

中文引用格式:李卓,何瑞春,李文霞. 考虑时空动态特征的高速铁路网络鲁棒性评估[J]. 中国安全科学学报,2024,34(4):111-120.

英文引用格式:LI Zhuo, HE Ruichun, LI Wenxia. Robustness evaluation for high-speed railway network with spatiotemporal dynamic characteristics[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 111-120.

考虑时空动态特征的高速铁路网络鲁棒性评估*

李卓^{1,2}, 何瑞春^{**1}教授, 李文霞¹

(1 兰州交通大学 交通运输学院, 甘肃 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, 甘肃 兰州 730070)

中图分类号: X951 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.0648

基金项目: 国家自然科学基金资助(52162041); 甘肃省优秀研究生“创新之星”项目(2022CXZX-523)。

【摘要】 为有效评估高速铁路网络(HSRN)的运输服务性能,保障HSRN面对突发事件的可靠性,基于复杂网络理论,考虑高速铁路服务网络(HSRSN)的动态变化,将时间信息纳入HSRSN的建模,提出一种考虑时空动态特征的HSRN鲁棒性评估方法。基于中国高速铁路实证运行数据,验证考虑时空动态特征评估网络性能的必要性,并从时空维度上探究我国HSRN鲁棒性的分布特点。研究表明:不同站点所通过的列车流不同,网络鲁棒性表现出明显的空间分布差异性,且扰动场景不同,站点的列车频次和空间位置对站点重要性的贡献程度亦不同。扰动发生的时间和持续时间是影响网络鲁棒性的2个关键时间要素,其不同组合使网络鲁棒性具有显著的时间分布差异性,此外,扰动对不同时段的网络性能的影响程度不同,导致站点重要度排序在不同时段也存在较大波动性。

【关键词】 时空动态特征; 高速铁路网络(HSRN); 鲁棒性; 复杂网络理论; 时序网络效率

Robustness evaluation for high-speed railway network with spatiotemporal dynamic characteristics

LI Zhuo^{1,2}, HE Ruichun¹, LI Wenxia¹

(1 School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China;
2 Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: In order to effectively evaluate the transportation service performance of HSRN and ensure the reliability of HSRN in the face of emergencies, based on complex network theory, a robustness evaluation method considering temporal and spatial dynamic characteristics was proposed. The dynamic changes of HSRSN was considered, and time information was incorporated into the modeling of HSRSN. Based on empirical operation data of high-speed railways in China, the necessity of considering spatiotemporal dynamic characteristics to evaluate network performance was verified, and the distribution characteristics of HSRN robustness in China were explored from the spatiotemporal dimension. The experimental results show that the train flow passing through different stations is different, and the network robustness exhibits a significant spatial distribution difference. Moreover, the disturbance scenarios are different, and the

* 文章编号:1003-3033(2024)04-0111-10; 收稿日期:2023-10-11; 修稿日期:2024-01-16

** 通信作者:何瑞春(1969—),女,甘肃临洮人,博士,教授,主要从事铁路运输组织优化、网络建模等方面的研究。E-mail:herc@mail.lzjtu.cn。

contribution of train frequency and spatial position of stations to the importance of stations is also different. In addition, the occurrence time and duration of disturbances are two key time factors that affect network robustness. Their different combinations result in significant time distribution differences in network robustness. The impact of disturbances on network performance varies at different time periods, resulting in obvious fluctuations in station importance ranking at different time periods.

Keywords: spatiotemporal dynamic characteristics; high-speed railway network (HSRN); robustness; complex network theory; temporal network efficiency

0 引言

经过多年的规划建设,中国已基本形成以“八纵八横”为主通道,以区域城际铁路为补充的高速铁路网络(High-speed Rail Network, HSRN)^[1],随着网络化进程的加快,系统呈现出综合、动态、开放的复杂特征,使 HSRN 更容易受到突发事件扰动,造成大面积列车取消或延误,极大降低了铁路运输服务质量。因此,如何有效量化突发事件下 HSRN 的性能、准确评估 HSRN 的鲁棒性,对保障高速铁路可持续运行具有重要意义,也是铁路运维阶段亟待解决的现实问题。

复杂网络理论是将现实中的复杂系统抽象为网络结构的研究范式^[2]。不少学者基于复杂网络理论将铁路线网抽象为拓扑结构,通过分析拓扑特征评估其性能^[3],如连通性^[4]、可达性^[5-6]、拓扑网络效率^[7]等,进而基于上述指标研究铁路网络的鲁棒性^[8]。ZHANG Jianhua 等^[9]提出单位度介数评估铁路线路的运行能力,采用度和介数攻击节点,以评估 HSRN 的鲁棒性;马亮等^[10]在 L 空间下构建了铁路快捷货运网络,并分析网络的拓扑特性,提出基于综合重要度节点失效的鲁棒性分析方法;张振江等^[11]考虑线路等级、节点度值和介数建立了网络性能综合评价指标,分析了不同攻击方式下的铁路货运网络鲁棒性。为进一步量化扰动给旅客出行带来的影响,从运输服务功能性的角度出发,基于列车流构建服务网络评估网络性能,如 XIN Zhongling 等^[12]构建了物理网络和服务网络,在不同的攻击策略下评估 HSRN 的鲁棒性;LI Tao 等^[13]结合拓扑特征和功能特征,分别研究了站点和列车失效对 HSRN 的影响;JIAO Jingjuan 等^[14]以服务频率和运行时间构建了加权服务网络,验证了站点在不同失效时间对 HSRN 的影响程度不同;XIE Fengjie 等^[15]认为高铁出行路径之间具有依赖性,将非马尔可夫高阶模型与多层网络相结合评估站点和线路的重要性;HONG Liu 等^[16]通过列车延误来量化中断对网络性

