实际不符的情况。结合干扰事件的历史数据,采取灾害学模型进行干扰场景模拟正成为交通网络韧性评估方法的新趋势。

4 交通运输网络韧性提升

交通网络从遭受干扰事件破坏到恢复到正常状态的过程可分为3个阶段,即抵抗阶段、适应阶段和恢复阶段,相应的网络全局韧性则由抵抗能力、适应能力和恢复能力组成。根据采取的不同阶段可将韧性提升策略分为预防策略、应急策略和恢复策略。

4.1 韧性提升策略

4.1.1 预防策略

在交通网络规划和设计阶段,为预防交通网络在干扰事件下大规模受损,可对交通网络采取

一系列保护措施,如提高网络关键组件的可靠性、优化网络结构,使网络能够更好地抵御干扰事件造成的破坏和影响,提高网络抵抗韧性。

(1)提高网络关键组件可靠性。多数研究考虑识别关键节点和路段并加以保护。关键组件识别方法可分为两种,即构建重要度评价体系^[8]或评价模型^[72],根据重要度评分识别关键组件,或分别移除网络中的每个节点或路段,根据移除后网络相关指标变化情况评估节点或路段关键程度^[30,73],如某个节点移除后,网络性能下降越多,则该节点越不可替代,该节点越关键。提高网络关键组件的可靠性主要通过通过对网络节点和路段进行容量冗余优化来实现。何佳明^[11]设计了考虑节点容量冗余系数的网络抗毁性仿真实验,对网络节点在不同容量冗余系数下的抗毁性进行分析,讨论了不同冗余系数组合下对网络抗毁性提升的效果,研究表明,对越重要的节点设置越高的冗余系数时,网络抗毁性提升越明显。林耿楠^[74]建立了多模式路网容量双层规划模型,采用增量法和相继平均法进行算法求解,获得路段或节点失效前、后的路网容量,测定路段容量冗余度,考虑到政府资金限制,结合路段改造后对网络的贡献度评估路段重要性,在此基础上研究路网优化顺序,重要度越大的路段越优先改造。

(2)优化网络结构。一些学者通过设计更具韧性的网络或调整现有网络结构,集成多种交通方式以提升网络韧性。如采用环状结构的网络比采用放射型结构的网络韧性更强^[75];将地铁与公交网络进行整合,构建多模式交通网络,通过优化公交线路布局保证在地铁容量下降时能快速承担客流,增强了网络冗余性和连通性,进而提升网络整体韧性^[34]。还有一些学者考虑增加备用节点和冗余线路提高网络冗余性。Fan等^[76]针对多路复用网络,提出了一种改进的基于度偏差的连边添加方法,寻求级联失效下维持网络性能的最优策略,以提升网络韧性水平。Wandelt等^[77]将社区结构引入交通网络鲁棒性分析,在相邻社区之间分别连接高度数节点和低度数节点,既提高了网络关键区域的冗余性,又加强了网络整体的连通性。Xu等^[78]考虑出行者路径选择行为和出行需求,通过新增道路连边,最大化具备多条独立路径的O-D对数量,从而在部分路段中断时提供替代路线,以提升网络韧性。

4.1.2 应急策略

在干扰事件发生后,需要对网络进行临时调整:一方面是提前部署应急设施,保障网络在遭遇破坏时能快速恢复,减少性能损失;另一方面,通过转移失效节点或路段的负载,保证网络性能缓慢降级,网络能够暂时以可接受的性能水平继续运行,提升网络适应能力。相比于恢复策略,这类策略仅是对网络进行提前部署或临时调整,但失效组件仍未修复。

(1)优化应急设施部署。通过合理部署应急设施,使其辐射尽可能多的网络节点和路段,对受损组件及时修复,减少性能损失。现有研究主要考虑应急设施选址问题,优化设施部署,加快网络恢复速度,提升网络韧性。李毅^[79]考虑了暴雨天气对灾后节点间通行时间的影响,构建了多目标应急资源设施点合作覆盖选址模型,对灾前应急资源配置进行优化,提升暴雨天气下城市道路交通系统韧性。Guo等^[80]通过节点或路段重要性量化救援需求,考虑总覆盖面、救援时间与政府成本之间的平衡,建立多目标非线性规划模型,采用NSGA-II-CA算法求解该模型,最后以川藏地区多式联运网络为例,验证了算法的有效性。

(2)负载重分配策略。不同学者对负载转移依据、分配比例等进行了不同的设定,以提升网络面对干扰的适应能力,如表6所示。早期一些学者考虑随机分配^[81]、全局最短路径^[83]等将失效节点的负载重新分配给其他节点,未能考虑部分节点的容量限制。目前研究主要基于节点剩余容量、节点距离、节点重要度等重新分配失效节点负载,但大多也只考虑了单一因素。李成兵等^[16]则对剩余容量分配策略进行改进,考虑连边剩余容量对节点间负载分配的影响。赵成勇等^[82]综合考虑连边运输效率和节点重要度,建立负载重分配模型,并通过实证分析发现,对网络运输效率因素赋予越高权重,对网络韧性水平有越好的提升效果。总体来看,综合考虑多个因素的负载重分配策略,在提升网络韧性上效果更好。

