

交通事故影响下的城市局部路网脆弱性研究

王倩, 孙泰屹*

武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年9月12日; 录用日期: 2023年11月28日; 发布日期: 2023年12月6日

摘要

脆弱性研究是研究城市道路运输系统干扰应对能力的关键性课题。本文通过建立武汉市江汉区局部路网模型, 结合攻击模型, 基于历史事故数据确定攻击策略, 提出不同攻击策略下, 以全局网络效率、局部网络效率和最大连通度为评价指标的城市局部路网脆弱性分析方法。结果表明: 基于历史事故数据可以有效判别事故影响下的城市局部路网的脆弱性, 且城市局部道路网络在交叉口发生交通事故时, 表现出强于路段上发生事故的脆弱性。最后根据判别结果提出了部分建议, 以期增强道路系统的抗干扰能力和通行安全性。

关键词

城市道路网络, 脆弱性研究, 攻击模型, 交通安全

Study on the Vulnerability of Urban Local Road Network under the Influence of Traffic Accidents

Qian Wang, Taiyi Sun*

School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Sep. 12th, 2023; accepted: Nov. 28th, 2023; published: Dec. 6th, 2023

Abstract

Vulnerability research is a key topic to study the interference response ability of urban road

*通讯作者。

transportation systems. This paper establishes a local road network model in Jiangnan District, Wuhan City, combines the attack model, determines the attack strategy based on historical accident data, and proposes an urban local road network vulnerability analysis method with global network efficiency, local network efficiency and maximum connectivity as evaluation indicators under different attack strategies. The results show that based on historical accident data, the vulnerability of the urban local road network under the impact of the accident can be effectively judged, and the urban local road network shows stronger vulnerability than the accident on the road section when there is a traffic accident at the intersection. Finally, some suggestions are put forward according to the judgment results, in order to enhance the anti-interference ability and traffic safety of the road system.

Keywords

Urban Road Network, Vulnerability Research, Attack Model, Transportation Safety

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

道路交通是经济发展的基础。近年来,道路交通事故频发,且表现出一定的时空特性[1][2]。一旦发生大型事故将给道路交通体系带来巨大的压力。因此,交通网络在干扰下的脆弱性表现,受到了越来越多的关注。Wang 等人[3]考虑交通态势,提出了一种城市路网的级联失效脆弱性评价方法;宋英华等人[4]模拟内涝故障,评价了武汉市公交-地铁双层交通网络的脆弱性;李玉枝[5]结合流量转移模型研究了武汉市中心城区的公交-地铁复合交通网络的脆弱性;张琳等人[6]结合复杂网络和空间信息嵌入,分析了南京市公交-地铁网络的脆弱性;何明卫等人[7]以网络连通度下降比例和网络效率下降比例为指标,提出一种考虑列车折返的城市轨道交通网络结构脆弱性的评价方法;万丹等人[8]基于复杂网络建立了多维度的城市轨道交通网络脆弱性评价体系;冯骁[9]基于换乘网络构建高铁航空运输网络,提出了一种极端事件下的高铁航空运输网络脆弱性分析方法;李涛[10]结合复杂网络和超网络理论,建立了多层次视角下的动态高铁网络模型,并从致灾因子与网络失效的关系出发,提出一种多层次视角下的高铁网络脆弱性评估方法;李梦筠[11]基于多种运输方式,以失效概率和结构功能为测度指标,研究危险品复合运输网络的脆弱性;牟能冶等人[12]以网络连通度、全局网络效率和局部网络效率为指标,构建了突发事件影响下的城市快递网络脆弱性评价方法;程擎[13]等人结合时序网络理论,提出了一种新冠疫情影响下的航线网络鲁棒性评价方法等等。

已有研究表明,学者们多侧重于复合网络、轨道交通网络、城际铁路网络等特定网络,鲜少关注局部道路网络。但是在城市中,由于服务功能和经济水平等方面的差异,不同区域道路交通呈现出不同的特点。因此,进行分区研究对于准确了解和把握区域交通特点,针对性地制定管理方案,促进城市交通系统的高效运行和可持续发展具有十分重要的意义。