能的影响,评估了 HSRN 的时空脆弱性。从本质上讲,高速铁路服务网络(High-speed Rail Service Network, HSRSN)是由不同时间段开行的异质列车流构成,网络中服务边具有时间属性,其拓扑结构在时间维度上动态变化^[17]。综上,尽管已有学者基于线网结构^[9-11]和列车流^[12-16]研究了 HSRN 的鲁棒性,但未考虑其动态特征,还存在以下问题:①不能刻画真实服务网络,而是对服务网络在时间维度上集计生成的聚合图;②忽略列车流的异质性,丢失了网络的时序信息。截至目前,尚未发现探讨符合 HSRN 动态特征的鲁棒性评估问题。

鉴于此,笔者拟结合列车实证运行数据,构建高速铁路动态服务网络,采用扰动前后时序网络效率下降比例来量化网络性能损失,提出考虑时空动态特征的 HSRN 鲁棒性评估方法。并以中国 HSRN 为例,在站点功能失效和设施中断 2 个场景下,通过模拟仿真探究 HSRN 鲁棒性的时空分布差异性,以期对铁路运维提供决策依据。

1 HSRN 鲁棒性评估模型

1.1 基于时刻表构建高速铁路动态服务网络

为满足旅客出行需求的多元化,我国铁路客运产品具有显性差异特征。图 1 为一个由 4 趟列车和 5 个站点构成的列车运行图,列车采用非均匀发车间隔、跨站越行等灵活运输组织模式,使 HSRSN 在时间维度上表现为动态变化。因此,有必要考虑 HSRSN 的时空演化,并将时间信息纳入服务网络中建模。

基于上述特征,充分考虑列车流的异质性,车站间的连接事件用五元组 (V_i, V_j, d_i, a_j, r) 表示,其中, d_i 为列车 r 从站点 V_i 的出发时间; a_j 为站点 V_j 的到站时间。为便于从网络层面表达上述连接关系,在时间维度上重构 HSRSN, 站点拓展为具有不同时间属性的时空节点序列,引入运行弧和换乘弧 2 类服务边,构建高速铁路动态服务网络。高速铁

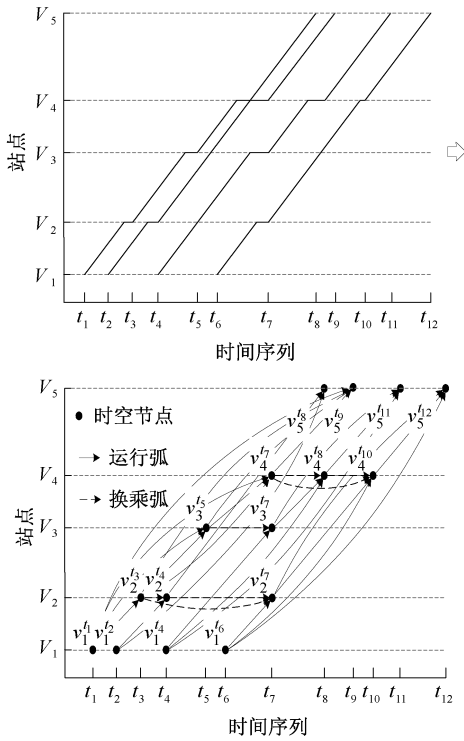


图1 构建高速铁路动态服务网络

Fig.1 Construction of dynamic service network of high-speed railway

路动态服务网络定义为有向图 $G = (V, E, W)$, $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 为站点集合, n 为站点数, 为减小网络规模, 仅考虑列车的出发事件, 依据经停站点 V_i 各次列车的出发时间序列 $T_{V_i} = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, 站点 V_i 被拓展为时空节点集合 $V_i = \{v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^m\}$, m 为站点 V_i 的发车数, 时空节点的时间属性和位置属性以上下标的形式体现, 如 v_i^m 表示站点 V_i 在 t_m 时刻的列车出发事件. $E = \{E_{V_j}^{V_i} \cup \tilde{E}_{V_i}^{V_j} \mid V_i, V_j \in V\}$ 为网络服务边集合, 若同一趟列车经停站点 V_i 和 V_j , 则 2 个站点的运行弧集合为 $E_{V_j}^{V_i} = \{e(v_i^{t_k}, v_j^{t_l}) \mid v_i^{t_k} \in V_i, v_j^{t_l} \in V_j, t_k < t_l\}$, 若先后到发的 2 趟列车均经停站点 V_i , 且满足换乘接续条件, 则站点 V_i 的换乘弧集合为 $\tilde{E}_{V_i}^{V_i} = \{\tilde{e}(v_i^{t_k}, v_i^{t_l}) \mid v_i^{t_k}, v_i^{t_l} \in V_i, t_k + t' < t_l\}$, 其中, t' 为换乘接续最小时间. $W = \{W_{V_j}^{V_i} \cup \tilde{W}_{V_i}^{V_i} \mid V_i, V_j \in V\}$ 为服务边的权重集合, 其中, $W_{V_j}^{V_i} = \{w(v_i^{t_k}, v_j^{t_l}) \mid v_i^{t_k} \in V_i, v_j^{t_l} \in V_j, t_k < t_l\}$ 为运行弧权重集合, $\tilde{W}_{V_i}^{V_i} = \{\tilde{w}(v_i^{t_k}, v_i^{t_l}) \mid v_i^{t_k}, v_i^{t_l} \in V_i, t_k + t' < t_l\}$ 为换乘弧权重集合.