4.1.3 恢复策略

交通网络遭受干扰事件影响后,需要采取一系列措施对网络进行修复,保证网络在尽可能短的时间内恢复到原有性能水平。现有研究从最优恢复活动、最优修复时序和最优资源分配等方面对事后网络进行恢复优化,以提升网络恢复韧性。

表6 负载重分配策略
Table 6 Load reallocation strategies

| 负载转移依据 | 分配比例 | 文献 |
|-----------------|---|--------------------------|
| 随机分配 | 根据随机负载重分配因子 | Lehmann等 ^[81] |
| 基于邻居节点与失效节点的距离 | 各邻居节点与失效节点距离的倒序 | 张欣等 ^[13] |
| 基于邻居节点的重要度 | 各邻居节点重要度占比的倒序 | 张玉召等 ^[17] |
| 基于邻居节点剩余容量和致脆度 | 各邻居节点剩余容量比例和致脆度比例加权求和 | 冯芬玲等 ^[18] |
| 基于邻边剩余容量和节点剩余容量 | 若邻边剩余容量大于邻居节点剩余容量,则按照节点剩余容量所占比例分配;反之,按照邻边剩余容量所占比例分配 | 李成兵等 ^[16] |
| 基于运输效率和节点综合重要度 | 邻边运输效率比例和邻居节点重要度比例加权求和 | 赵成勇等 ^[82] |

Chen等^[84]建立了以韧性最大化为目标的随机混合整数规划模型,以确定预算约束下的受损路段最优恢复活动组合。而事后失效节点、路段修复顺序对交通网络性能恢复、韧性提升具有重要影响,引发了国内外学者的广泛关注。对于大规模复杂网络,失效组件较多时,采用穷举法比较各修复顺序的效果将导致巨大工作量,因此一些学者采用基于某种准则的偏好恢复策略,如基于节点度^[43]、节点重要度^[85]等,优先修复重要度大的节点;但该策略仍存在一定局限性,可能遗漏全局最优策略。基于此,越来越多学者建立修复时序优化模型,以网络韧性最大化为优化目标,确定网络节点修复顺序,通过将该修复策略与其他修复策略(如随机恢复、偏好恢复等)进行对比,证明了基于网络韧性的最优修复策略的优越性^[32,46]。除考虑修复顺序外,还有一些学者^[45,46]讨论了不同修复资源量对网络韧性提升的影响,结果表明,增加修复资源可缩短恢复时间,减少网络性能损失,但修复资源量的增加与网络韧性的提升不成正比,应根据实际情况合理安排修复资源。这些研究通常将受损组件的恢复时间和程度视为一致的,实际中受资源量的限制,不同组件的恢复时间和程度通常不同。对此,一些研究^[86,87]考虑不同路段恢复差异,同时优化修复顺序和资源分配,通过实证分析表明考虑路段恢复速度或恢复程度差异的恢复决策方案可有效提高路网恢复效果。

上述研究只考虑了事后优化修复序列,Xu等^[88]则建立了两阶段韧性优化方法,在受干扰前增加环线以优化网络拓扑结构,在受干扰后确定最优修复顺序,通过实证分析发现,两阶段优化策略在减少网络韧性损失上效果更好。

总体来看,在交通网络韧性提升策略上,大多数研究聚焦于网络恢复策略,尤其是节点、路段修复顺序的优化研究。但网络受损程度不同,受损

组件不同,相应的修复策略也有所不同,很少有研究将网络节点、路段受损程度与恢复韧性相结合。此外,现有成果主要对某一阶段的恢复策略展开研究,很少有研究考虑不同阶段恢复策略的组合对网络全局韧性提升的影响。

4.2 韧性优化模型和算法

大部分韧性提升研究通过建立数学模型优化网络性能,以寻求提升网络韧性的最优方案。考虑不同优化层面,韧性优化模型及求解算法如表7所示。

大多数研究采用整数规划模型(尤其是0-1整数规划)对网络韧性进行优化。在网络结构优化中,决策是否建设某条候选连边作为新增路段;在应急设施选址中,是否在某候选点建设应急设施点,该设施点是否对某需求点提供应急资源;在恢复活动组合中,根据0-1变量决策某条受损路段的恢复活动组合;在修复时序优化和资源分配上,决策受损组件的修复时间和修复资源分配。相关研究多采用启发式算法求解,如遗传算法、禁忌搜索算法等。