基于此,本文选取武汉市江汉区为研究对象,基于攻击模型,结合江汉区某年历史交通事故数据制定攻击策略,研究交通事故影响下的局部路网脆弱性。通过不同攻击策略模拟事故对路网的影响,提出一种事故影响下的局部路网的脆弱性评价方法,以期提高城市交通系统对交通事故等其他突发事件的应对能力和适应能力,保障道路交通安全、促进城市交通的可持续发展。

2. 城市交通事故对局部路网的影响机理及分析方法

2.1. 交通事故的扩散规律

在城市道路中, 交通事故的发生地点主要是在路段上和交叉口内, 并且由此产生的交通拥挤的扩散规律也不尽相同。

路段上发生交通事故后, 会在事故路段发生占道, 车辆由此开始排队, 从而产生原发性拥挤。特别地, 当车辆在事故路段上排队长度逐渐增加, 并向上游的交叉口延伸, 开始影响上游交叉口的车辆进入该路段, 继而产生继发性拥挤。随着事故持续时间的增加, 交通需求不断增长, 产生原发性交通拥挤的路段上游的交叉口和产生继发性交通拥挤所在路段上游的交叉口车流相继受阻, 影响交叉口的其他车流流出再次产生拥挤, 拥挤不断加剧, 影响范围也逐渐扩大, 从而影响到局部路网的通行能力。

当交叉口发生交通事故后, 会根据交叉口的形式和特点迅速向周围产生影响, 并且相较于路段上的事故更容易产生瓶颈路段。若事故得不到及时处理, 拥堵会持续扩散进而蔓延到整个路网, 严重者会造成城市交通系统的大范围瘫痪。

2.2. 对局部路网脆弱性的影响机理

结合 2.1 节中交通事故的扩散规律, 提出交通事故影响下的局部路网脆弱性的研究内容。

在结构层面, 交通事故导致网络中路段中断、节点中断甚至节点失效, 导致网络的连通性下降, 表现出较强的脆弱性; 在功能层面, 由于结构破坏, 网上交通流的运行受到限制, 导致网上车辆的平均行程速度降低、延误进一步增大, 平均旅程时间增大, 网络效率降低, 网络性能下降, 脆弱性增大。

在本文中, 主要研究交通事故导致的网络中节点和路段失效对路网效率及连通程度的影响, 并将指标突变的点(边)视为关键点(边)。针对实验结果, 提出改善建议和管理措施, 从而降低局部网络的脆弱性, 提高整个局部网络的抗干扰能力和抗风险能力, 进而保证道路网络的交通安全。

2.3. 分析方法及评价指标

2.3.1. 分析方法

本文采用攻击模型对局部网络的脆弱性进行评估。攻击模型是一种安全模型, 目前已经被广泛应用于路网的鲁棒性、脆弱性和恢复能力研究中。通过模拟不同攻击事件, 可以分析路网在不同攻击情景下的表现, 并指导路网设计、交通调度和应急响应规划等。

采用攻击模型进行脆弱性评价的主要步骤如下:

- 1) 构建局部路网模型。采用原始法将局部路网抽象为网络模型, 即每个节点代表一个交叉口, 边代表道路路段。
- 2) 建立攻击模型。根据实际情况和实验需求, 确定不同的攻击策略并进行模拟试验。
- 3) 确定评价指标。根据网络脆弱性的内涵确定评价指标, 并通过模拟实验计算相应的指标值。本文中选取全局网络效率、最大连通度和局部网络效率作为脆弱性的衡量指标。
- 4) 提出建议。根据评估结果, 提出相应的管理对策, 以期提高局部路网的稳定性和安全性。

2.3.2. 评价指标

在本文中为了准确了解和把握区域道路网络特性, 将局部路网视为中观整体, 采用全局网络效率、最大连通度和局部网络效率共同衡量网络的脆弱性。

1) 全局网络效率

全局网络效率是用来衡量网络中节点之间传递的效率指标, 考虑了网络中所有节点之间的连接, 一

般通过最短路径长度来计算。可以反映事故影响下的区域道路网络的连通性, 如式(1):

$$E_{\text{efficiency}} = \sum \varepsilon_{ij} / N(N-1) \quad (1)$$

式中, $\varepsilon_{ij} = 1/d_{(i,j)}$ 表示节点 i 和 j 之间最短路径的倒数, $d_{(i,j)}$ 为节点 i 和 j 之间的最短路径, N 为网络中节点的总数。