1.2 HSRN 鲁棒性评估

借鉴既有研究, 将 HSRN 的鲁棒性定义为在不同扰动场景下网络维持其运输服务效率的能力, 其鲁棒性越高, HSRN 对干扰的抵抗能力越强. 要量化网络的鲁棒性, 先要确定网络性能指标. 网络效率能够从全局视角量化扰动对 HSRN 性能带来的影响, 是一个系统性指标, 具有较好的解释性和综合性, 因此, 已有研究普遍基于复杂网络理论, 使用网络效率作为性能指标^[8,11]. 基于此, 考虑 HSRN 的服务功能性, 以旅行时间量化扰动对 HSRN 中出行者造成的影响, 则静态服务网络效率 E 的计算方式为:

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{V_i \in V, V_i \neq V_j, V_j \in V} \frac{1}{T_{ij}^{sp}} \quad (1)$$

式中: V 为站点集合; V_j 为不同的站点; T_{ij}^{sp} 为站点 V_i 到 V_j 最短时空路径长度. 通过最小旅行时间量化, 表示为:

$$T_{ij}^{sp} = \min_{V_i \neq V_j \in V, p \in P_{ij}} (t_{jp}^a - t_{ip}^d) \quad (2)$$

式中: P_{ij} 为站点间路径集合; t_{jp}^a 为沿路径 $p \in P_{ij}$ 到达站点 V_j 的时间, $\min; t_{ip}^d$ 为从站点 V_i 的出发时间, \min .

与静态服务网络不同, 高速铁路动态服务网络引入了时间要素, 将网络节点在时间维度上进行拓展, 有效捕捉网络的动态变化特征, 能够在时间和空间上描述真实的 HSRSN. 在动态服务网络框架下, 时刻 t 的网络效率 $E(t)$ 表示为:

$$E(t) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{V_i \in V, V_i \neq V_j, V_j \in V} \frac{1}{T_{ij}^{sp}(t)} \quad (3)$$

式中 $T_{ij}^{sp}(t)$ 为在 t 出发从站点 V_i 到 V_j 最短时空路径长度.

由于高铁基础线网在不同时刻承载的列车流不同, 网络性能亦不同, 网络效率在时间维度上表现为持续变化. 基于上述分析, 从我国高铁实际运营角度出发, 充分考虑全时间尺度上高铁网络的累积性能, 提出时序网络效率来反映评估时段内的网络性能, 考虑时间的连续性, 在时段 $[T_a, T_b]$ 内, 则未发生扰动下的时序网络效率 \tilde{E} 表示为:

$$\tilde{E} = \int_{T_a}^{T_b} E(t) dt \quad (4)$$

扰动事件 e 发生后, 时序网络效率 $\tilde{E}(e)$ 表示为:

$$\tilde{E}(e) = \int_{t_b}^{t_a} E(t|e) dt \quad (5)$$

式中 $E(t|e)$ 为在扰动事件 e 影响下 t 时刻的网络效率。

基于此,通过计算扰动前后时序网络效率下降比例,量化网络的鲁棒性 R ,表示为:

$$R = \frac{\tilde{E} - \tilde{E}(e)}{\tilde{E}} \times 100\% \quad (6)$$

2 时空路径长度计算

高铁动态服务网络中最短时空路径并不满足子路径最优性质,计算时需要考虑网络的非先进先出(First in First Out, FIFO)属性和边与边的时序流转特性,基于广度优先搜索,设计基于到站时间的矩阵迭代法求解时空路径长度,求解步骤如下:

步骤 1:提取高速铁路动态服务网络的时序列车信息,形成列车发到时间数据矩阵 M ,其中,每一行存储某时刻从某站出发(时空节点)到达其他站点的时间,如图 2a 所示,矩阵第一行存储第 380 min (06:20)从车站 V_1 出发到达其他站点的时间。

步骤 2:考虑网络的非 FIFO 属性,假设旅客是完全理性的,总是选乘到达目的站点最早的列车,且只能乘坐当前时刻以后出发的列车,基于上述原则,若后续出发列车比当前出发列车早到目的站点,则当前时空节点对应的到站时间更新为后续时空节点对应的到站时间,如图 2b 所示,遍历所有时空节点得到矩阵 M^* ,算法伪代码如下:

Algorithm 1: 考虑非 FIFO 属性,逆序更新

```

Input:  $M$ 
Output:  $M^*$ 
1 For  $V_i \in V$  do
2    $T_{\max} = 1\ 440_{1 \times n}$ 
3   For  $v_i^k \in \{v_i^m, v_i^{m-1}, \dots, v_i^2, v_i^1\}$  do
4     For  $V_j \in V$  do
5        $M^*(v_i^k, V_j) = \min(M(v_i^k, V_j), T_{\max}(V_j))$ 
6        $T_{\max}(V_j) = M^*(v_i^k, V_j)$ 
7 Return  $M^*$ 

```

步骤 3:并非所有直达列车都具有较高的运输效率,且网络中存在部分站点间不开行直达列车,则需通过换乘以提高站点间出行的时效性和可达性。若满足:①时空节点到达换乘站与换乘站发车之间

的时间差大于最小换乘接续时间;②换乘站到达目的站点的时间早于时空节点到达目的站点的时间;则当前时空节点对应的到站时间更新为换乘站对应的到站时间。基于上述原则,对 M^* 更新得到矩阵 M^{**} ,如图 2c 所示,每一行存放时空节点到达其他站点的最早到站时间,算法伪代码如下:

Algorithm 2: 考虑接续条件,换乘更新

```

Input:  $M^*$   $t^l$ 
Output:  $M^{**}$ 
1 For  $v_i^k \in V_i \in V$  do
2   For  $v_j^l \in V_j \in \{V/V_i\}$  do
3     If  $M^*(v_i^k, V_j) + t^l < t_l$ 
4       For  $V_h \in \{V/V_i\}$  do
5          $M^{**}(v_i^k, V_h) = \min\{M^*(v_i^k, V_h), M^*(v_j^l, V_h)\}$ 
6       break
7 Return  $M^{**}$ 

```

步骤 4: M^{**} 中存放考虑非 FIFO 属性和换乘接续的最早到站时间,若出行链的出发站为 V_i ,终到站为 V_j ,则在 t 出发时站点间的最短时空路径长度为:

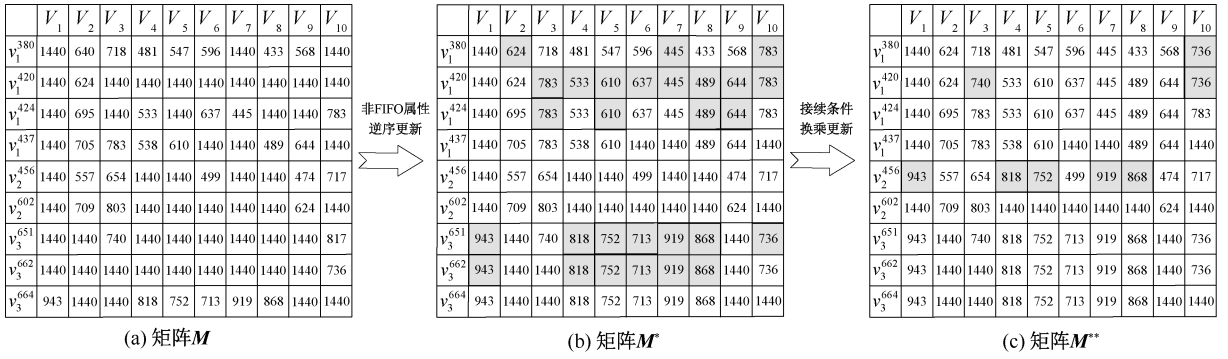
$$T_{ij}^{sp}(t) = \min\{M^{**}(v_i^k, V_j) - t\} \forall v_i^k \in V_i, t < t_k \quad (7)$$

式中 $M^{**}(v_i^k, V_j)$ 为矩阵 M^{**} 在第 v_i^k 行、第 V_j 列的元素,即在 V_i 站于 t_k 时刻出发的列车到达 V_j 站的最早到站时间。

3 模拟计算与结果分析

3.1 数据来源及试验设置

由于西藏自治区拉林铁路未与高速铁路网衔接,海南环岛高铁独立于高铁网运行,因此,研究范围仅限我国(不包括港、澳、台地区)21个省、4个自治区和4个直辖市。选择设计时速 250 km/h 及以上的新建线路和设计速度达到 160 km/h 及以上的改建线路作为网络连边,线路经过的 257 个主要地级市高铁站作为网络节点,形成高速铁路基础线网结构。基于高速铁路基础线网,根据 2022 年 10 月某日列车时刻表中的高速列车分类编码,选择以 G、D、C 开头的列车运行数据构建高铁动态服务网络。所有数据均来源于中国铁路客户服务中心(<http://www.12306.cn/index/>)。



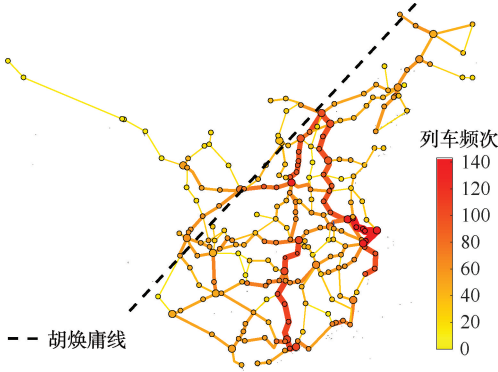
注:矩阵中所有时间数据换算单位为 min,1440 表示站点间无直达列车,图 2b 中灰色为考虑非 FIFO 属性逆序迭代更新后的到站时间,图 2c 中灰色为考虑换乘接续迭代更新后的到站时间。

图 2 发到站时间矩阵迭代过程

Fig. 2 Iterative process of departure and arrival time matrix of stations

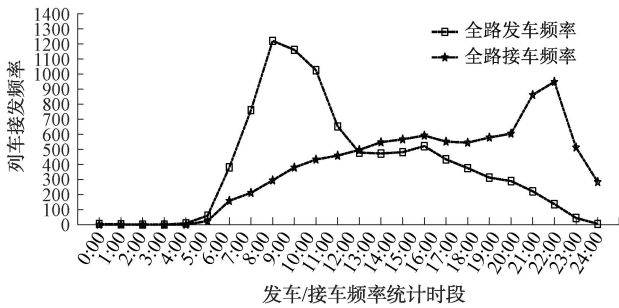
服务网络由高速列车流构成,可视化网络中列车接发频次,分析其时空特征,中国 HSRN 接发列车频次时空分布如图 3 所示。

车高峰时段集中在 8:00—12:00,接车高峰时段集中在 20:00—23:00,全路列车接发频次总体上呈现此消彼长的趋势。



(a) 列车频次空间分布

设置换乘接续时间 $t' = 20 \text{ min}$,网络性能评估时段为 $[06:00, 24:00]$,以 1 min 为时间间隔,将连续时间离散化,得到 1 080 个测度时间序列,设置站点功能失效和设施中断 2 个扰动场景,其中,功能失效指站点不办理列车技术作业,站点始发列车取消,通过列车均不停站通过,设施中断指站点的行车设备发生故障,始发、终到及通过该站点的列车均取消。所有计算试验均以 PyCharm 为开发环境,通过 Python 编程实现。



(b) 列车频次时间分布

3.2 考虑时空动态特征的必要性分析

以静态服务网络为比较对象,从最短时空路径、关键站点识别 2 方面进行对比分析,进一步说明考虑时空动态特征评估网络性能的必要性。

不同时刻的列车开行频率和停站模式都会对最短时空路径长度产生显著影响,因此,在动态服务网络下,不同时刻的最短时空路径长度不同,如图 4 所示,站点间的最短时空路径长度随时间具有阶跃变化性,而静态服务网络中未考虑这种动态特性。

以动态服务网络下时序网络效率计算的关键站点排序为基准线,与静态服务网络下静态网络效率计算的关键站点排序进行对比,如图 5 所示。在 2 个干扰场景下,关键站点排序均未完全拟合,表现出一定的差异性。

基于上述分析可知:与静态服务网络相比,动态服务网络能够更精准地捕捉时空路径的动态特性,得到关键站点排名有更丰富的内涵。因此,有必要考虑时空动态特征进一步评估 HSRN 的鲁棒性。