近年来,越来越多学者考虑多个优化目标。在应急设施选址中,除最大化覆盖需求^[89]外,还考虑最小化救援时间和建设成本^[79,80]。在修复时序优化上,通常根据韧性评估指标确定优化目标。一些研究从不同层面选取多个指标量化韧性并形成综合韧性指标,最终使该综合韧性指标最大化;还有一些研究则对多个指标进行优化,如最小化韧性损失和修复总时长^[91]、最大化性能损失韧性和恢复速度韧性^[87,92]。相比于单目标规划,多目标规划通过多维建模、权衡分析、解集多样性,在网络韧性研究中更贴合实际需求,尤其在资源有限、目标冲突、环境不确定的场景下,优势尤为显著,能够更好应对复杂系统的综合优化需求。对于多目标规划模型,大多数研究采用NSGA-

表 7 韧性优化模型及算法
Table 7 Models and algorithms for resilience optimization

| 优化层面 | 求解目标 | 优化目标 | 优化模型 | 求解算法 | 文献 |
|------|-------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------------------|---|
| 预防策略 | 网络结构优化(选择新增的道路连边) | 最大化满足冗余要求的 O-D 对数量 | 双层整数规划模型 | 转化为单层混合整数线性规划;使用商业求解器(如 CPLEX、Gurobi) | Xu 等 ^[78] |
| | 应急设施选址 | 最大化期望覆盖需求 | 随机整数规划 | 禁忌搜索的启发式算法 | Salman 等 ^[89] |
| 应急策略 | 应急设施选址 | 最大化覆盖需求量、最小化通行时间和建设成本 | 多目标非线性混合整数规划模型(合作覆盖模型) | NSGA-II | 李毅 ^[79] |
| | 应急设施选址 | 最大化建设成本效用、需求点综合覆盖,最小化总救援时间 | 多目标非线性混合整数规划模型(合作覆盖模型) | NSGA-II-CA | Guo 等 ^[80] |
| 恢复策略 | 最优恢复活动组合 | 韧性最大化 | 随机混合整数规划模型 | Benders 分解和列生成法 | Chen 等 ^[84] |
| | 车站最优修复顺序 | 韧性最大化 | 非线性规划模型 | 遗传算法 | 马敏 ^[45] ,肖红等 ^[90] |
| | 区间最优修复时序 | 韧性损失最小、修复总时长最小 | 多目标非线性规划模型 | NSGA-II | 张雯婕 ^[91] |
| | 确定待恢复路段及最优修复时序 | 最大化恢复速度韧性和累计损失韧性 | 双层规划模型 | 遗传算法; Frank-Wolfe 算法 | Li 等 ^[92] |
| | 路段恢复预算类型、恢复时序 | 韧性最大化 | 双层规划模型 | 改进编码方法的遗传算法; Frank-Wolfe 算法 | 路庆昌等 ^[86] |
| | 路段修复时间、修复人员分配 | 性能损失韧性最大化、恢复速度韧性最大化 | 双目标混合整数规划模型 | 遗传算法 | Mao ^[87] |

II 算法^[79,91]求解;对于复杂约束或高维多目标优化问题,NSGA-II-CA 算法^[80]则更为适用。

双层规划模型也是交通网络韧性修复策略中的常用数学模型。这类模型综合考虑了修复方案优化和用户行为响应,上层模型以韧性指标最大化为目标,寻求受损组件最优恢复顺序;下层模型以用户出行时间成本最小化为目标,反映用户对修复策略的响应,动态评估网络性能,上层据此调整后续恢复计划,形成动态优化闭环^[86,92]。其中,上层模型通常为并行机调度问题,采用遗传算法求解;下层模型为用户均衡配流模型,常用求解算法为 Frank-Wolfe 算法。相比于单层规划模型,双层规划模型将修复方案与出行者行为响应纳入统一框架,通过协调上下层模型决策,提升了整体决策的合理性。

5 研究现状评述

本文针对交通运输网络,从网络模型构建、韧性评估指标和方法、韧性优化策略和模型 3 个方面梳理了交通运输网络韧性的研究现状。随着国内外相关研究的逐步深入,交通运输网络韧性研究已经取得一定进展,从单层网络模型构建到多层网络建模,韧性评估指标体系更加全面,韧性优

化方法更加完善。同时,现有研究在考虑具体失效对象的干扰场景模拟,不同受损类型的韧性恢复策略,不同运输方式特点的多式联运网络韧性研究等方面还有待深入。基于此,对当前交通运输网络韧性研究现状进行评述。

(1) 多层网络模型构建更加复杂

早期研究多针对单一交通运输方式构建单层网络模型,主要采用 Space L、Space P 和 Space C 法。随着多式联运、综合交通运输的快速发展,针对多种交通运输方式的多层网络模型构建正成为研究热点,建模方法从较为简单的聚合表达达到矩阵表达,再到张量表达,网络模型构建方法更加复杂,也更能体现多层交通网络的结构特点和各网络层之间的作用关系。