2) 最大连通度

最大连通度是指网络中具有的最大节点数的连通分量的大小。它表示在网络中随机或有目的地删除节点或边后, 网络保持连接性的程度, 是衡量网络脆弱性的重要指标。由于最大连通度没有特定的计算公式, 本文基于图算法进行计算。

3) 局部网络效率

局部网络效率是用来衡量网络局部连通性的指标, 侧重于衡量节点周围子图的连通性, 通过每个节点和邻居节点的连接数量和邻居节点的总数来计算。可以反映事故发生位置周围的网络的连通性, 如式(2):

$$E_{\text{local_efficiency}} = E_{\text{local}} / N_{\text{local}} \quad (2)$$

式中, E_{local} 表示节点 i 的邻居节点之间的连接数量, N_{local} 表示邻居节点的总数。

3. 局部路网攻击模型建立

3.1. 攻击原则

根据 2.3 节中的分析方法, 为了保证研究的合理性, 本文再进行适当的假设。

假设 1: 假设每起事故造成的后果相同, 均为事故路段失效, 事故点下游严重拥堵, 车辆放弃排队等待时间, 重新选择新的路径。

假设 2: 假设事故发生在交叉口时, 事故交叉口及与该交叉口相邻的路段均失去原有功能。

假设 3: 假设事故发生在路段上时, 事故路段及与该路段相邻的交叉口均失去原有功能。

基于上述假设, 文本设定节点和边遭受攻击后遵循的原则为: 节点或边遭受攻击时, 该攻击为理想化的一次攻击。进行攻击时, 主要是通过删除节点或边的方式, 且删除后的节点和与该节点相邻的边或删除后的边和与该边相邻的节点会一并删除。攻击完成后, 按照初始重要度排序进行下一次攻击, 直至攻击结束。

3.2. 攻击策略

攻击方式主要有随机攻击和蓄意攻击两种, 本文主要采用的攻击策略有四种, 即随机节点攻击、随机边攻击、蓄意节点攻击和蓄意边攻击。不同攻击策略下, 攻击的先后顺序稍有不同, 但都是按照重要度从大到小的顺序进行逐次攻击。本文所采用的重要度排序方法, 主要是基于历史事故数据, 将历史事发地点与最接近的节点或边进行匹配, 按照匹配数量的大小进行重要度排序, 匹配值越大, 认为其重要度越大, 攻击时越先被攻击, 具体如下:

随机节点(边)攻击: 随机选择节点(或边)进行攻击, 每个节点(或边)的重要度大小一致, 被攻击的概率相等, 计算相关指标后, 随机进行下一次攻击, 不断重复此过程, 直至试验结束。

蓄意节点攻击: 按照历史事故数据与网络中最接近节点的匹配结果, 取最大值进行首次攻击, 计算相关指标后, 按照初始重要度排序进行下一次攻击, 不断重复此过程, 直至试验结束。

蓄意边攻击: 建立网络边数据的几何对象, 按照历史事发地与网络中最接近边的匹配结果, 取最大值进行首次攻击, 计算相关指标后, 按照初始重要度排序进行下一次攻击, 不断重复此过程, 直至试验

结束。

4. 实例分析

本文选取武汉市江汉区道路网络为研究对象, 建立路网模型和攻击模型, 分析不同攻击策略下的全局网络效率、最大连通度和局部网络效率变化, 找出影响路网脆弱性的关键节点, 并根据评价结果提出相关的管理建议, 以期提高局部网络的抗干扰能力。

4.1. 交通事故数据处理

4.1.1. 交通事故数据来源及处理

本文所使用的原始数据是湖北省武汉市江汉区某年 12 月份交通事故报警记录数据, 剔除有缺失信息、重复信息的样本后得到了 3207 条样本, 样本数据记录的信息有城市交通事故所处路段、事故情况简述、接警时间等信息。基于样本数据特征, 对其记录的事故所处路段进行 3 次不同拼接的地理逆编码, 并选取匹配度最高的一组作为本文中使用的坐标信息。由于逆编码存在误差, 本文对转码后的数据进行二次过滤、筛选, 最终得到了江汉区事故点数据有效样本 3192 条, 并将其导入 Arcgis 软件中, 如图 1 所示。