图 3 中国 HSRN 接发列车频次时空分布

Fig. 3 Spatial-temporal distribution of train frequency in China's HSRN

由图 3a 可知:中国高铁列车接发频次呈现出东密西疏、南高北低的运营格局,与中国人口经济分布相一致,运行繁忙的线路和站点多位于胡焕庸线东南部,其中,京沪、京哈-京港澳是纵向通道中列车运行较为密集的线路,陆桥、沿江、沪昆是横向通道中较为繁忙的线路。由图 3b 可知:时间分布上,发

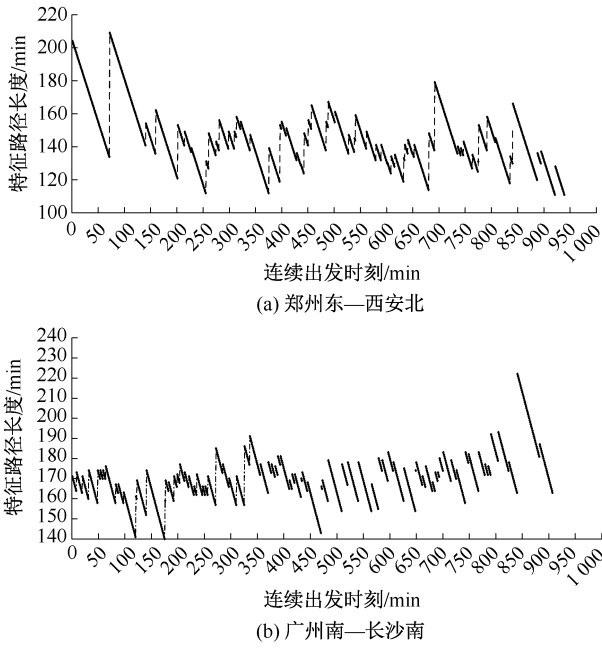


图 4 最短时空路径长度变化特征

Fig. 4 Evolution law of shortest space-time path length

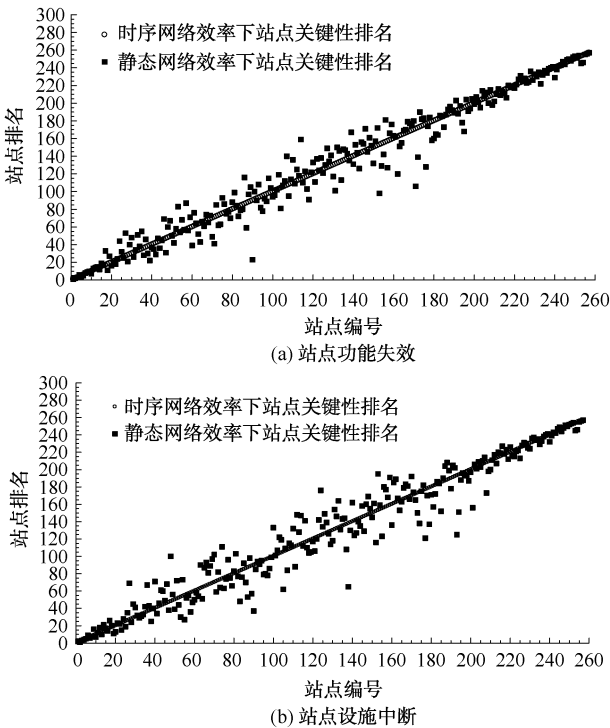


图 5 站点重要性排序结果对比

Fig. 5 Comparison of station importance ranking results

3.3 HSRN 鲁棒性空间分布

干扰发生于不同的区域,会对不同空间的站点产生影响,通过模拟不同站点遭受扰动,探究 HSRN 鲁棒性在空间上分布的差异性,结果如图 6 所示。

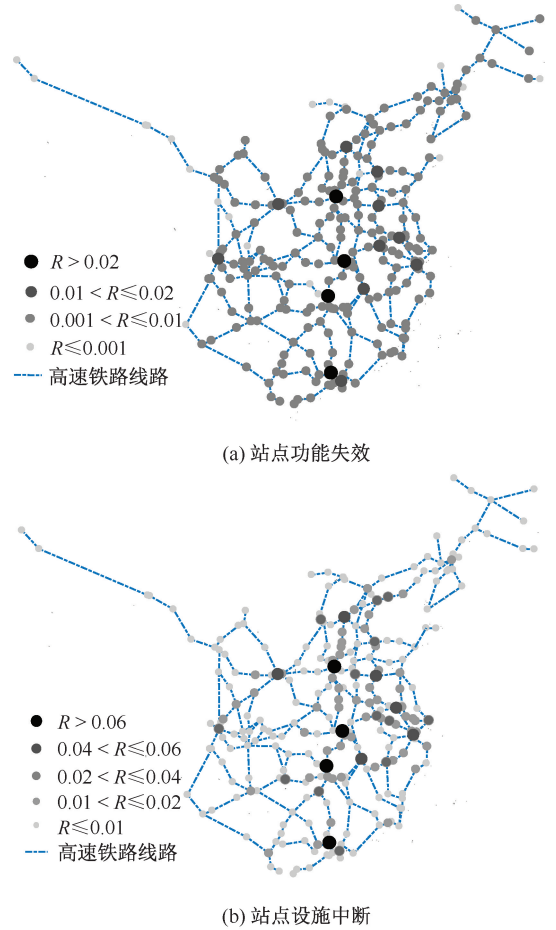


图 6 高铁网络鲁棒性空间分布

Fig. 6 Robustness spatial distribution of high-speed rail networks

从图 6 可以看出,不同站点对维护 HSRN 鲁棒性的贡献程度不同,在 2 种扰动场景下,与西北、西南、东北地区站点相比,中部和东部地区站点失效或中断对网络的影响更大,HSRN 也表现出较低的鲁棒性,其中,京广线枢纽站点发生扰动对网络性能水平的影响最大,网络鲁棒性最低,站点功能失效对网络性能的影响均大于 2%,站点设施中断对网络性能的影响均大于 6%,特别是郑州东站、长沙南站中断对网络性能的影响达到 9%,此外,京沪线枢纽站点在维护网络鲁棒性同样发挥着关键作用。由图 3a 可知:京沪线站点接发列车频率高于京广线站点,但其重要度相对较低,说明站点的重要程度不仅与列车开行频次有关,还取决于站点在网络中的位置,为进一步探究站点重要性与空间位置、列车频率之间的关系,给出站点重要性与二者的相关性分布。