(2) 韧性评估指标体系日益丰富

研究初期主要采用网络拓扑特征衡量网络韧性,对网络动态运营特征和性能变化情况考虑较少。随着研究的深入,交通网络韧性评估指标体系逐渐丰富,如综合考虑网络拓扑特征和运营特征衡量网络韧性;通过先评估网络属性指标,再将各属性指标加权求和以量化网络全局韧性;基于韧性三角形和网络性能响应函数量化韧性值。此外,既有研究还针对不同运输方式的特点,采用不同指标衡

量网络韧性;综合考虑网络受灾过程不同阶段的功能属性,进而更加全面、准确地评估交通网络韧性。

(3)韧性提升优化方法持续完善

早期的交通网络韧性提升策略主要围绕网络冗余优化展开,以提升网络抗毁性;当前大多数韧性优化研究通过建立非线性优化模型,寻求最优修复方案,提升网络恢复韧性。其中,整数规划(尤其是0-1规划)使用较多,而近年来越来越多学者考虑双层规划模型,上层为战略决策,下层为运营响应,这主要与决策目标的性质和网络性能响应有关。决策目标上,早期仅考虑待恢复的节点或路段,确定最优恢复顺序,后面增加考虑路段恢复程度差异,修复资源的差异,进一步确定不同路段的修复资源;优化目标由单目标向多目标演化,早期研究多对单一韧性指标进行优化,后来开始以韧性最大化为优化目标,但仍集中于单目标优化方法。近年来,越来越多的学者开始基于实际情况考虑更多优化条件,采取多目标优化。

6 未来研究方向展望

(1)考虑具体失效对象和场景的失效过程仿真模拟

使用仿真模拟法对失效场景和传播过程进行模拟,进而分析交通网络韧性演化的相关研究已取得一定成果,但现有研究普遍存在干扰场景泛化、失效对象不具体等问题。为更加准确地评估网络韧性,应使仿真模拟过程更加贴近实际。对于干扰场景模拟,应针对某种具体干扰或灾害具体分析破坏特点,开发灾害模型以模拟灾害发生过程。对于失效传播模型,现有研究对节点及路段状态划分仍主要划分为正常、暂停和失效3种状态,未能体现不同运输方式基础设施特点,如考虑不同运输方式中节点和路段的具体基础设施,重要程度越大的基础设施受损,数量越多的基础设施失效,则该车站或路段的受损情况越严重,进而细分失效状态,将失效状态转化为性能保留率等参数。

(2)考虑受损类型的韧性恢复与全过程策略组合优化

交通网络韧性研究的落脚点是提升网络抵抗干扰事件时的影响以及从中快速恢复到正常状态的能力。现有研究在考虑网络恢复策略时多将不同节点和路段的受损程度和类型视为相同的,相应的修复时长也未能区分,而实际中不同节点的

受损程度明显存在差异,因此,未来有必要具体考虑网络组件受损程度,针对性地制定恢复策略。此外,不同运输方式易遭受的干扰场景有所不同,有必要针对具体干扰场景的特点来提升相应运输网络的韧性。另一方面,韧性由抵抗能力、适应能力和恢复能力组成,而大多数研究只针对网络受干扰过程的某个阶段寻求韧性提升策略,未来可综合考虑不同阶段的优化策略组合,以提升全过程韧性。

(3)多式联运网络韧性评估体系与提升策略

目前,关于单一交通运输方式的网络韧性研究已取得大量研究成果,而现实交通系统大多是由不同交通运输方式构成的复杂系统,多式联运正成为交通系统的未来发展趋势。尽管当前有一些研究考虑了多种运输方式,但仍是将不同运输方式抽象为节点、连边,采用统一的指标衡量整个交通网络的韧性,未能将不同交通方式的特点融入多式联运网络韧性分析中,且关于韧性提升策略的研究仍主要针对城市轨道交通、道路网络、铁路网络等单一运输方式。因此,有必要在原有单一交通运输网络韧性研究的基础上,考虑不同运输方式特点,制定多式联运网络韧性评估体系;针对多式联运网络受干扰过程,建立优化模型,提升多式联运网络性能和韧性水平。

参考文献:

- [1] 中共中央,国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[M]. 北京:人民出版社,2021.
- [2] Azolin L G, Silva A N R D, Pinto N. Incorporating public transport in a methodology for assessing resilience in urban mobility[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 85: 102386.
- [3] Ma F, Ao Y, Wang X, et al. Assessing and enhancing urban road network resilience under rainstorm waterlogging disasters[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023, 123: No. 103928.
- [4] Bešinović N. Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda[J]. *Transport Reviews*, 2020, 40(4): 457-478.
- [5] Wei Y, Yang X, Xiao X, et al. Understanding the resilience of urban rail transit: concepts, reviews, and trends[J]. *Engineering*, 2024, 41: 7-18.
- [6] Zhang L, Wen H, Lu J, et al. Vulnerability assess-