Figure 1. Accident distribution

图 1. 事故分布图

由图 1 可知, 历史事故地点分散, 但总体上, 常青路、发展大道、青年路和新华路等路段是事故高发路段, 约占该区域事故总数的 50%, 其中发展大道和青年路交叉口、常青路和发展大道交叉口、青年路和常青路交叉口、香港路和菱角湖路交叉口属事故高发路口; 红旗渠路、解放大道、姑嫂树路、唐家墩路以及香港路、沿江大道等路段均属事故频发路段。

4.1.2. 重要度计算

本文中使用 Python 软件将事故地点分别与路网上最近的点和边进行匹配, 计算网络中最近节点和最近边上历史事故数量的累加值, 并根据累加值的大小进行重要度排序, 认为累加值越大, 其重要度越大, 越先被攻击。处理后的节点数据如表 1 所示, 边数据如表 2 所示:

Table 1. Node data statistics table (partial)
表 1. 节点数据统计表(部分)

序号	OSMID	累加值	序号	OSMID	累加值
1	7154185733	148	2	4741736405	131
3	1540325309	111	4	648969839	75
...
443	1880396005	1	444	7154185739	1

Table 2. Statistical table of edge data (partial)
表 2. 边数据统计表(部分)

序号	nst_edge_u_v	累加值	序号	nst_edge_u_v	累加值
1	(7154185727, 7154185739)	150	2	(648969839, 3822227971)	132
3	(4741736405, 4860000710)	130	4	(1540325309, 3044755147)	112
...
420	(2168408833, 3824033006)	1	421	(1891195559, 1891195569)	1

4.2. 建立局部路网模型

本文研究所用的路网数据来源于开源地图网站 OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org>, 以下简称“OSM”)。在 OSM 官网上下载武汉市道路网络数据和江汉区行政区域边界数据, 并在 Python 软件中根据江汉区行政区域边界数据对武汉市道路网络数据进行剪裁, 得到本文的研究区域。

为了便于分析, 对剪裁后的网络进行必要的简化, 并对其进行连通性检验, 若网络是连通的则可以进行后续分析, 若不连通, 则需要对网络继续进行处理, 使其连通再进行后续工作。

本文中建立的江汉区局部路网模型已通过连通性检验, 共有 1477 个节点, 2204 条边。简化后的网络拓扑模型如图 2 所示。

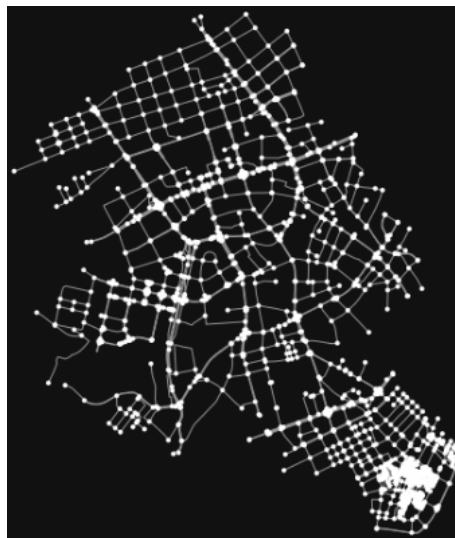


Figure 2. Simplified model of local road network in Jianghan District

图 2. 江汉区局部路网简化模型

4.3. 不同攻击策略下的脆弱性分析

由 4.1 节可知, 历史事故数据共匹配出 444 个节点, 421 条边, 为了确保结果的合理性, 本文在 Python 软件中, 设计三组模拟实验, 模拟不同策略下的节点损失程度、全局网络效率、局部网络效率和最大连通度变化情况, 每组实验累计攻击 400 次, 取三组实验的平均值, 结果如图 3 所示:

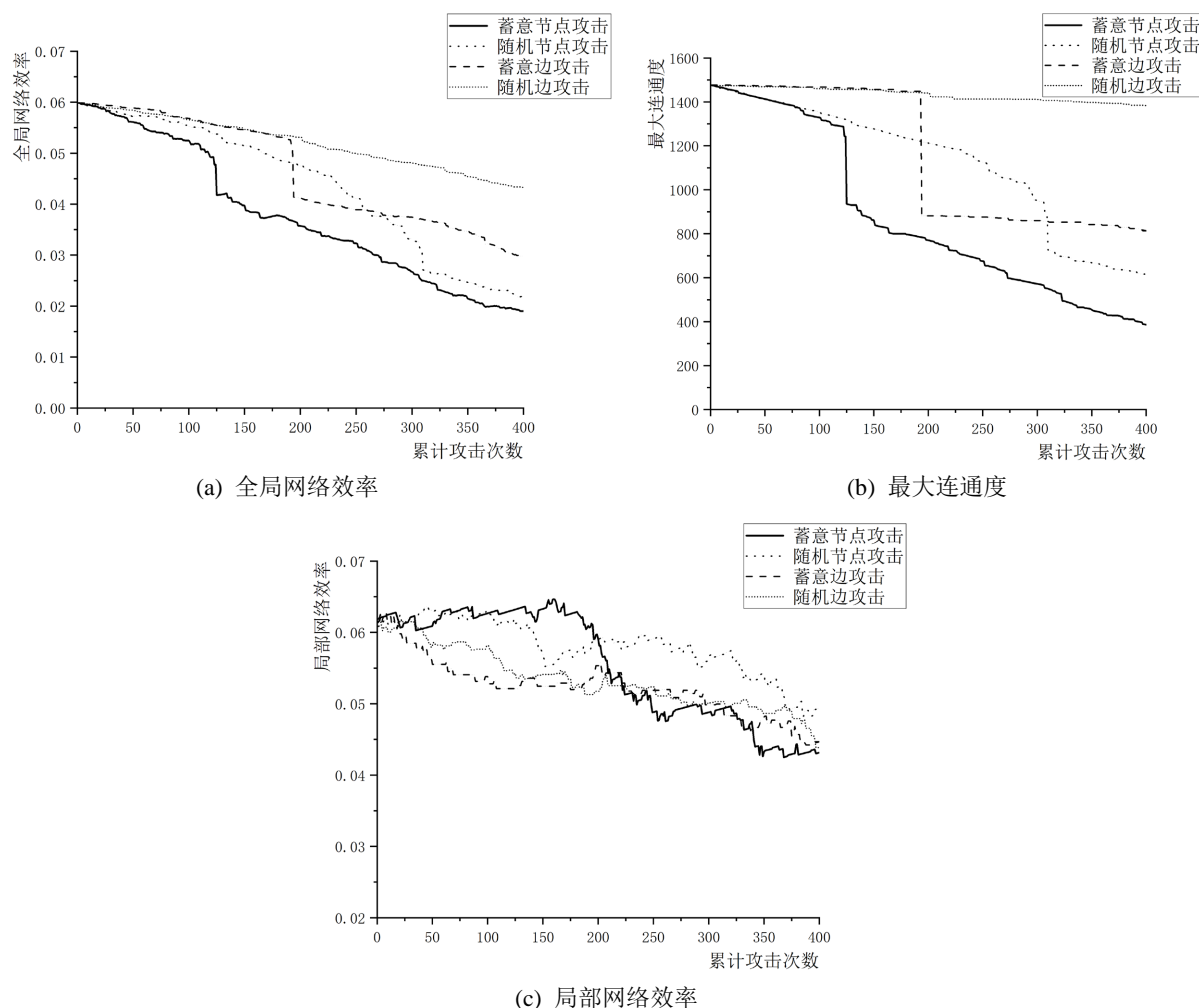


Figure 3. Changes in global network efficiency, maximum connectivity and local network efficiency under different node loss degrees. (a) Global network efficiency; (b) Maximum connectivity; (c) Local network efficiency

图 3. 不同节点损失程度下全局网络效率、最大连通度和局部网络效率变化图。(a) 全局网络效率; (b) 最大连通度; (c) 局部网络效率

由图 3(a)可知, 四种攻击策略下的全局网络效率均随攻击次数的增加而下降, 且总体上节点攻击后的全局网络效率下降程度大于边攻击, 这说明交叉口发生交通事故相较于路段上发生事故, 交叉口失效对路网性能的影响更大, 网络表现出更强的脆弱性; 蓄意攻击策略下均可以快速找到关键节点或路段, 且蓄意节点攻击策略下最先找到关键节点, 找出的关键节点为新华路与解放大道交叉口, 蓄意边攻击策略下找出的关键路段为江汉北路。

由图 3(b)可知, 四种攻击策略下的网络最大连通度均随攻击次数的增加而下降; 蓄意攻击下找出的关键位置与影响全局网络效率的关键位置相同; 但值得注意的是, 随机边攻击策略下的最大连通度变化