站点重要性与列车频率、空间位置的相关性如图 7 所示。在功能失效场景下,观察图 7a 和图 7c,发现站点重要性与站点位置中心性相关度更高,

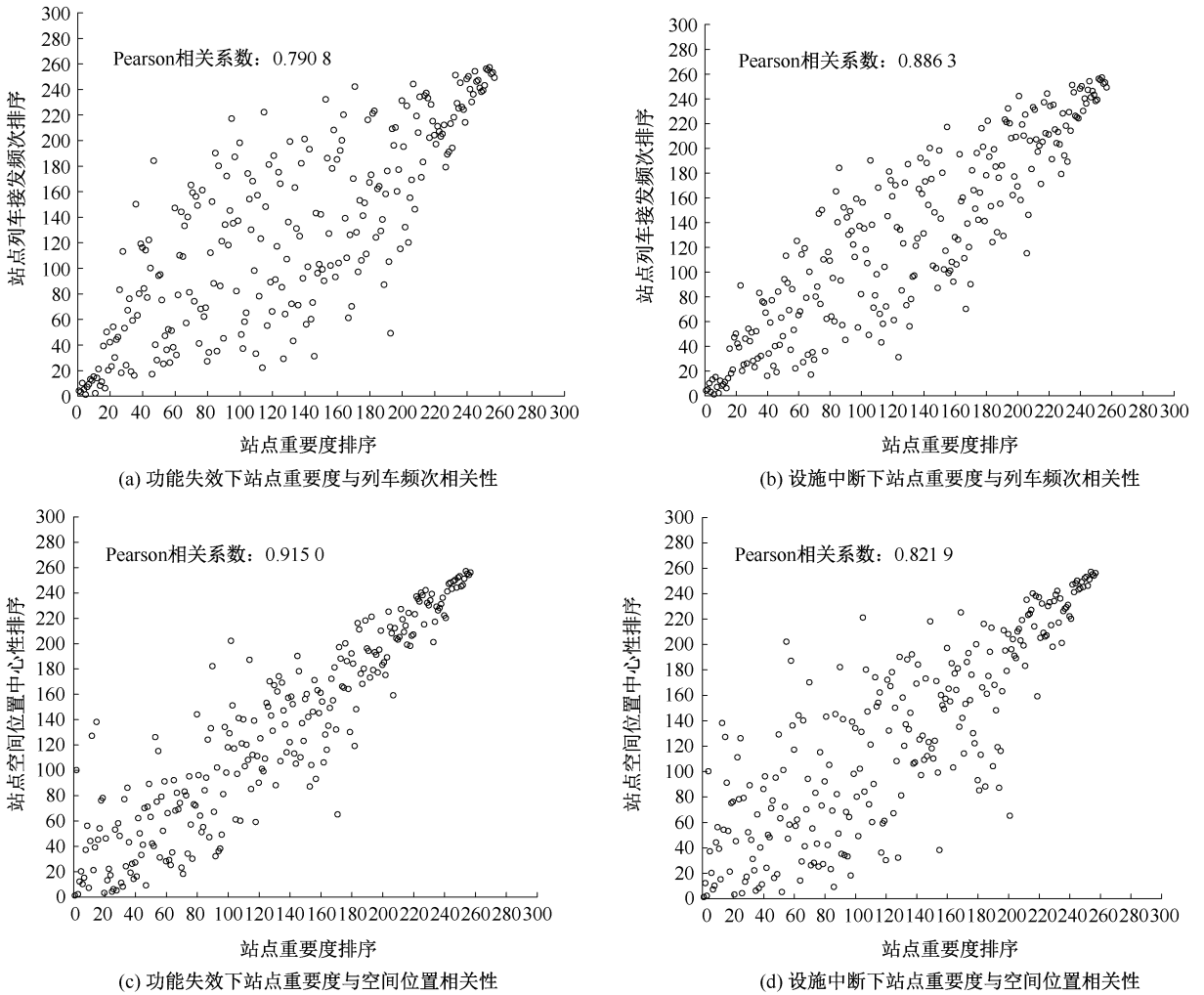


图 7 站点重要性与列车频率、空间位置的相关性

Fig. 7 Correlation of station importance with train frequency and spatial location

Pearson 相关系数达到 0.915 0,与站点接发列车频次相关性相对较低,与此相反,在设施中断场景下,对比图 7b 和图 7d,发现站点重要性与站点接发列车频次相关度更高,Pearson 相关系数为 0.886 3。由此看出,在不同扰动下,列车频次和空间位置对站点重要性的贡献程度不同。