- ment and visualization of large-scale bus transit network under route service disruption[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 88: No. 102570.
- [7] Xu Z, Chopra S S. Interconnectedness enhances network resilience of multimodal public transportation systems for Safe-to-fail urban mobility[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): No. 4291.
- [8] 冯芬玲, 蔡明旭, 贾俊杰. 基于多层复杂网络的中欧班列运输网络关键节点识别研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(6): 191-200.
Feng Fen-ling, Cai Ming-xu, Jia Jun-jie. Key node identification of China railway express transportation network based on multi-layer complex network[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(6): 191-200.
- [9] Jiao J, Zhang F, Liu J. A spatiotemporal analysis of the robustness of high-speed rail network in China[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 89: No. 102584.
- [10] Zhang X, Zhang W, Lee P T W. Importance rankings of nodes in the China Railway Express network under the Belt and Road Initiative[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 139: 134-147.
- [11] 何佳明. 港口-腹地多式联运网络抗毁性及节点冗余优化研究[D]. 大连: 大连理工大学建设工程学院, 2022.
He Jia-ming. Research on survivability and node redundancy optimization of port and hinterland multimodal transport network[D]. Dalian: School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, 2022.
- [12] 叶森, 吕兴, 李盛杰, 等. 基于神经网络算法的城市轨道交通网弹性评估[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2025, 23(3): 197-212.
Ye Sen, Lü Xing, Li Sheng-jie, et al. Resilience assessment of urban rail transit network based on neural-network algorithm[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2025, 23(3): 197-212.
- [13] 张欣, 李双菲, 孙代源. 中欧集装箱海铁复合运输网络脆弱性分析[J]. *交通信息与安全*, 2023, 41(3): 48-58.
Zhang Xin, Li Shuang-fei, Sun Dai-yuan. Vulnerability analysis of China-Europe container sea-rail intermodal transport network[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2023, 41(3): 48-58.
- [14] 吴宗柠, 狄增如, 樊瑛. 多层网络的结构与功能研究进展[J]. *电子科技大学学报*, 2021, 50(1): 106-120.
Wu Zong-ning, Di Zeng-ru, Fan Ying. The structure and function of multilayer networks: progress and prospects[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2021, 50(1): 106-120.
- [15] 康欢欢, 张玉召, 石古乐. 复杂网络视角下的中欧海铁运输网络重要节点识别研究[J]. *计算机工程与应用*, 2025, 61(4): 349-357.
Kang Huan-huan, Zhang Yu-zhao, Shi Gu-yue. Research on the identification of important nodes in China-Europe sea-rail transport network from the perspective of complex network[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2025, 61(4): 349-357.
- [16] 李成兵, 张帅, 杨志成, 等. 蓄意攻击下城市群客运交通网络级联抗毁性仿真[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(2): 14-21.
Li Cheng-bing, Zhang Shuai, Yang Zhi-cheng, et al. Invulnerability simulation in urban agglomeration passenger traffic network under targeted attacks[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(2): 14-21.
- [17] 张玉召, 康欢欢, 邓雨露. 多层网络视角下的中欧海铁运输网络级联失效脆弱性分析[J]. *计算机工程与应用*, 2025, 61(5): 298-308.
Zhang Yu-zhao, Kang Huan-huan, Deng Yu-lu. Vulnerability analysis of cascading failure of Sino-Europe sea-rail transport network from the perspective of multi-layer network[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2025, 61(5): 298-308.
- [18] 冯芬玲, 董开云, 张泽, 等. 基于级联失效的西部陆海新通道网络脆弱性分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2024, 24(6): 15-29.
Feng Fen-ling, Dong Kai-yun, Zhang Ze. Analysis of vulnerability for new western land-sea corridor network based on cascading failures[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(6): 15-29.
- [19] Domenico D M, Ribalta S A, Cozzo E, et al. Mathematical formulation of multilayer networks[J]. *Physical Review X*, 2013, 3(4): No. 041022.
- [20] Wu M, He S, Zhang Y, et al. A tensor-based framework for studying eigenvector multicentrality in multilayer networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(31): 15407-15413.
- [21] 周凌风, 蒋惠园. 城市公共交通多层网络重要节点识别方法[C]//2024世界交通运输大会(WTC2024)论文集(运输规划与航空运输), 中国, 青岛, 2024:

- 35-41.
- [22] Testa A C, Furtado M N, Alipour A. Resilience of coastal transportation networks faced with extreme climatic events[J]. *Transportation Research Record*, 2015, 2532(1): 29-36.
- [23] Miller-Hooks E, Zhang X, Faturechi R. Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks[J]. *Computers and Operations Research*, 2012, 39(7): 1633-1643.
- [24] 陈沿伊, 钟惠林, 吉立, 等. 内河集装箱运输网络韧性评估——以川渝地区为例[C]//2023世界交通运输大会(WTC2023)论文集(下册), 中国, 武汉, 2023: 414-419.
- [25] Adjetey-Bahun K, Planchet J L, Birregah B, et al. Railway transportation system's resilience: Integration of operating conditions into topological indicators[C]//NOMS 2016-2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Istanbul, Turkey, 2016: 1163-1168.
- [26] 吕彪, 谢智宇, 康宇翔, 等. 基于动态分流元胞传输模型的城市道路网络韧性评估[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(6): 134-143, 211.
Lv Biao, Xie Zhi-yu, Kang Yu-xiang, et al. Resilience assessment on urban road network by dynamic shunt cell transmission model[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(6): 134-143, 211.
- [27] 徐鹏程, 路庆昌, 李静, 等. 连续暴雨灾害下道路网络时变韧性建模与分析[J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2024, 57(11): 1610-1618.
Xu Peng-cheng, Lu Qing-chang, Li Jing, et al. Research on modeling and analysis of time-varied resilience of road network under continuous rainstorm disasters[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2024, 57(11): 1610-1618.
- [28] D'Lima M, Medda F. A new measure of resilience: an application to the London underground[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 81: 35-46.
- [29] Chen J, Liu J, Peng Q, et al. Resilience assessment of an urban rail transit network: a case study of Chengdu subway[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, 586: No. 126517.
- [30] 吴鹏, 李得伟. 时空视角下城市群铁路客运网络抵抗韧性[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2024, 64(11): 1860-1869.
Wu Peng, Li De-wei. Resistance resilience of railway passenger transport networks in urban agglomerations from a spatiotemporal perspective[J]. *J Tsinghua Univ (SCI & Technol)*, 2024, 64(11): 1860-1869.
- [31] Li W, Asadabadi A, Miller-Hooks E. Enhancing resilience through port coalitions in maritime freight networks[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2022, 157: 1-23.
- [32] 黄信, 杨立志, 张永康, 等. 暴雨灾害下机场基础设施网络韧性恢复策略研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2025, 51(3): 35-36.
Huang Xin, Yang Li-zhi, Zhang Yong-kang, et al. Research on resilience recovery strategy of airport infrastructure network under rainstorm disaster[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2025, 51(3): 35-36.
- [33] He Z, Navneet K, van Dam W, et al. Robustness assessment of multimodal freight transport networks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 207: No. 107315.
- [34] Su Z, Lee E, Du K, et al. Resilient bus services design in a multimodal network with uncertain metro system disruption[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2025, 174: No. 105118.
- [35] Soltani-Sobh A, Heaslip K, El Khoury J. Estimation of road network reliability on resiliency: an uncertain based model[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2015, 14: 536-544.
- [36] Bi W, MacAskill K, Schooling J. Old wine in new bottles? Understanding infrastructure resilience: Foundations, assessment, and limitations[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023, 120: No. 103793.
- [37] Gonçalves L, Ribeiro P J G. Resilience of urban transportation systems. Concept, characteristics, and methods[J]. *Journal of Transport Geography*, 2020, 85: No. 102727.
- [38] Tero A, Takagi S, Saigusa T, et al. Rules for biologically inspired adaptive network design[J]. *Science*, 2010, 327(5964): 439-442.
- [39] Hosseini S, Barker K. Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: a case study of inland waterway ports[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 93: 252-266.
- [40] 黄建中, 胡刚钰, 石佳宁, 等. 城市交通系统的韧性研究: 概念、特征与议题[J]. *城市规划*, 2025, 49(2): 119-130.
Huang Jian-zhong, Hu Gang-yu, Shi Jia-ning, et al. Research on resilience of urban transportation system:

- Concept, characteristics, and important issues[J]. *City Planning Review*, 2025, 49(2): 119-130.
- [41] 马书红, 武亚俊, 陈西芳. 城市群多模式交通网络结构韧性分析——以关中平原城市群为例[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2022, 62(7): 1228-1235.
- Ma Shu-hong, Wu Ya-jun, Chen Xi-fang. Structural resilience of multimodal transportation on networks in urban agglomerations: a case study of the Guanzhong Plain urban agglomeration network[J]. *Journal of Tsinghua University (SCI & Technol)*, 2022, 62(7): 1228-1235.
- [42] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [43] 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 Jie-fei, Ren Gang, Ma Jing-feng, 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.
- [44] 陈津怡, 李铁柱, 郭竞文, 等. 相继故障下城市轨道交通系统韧性评估方法[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(9): 202-208.
- Chen Jin-yi, Li Tie-zhu, Guo Jing-wen, et al. Resilience assessment method of urban rail transit system under cascading failure[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(9): 202-208.
- [45] 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 Da-wei, 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.
- [46] 马壮林, 程会媛, 邵逸恒, 等. 大客流干扰下多层公交-地铁网络的韧性评估[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(6): 267-278.
- Ma Zhuang-lin, Cheng Hui-yuan, Shao Yi-heng, et al. Resilience assessment of multilayer bus-metro network under large passenger flow interference[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(6): 267-278.
- [47] 程光权, 陆永中, 张明星, 等. 复杂网络节点重要度评估及网络脆弱性分析[J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(1): 120-127.
- Cheng Guang-quan, Lu Yong-zhong, Zhang Ming-xing, et al. Node importance evaluation and network vulnerability analysis on complex network[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(1): 120-127.
- [48] Fang C, Chu Y, Fu H, et al. On the resilience assessment of complementary transportation networks under natural hazards[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 109: No. 103331.
- [49] Zhang D, Du F, Huang H, et al. Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example[J]. *Safety Science*, 2018, 106: 230-243.
- [50] Zhang J, Hu F, Wang S, et al. Structural vulnerability and intervention of high speed railway networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2016, 462: 743-751.
- [51] Cats O, Krishnakumari P. Metropolitan rail network robustness[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 549: No. 124317.
- [52] 邵志豪. 暴雨内涝条件下城市道路-轨道交通网络抗涝韧性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学智慧城市学院, 2024.
- Shao Zhi-hao. Study on flood resistance toughness of urban road-rail transit network under rainstorm water-logging conditions[D]. Chongqing: School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [53] Yadav N, Chatterjee S, Ganguly A R. Resilience of urban transport network-of-networks under intense flood hazards exacerbated by targeted attacks[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): No. 10350.
- [54] Kasmalkar I G, Serafin K A, Miao Y, et al. When floods hit the road: resilience to flood-related traffic disruption in the San Francisco Bay Area and beyond [J]. *Science Advances*, 2020, 6(32): No. eaba2423.
- [55] 申皓, 张锦, 陈朗, 等. 复杂环境下工程物流网络级联失效抗毁性研究[J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(8): 3036-3045.
- Shen Hao, Zhang Jin, Chen Lang, et al. Investigating the resilience of engineering logistics networks against cascade failures in complex environments[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(8): 3036-3045.
- [56] Gade P M, Hu C K. Synchronous chaos in coupled map lattices with small-world interactions[J]. *Physical Review E*, 2000, 62(5): 6409-6413.
- [57] 黄爱玲, 徐笑涵, 关伟, 等. 基于加权耦合映像格子的地铁网络稳定性演化研究[J]. *交通运输系统工程*

- 与信息, 2021, 21(3): 140-149.
- Huang Ai-ling, Xu Xiao-han, Guan Wei, et al. Evolution of metro network stability based on weighted coupled map Lattice[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(3): 140-149.
- [58] 王秋玲, 朱璋元, 陈红, 等. 基于CML的级联失效下异质多层交通网络节点抵抗特性研究[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(1): 263-274.
- Wang Qiu-ling, Zhu Zhang-yuan, Chen Hong, et al. Node resistance characteristic of heterogeneous multi-layer transportation networks under cascading failure based on coupled map lattice[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(1): 263-274.
- [59] 路庆昌, 任永全, 李静, 等. 考虑临界密度的道路网络混合交通流级联失效[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2025, 55(2): 514-522.
- Lu Qing-chang, Ren Yong-quan, Li Jing, et al. Cascading failures of mixed traffic flows in road networks considering critical density[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2025, 55(2): 514-522.
- [60] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. *网络科学导论*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [61] 戈佳威, 袁克镖, 殷明, 等. 传播动力学视角下集装箱海运网络关键港口节点识别[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(4): 256-262.
- Ge Jia-wei, Yuan Ke-biao, Yin Ming, et al. Identifying important ports in container liner shipping network: a perspective from spreading dynamic theory[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(4): 256-262.
- [62] 张英贵, 肖杨, 雷定猷, 等. 长大货物多式联运网络风险传播动力学仿真[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(1): 14-23.
- Zhang Ying-gui, Xiao Yang, Lei Ding-you, et al. Risk propagation dynamics simulation on multimodal transport network for oversize and heavyweight Cargo[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(1): 14-23.
- [63] 王正武, 彭烁, 黄中祥, 等. 城市道路交通网络级联失效的灾害蔓延动力学模型[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(3): 1-4.
- Wang Zheng-wu, Peng Shuo, Huang Zhong-xiang, et al. Disaster sprawling dynamics model for the cascading failure in urban road traffic network[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(3): 1-4.
- [64] 雷凯, 朱晓宁, 侯键菲. 多式联运网络风险传播建模与仿真[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, 16(3): 21-27.
- Lei Kai, Zhu Xiao-ning, Hou Jian-fei, et al. Modeling and simulation of risk communication in multimodal transportation networks[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2016, 16(3): 21-27.
- [65] Deng Y X, Liu S Y, Zhou D. Dependency cluster analysis of urban road network based on percolation[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 154: No. 104264.
- [66] Zeng G, Gao J, Shekhtman L, et al. Multiple metastable network states in urban traffic[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(30): 17528-17534.
- [67] Guo J, Xu J, He Z, et al. Research on risk propagation method of multimodal transport network under uncertainty[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2021, 563: No. 125494.
- [68] 司志远, 陈章利, 贾玲, 等. 极端降水事件下城市道路网络级联失效研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(4): 792-799.
- Si Zhi-yuan, Chen Zhang-li, Jia Ling, et al. Study on cascading failures of urban road networks under extreme precipitation events[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(4): 792-799.
- [69] Hong B, Bonczak B J, Gupta A, et al. Measuring inequality in community resilience to natural disasters using large-scale mobility data[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): No. 1870.
- [70] Yin J, Ren X, Liu R, et al. Quantitative analysis for resilience-based urban rail systems: a hybrid knowledge-based and data-driven approach[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 219: No. 108183.
- [71] Wong A, Tan S, Chandramouleeswaran K R, et al. Data-driven analysis of resilience in airline networks[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 143: No. 102068.
- [72] Wang L, Zhang S, Szűcs G, et al. Identifying the critical nodes in multi-modal transportation network with a traffic demand-based computational method[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 244: No. 109956.
- [73] Colon C, Hallegatte S, Rozenberg J. Criticality analysis of a country's transport network via an agent-based supply chain model[J]. *Nature Sustainability*,