较小, 这可能是因为城市道路由于其本身的功能所在, 本身就具有良好的连通性, 偶尔某路段发生事故造成路段失效, 还存在其他的替代道路, 并不会给网络造成较大的影响。

由图 3(c)可知, 四种攻击策略下的局部网络效率随攻击次数的增加整体上呈现下降的趋势; 节点攻击策略下局部网络效率的变化幅度大于边攻击策略, 且蓄意节点攻击策略下的变化幅度最大; 蓄意边攻击策略下的变化幅度略大于随机边攻击。这表明, 路段上发生交通事故失效后, 由于交叉口还具有一定的通行能力, 车辆能够通过交叉口找到可替代的道路, 网络能保持较好的连通性, 表现出弱于交叉口失效的脆弱性。

4.4. 建议对策

根据 4.3 节的实验结果, 提出以下建议:

1) 注重保证交叉口的安全通行。交叉口是道路网络中的关键, 有关部门要及时更新、维护交叉口的交通设施, 有必要时可对交叉口的信号控制方式进行优化, 增设智能监控设施、渠化标线等, 规范交通运行, 降低混合交通事故发生率, 从而增强路网性能。

2) 兼顾路段的安全通行。有关部门要及时关注事故易发地段, 必要时增设警示标志、限速标志、加大巡查力度等, 以提高事故易发路段的安全性, 从而增强路网性能。

5. 总结

1) 本文的脆弱性分析方法以攻击模型为基础, 以全局网络效率、最大连通度和局部网络效率为评价指标, 指标的下降程度反映不同攻击策略下路网脆弱性的强弱, 下降程度越大, 表明网络越脆弱。

2) 实验结果表明, 基于历史事故数据进行路网脆弱性的研究是可行的, 且城市局部路网在交叉口发生交通事故时, 表现出强于路段上发生事故的脆弱性。

3) 在城市交通中, 路网性能的提升不仅要关注交叉口的通行功能, 也要兼顾路段的安全性, 有效发挥支路路段的“毛细血管”作用, 才能让城市道路交通网络运行更加安全顺适。

受制于事故记录数据的不全面, 对于事故类型、事故程度的判定等都存在一定的困难, 在以后的研究中, 需考虑不同事故类型、不同程度等因素对路网脆弱性的影响。

参考文献

- [1] Eckley, D.C. and Curtin, K.M. (2012) Evaluating the Spatiotemporal Clustering of Traffic Incidents. *Computers, Environment and Urban Systems*, **37**, 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2012.06.004>
- [2] 张道文, 母尧尧, 王朝健, 刘奇, 孙庆. 城市道路交通事故特性及严重程度研究[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(2): 599-605.
- [3] Wang, Z.Q., Pei, Y.L., Liu, J. and Liu, H.H. (2023) Vulnerability Analysis of Urban Road Networks Based on Traffic Situation. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, **41**, Article ID: 100590. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2023.100590>
- [4] 宋英华, 李玉枝, 霍非舟, 梅依云. 城区内涝条件下城市公交-地铁双层交通网络的脆弱性分析[J]. *安全与环境工程*, 2021, 28(2): 114-120.
- [5] 李玉枝. 城市公交-地铁复合交通网络脆弱性分析及修复[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [6] 张琳, 陆建, 雷达. 基于复杂网络和空间信息嵌入的常规公交-地铁复合网络脆弱性分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(4): 773-780.
- [7] 何明卫, 钱佳, 刘杰, 殷勇, 占曙光. 考虑列车折返的城市轨道交通网络脆弱性评估[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(8): 84-92.
- [8] 万丹, 郭倩, 邓良凯, 郭凯睿, 黄勇. 城市轨道交通网络脆弱性对比研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2021, 24(1): 60-64.

-
- [9] 冯骁. 极端事件下高铁航空运输网络脆弱性识别及改善理论研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.
 - [10] 李涛. 多层次视角下高铁网络脆弱性评估方法研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2022.
 - [11] 李梦筠. 危险品复合运输网络脆弱性测度研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2021.
 - [12] 牟能治, 康秋萍, 贾程方. 突发事件影响下的城市快递网络脆弱性评估[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(12): 125-132.
 - [13] 程擎, 王德超, 李怡恒. 新冠疫情影响下航线网络时序鲁棒性分析[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(12): 2710-2714+2814.