3.4 HSRN 鲁棒性时间分布

当站点发生扰动时,在时间维度上对网络性能的影响具有差异性,选取 6 个枢纽站点,计算站点扰动对网络性能影响在时间上的变化。

6 个枢纽站点发生扰动对瞬时网络性能的影响曲线如图 8 所示。总体来看,站点扰动对网络的影

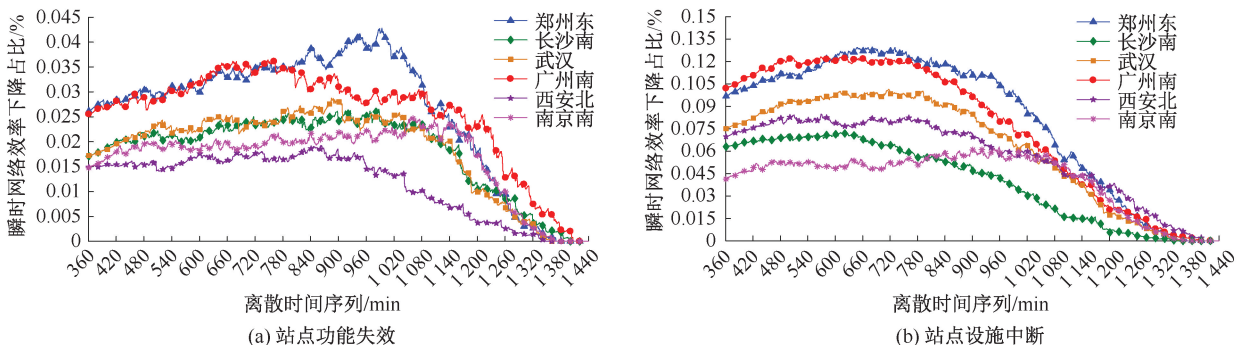
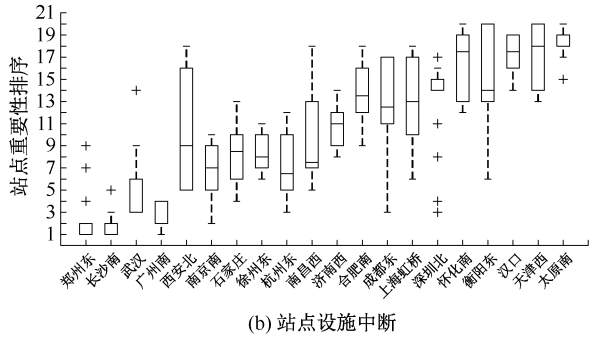
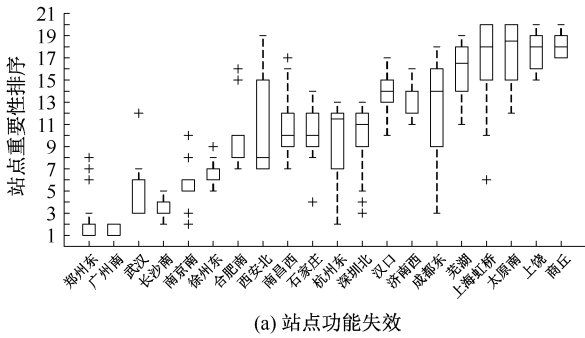


图 8 高铁网络鲁棒性在时间维度上的变化

Fig. 8 Changes in temporal dimension of robustness of high-speed rail networks

响并非恒定不变的,瞬时网络效率的下降程度随时间持续变化,且不同站点扰动对网络性能影响的变化趋势不同,导致全天时段内对网络鲁棒性影响最大的站点并不唯一,图 8a 中,在功能失效下,郑州东站对[06:00,10:00]和[13:00,19:00]时段的网络性能影响最大,广州南站对其他时段网络性能影响最为显著;图 8b 中,在设施中断下,在[06:00,10:00]、[10:00,20:00]和[20:00,24:00]的 3 个时段内,对网

络性能影响最大的站点分别为长沙南站、郑州东站和广州南站。此外,以 1 h 为时间步长,统计前 20 个关键站点在 18 个时间步的重要性排序,如图 9 所示。站点重要性排序波动较大,部分站点重要性排序分布呈现为偏态分布,统计结果中出现离群值,说明站点排名在不同时段存在较大的差异,证明在 HSRN 中,并不能给出一组固定的站点重要性排序,体现了分时段考察站点对网络鲁棒性贡献程度的必要性。



(a) 站点功能失效

(b) 站点设施中断

图 9 前 20 个关键站点重要性排序箱线图

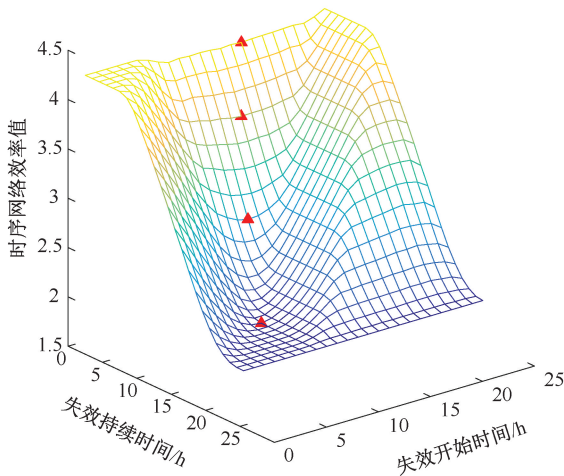
Fig. 9 Boxplots of importance-ranking for top 20 key stations

扰动开始时间和持续时间是影响网络性能的 2 个重要时间要素,有必要系统分析网络性能对扰动开始时间和持续时间的灵敏度。

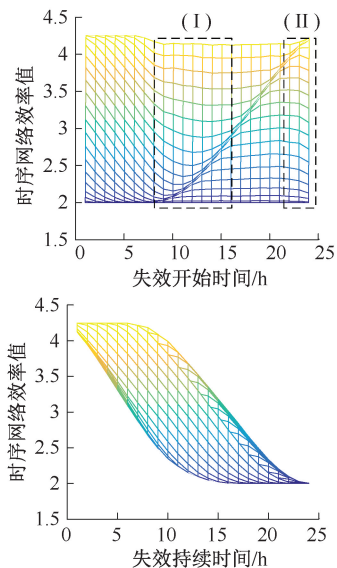
不同扰动开始时间和持续时间下时序网络效率三维曲面如图 10 所示。图 10a 中(I)框选部分,网络性能最低的失效开始时间分布于 8:00—16:00,图 10b 中(I)框选部分,网络性能最低的中断开始时间分布在 9:00—20:00。在 2 种扰动场景下,随着扰动持续时间的减小,对网络性能影响最大的扰动开始时间均向后推移,如图 10a 和图 10b 中三角标