- 2021, 4(3): 209-215.
- [74] 林耿楠. 城市道路网络路径及容量冗余度研究[D]. 长沙: 长沙理工大学交通学院, 2019.
Lin Geng-nan. Research on route and capacity redundancy of urban road network[D]. Changsha: School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [75] Zhang X, Miller-Hooks E, Denny K. Assessing the role of network topology in transportation network resilience[J]. *Journal of Transport Geography*, 2015, 46: 35-45.
- [76] Fan D, Sun B, Dui H, et al. A modified connectivity link addition strategy to improve the resilience of multiplex networks against attacks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 221: No. 108294.
- [77] Wandelt S, Shi X, Sun X. Estimation and improvement of transportation network robustness by exploiting communities[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 206: No. 107307.
- [78] Xu X, Chen A, Xu G, et al. Enhancing network resilience by adding redundancy to road networks[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 154: No. 102448.
- [79] 李毅. 基于数据驱动的暴雨天气下城市道路交通系统韧性测度与提升研究[D]. 西安: 长安大学运输工程学院, 2023.
Li Yi. Data-driven study on measuring and enhancing the resilience of urban road transportation system under rainstorm condition[D]. Xi'an: School of Transportation Engineering, Chang'an University, 2023.
- [80] Guo J, Du Q, He Z. A method to improve the resilience of multimodal transport network: location selection strategy of emergency rescue facilities[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 161: No. 107678.
- [81] Lehmann J, Bernasconi J. Stochastic load-redistribution model for cascading failure propagation[J]. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2010, 81(3): No. 031129.
- [82] 赵成勇, 马飞, 崔睿颖, 等. 都市圈多模式交通网络建模及集成韧性测度研究[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2025, 65(10): 1930-1944.
Zhao Cheng-yong, Ma Fei, Cui Rui-ying, et al. Metropolitan area multimodal transportation network modeling and integrated resilience measurement[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2025, 65(10): 1930-1944.
- [83] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(6): No. 065102.
- [84] Chen L, Miller-Hooks E. Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport[J]. *Transportation Science*, 2012, 46(1): 109-123.
- [85] 王淑良, 陈辰, 张建华, 等. 基于复杂网络的关联公共交通系统韧性分析[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2022, 19(4): 47-54.
Wang Shu-liang, Chen Chen, Zhang Jian-hua, et al. Resilience analysis of public interdependent transport system based on complex network[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2022, 19(4): 47-54.
- [86] 路庆昌, 刘鹏, 秦汉, 等. 考虑路段恢复差异的道路网络恢复决策优化[J]. *上海交通大学学报*, 2024, 58(7): 1118-1129.
Lu Qing-chang, Liu Peng, Qin Han, et al. Optimization of road network recovery decisions considering road section recovery differences[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2024, 58(7): 1118-1129.
- [87] Mao X, Zhou J, Yuan C, et al. Resilience-based optimization of postdisaster restoration strategy for road networks[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021(1): No. 8871876.
- [88] Xu C, Xu X. A two-stage resilience promotion approach for urban rail transit networks based on topology enhancement and recovery optimization[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2024, 635: No. 129496.
- [89] Salman F S, Yücel E. Emergency facility location under random network damage: insights from the Istanbul case[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 62: 266-281.
- [90] 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 Shu-jun, Wang Xiao-kun. Resilience assessment and recovery strategy of metro network under emergencies[J]. *Railway Transport and Economy*, 2025, 47(2): 161-171.
- [91] 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 Wen-jie, HU Jun-hong, Wen Cheng-wei, et al. Research on urban rail failure recovery considering network resilience[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(4): 179-186.
- [92] Li Z, Jin C, Hu P, et al. Resilience-based transportation network recovery strategy during emergency recovery phase under uncertainty[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, 188: 503-514.