记,当站点失效或中断的持续时间分别为 16、8、4、1 h,对网络影响最大的失效开始时间为 8:00、12:00、14:00、16:00,对网络影响最大的中断开始时间为 9:00、13:00、15:00、20:00,可以看出,中断开始时间向后推移更为明显。

综上可知:扰动发生的持续时间不同,对网络性能影响最大的扰动开始时间也随之变化,这是由于网络性能下降程度不仅与扰动期间列车到发频次有关,还取决于可替代已暂停服务列车的后续列车数量。



(a) 站点功能失效



(a) 站点功能失效

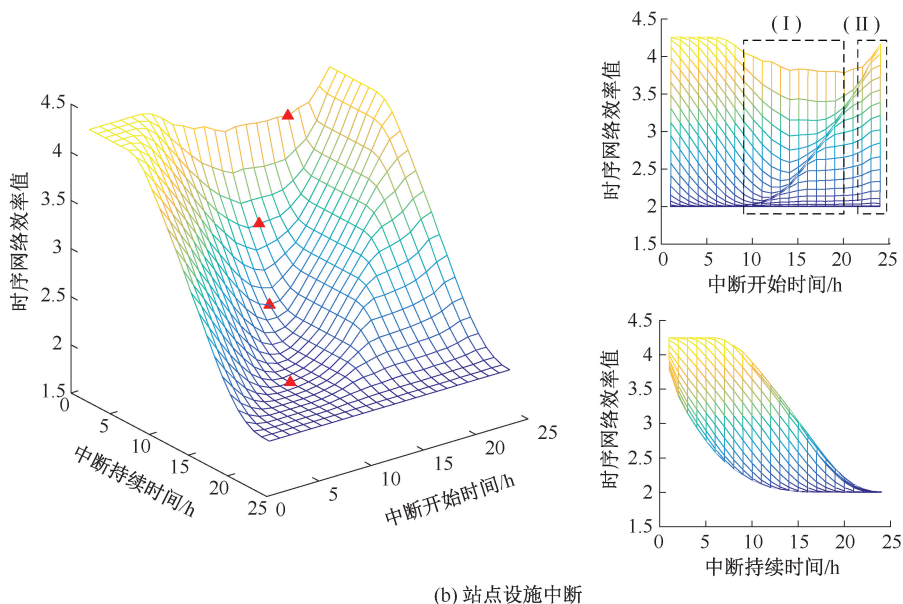


图 10 不同扰动开始时间和持续时间下时序网络效率三维曲面

Fig. 10 Three-dimensional surface plot of time series network efficiency under different disruption start time and duration

4 结 论

1) HSRSN 为动态结构,网络具有非 FIFO 属性,站点间时空路径长度随时间表现为阶跃变化,验证了考虑时空动态特征评估 HSRN 性能的必要性。

2) 时序网络效率量化了站点在网络鲁棒性在时间上的累积贡献程度,能够较准确地捕捉网络的时序信息,鲁棒性计算结果更符合实际。

3) 在 2 个干扰场景下,不同站点在同一时间发生扰动对网络的影响不同,同一站点在不同时间发生扰动对网络的影响也不同,HSRN 的鲁棒性表现出明显的时空差异特征。

4) 站点重要度与列车接发量、位置中心性有关,二者在不同扰动场景下对站点重要性的影响程度不同,此外,站点扰动对网络性能的影响随时间持续变化,有必要分时段评估站点的重要性。

参 考 文 献

- [1] 周丰,孙洪涛. 新时代背景下中长期规划高速铁路网适应性探讨[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(11):30-34.
ZHOU Feng, SUN Hongtao. Discussion on the adaptability of the medium and long-term high-speed railway network planning for a new era[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(11): 30-34.
- [2] 何大韧,刘宗华,汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京:高等教育出版社,2009:13-14.
- [3] WANG Wei, CAI Kaiquan, DU Wenbo, et al. Analysis of the Chinese railway system as a complex network[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2020, 130: DOI: 10.1016/j.chaos.2019.109408.
- [4] XU Zhongzhi, ZHANG Qingpeng, CHEN Dingjun, et al. Characterizing the connectivity of railway networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 21(4): 1491-1502.
- [5] JIAO Jingjuan, WANG Jiaoe, JIN Fengjun, et al. Impacts on accessibility of China's present and future HSR network[J]. Journal of Transport Geography, 2014, 40: 123-132.
- [6] WANG Zhaojing, JIA Limin, MA Xiaoping, et al. Accessibility-oriented performance evaluation of high-speed railways using a three-layer network model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 222: DOI: 10.1016/j.res.2022.108411.
- [7] ZHANG Jianhua, CAI Yunze, XU Xiaoming, et al. Topological vulnerability of Chinese high speed rail network[C]. The 30th Chinese Control Conference. IEEE, 2011: 832-837.

- [8] 马亮, 胡宸瀚, 陈光伟. 铁路快速货运复杂网络拓扑特征与鲁棒性分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 178-185.
MA Liang, HU Chenhan, CHEN Guangwei, et al. Analysis on topological characteristics and robustness of complex network of railway express freight transportation[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6): 178-185.
- [9] ZHANG Jianhua, HONG Liu, WANG Shuliang, et al. Reliability assessments of Chinese high speed railway network[C]. 2011 IEEE International Conference on Service Operations, 2011: 413-418.
- [10] 马亮, 金福才, 胡宸瀚. 中国铁路快捷货物运输网络复杂性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2023, 20(4): 26-32.
MA Liang, JIN Fucui, HU Chenhan. Complexity analysis of Chinese railway express freight transportation network[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2023, 20(4): 26-32.
- [11] 张振江, 张玉召, 王小荣. 铁路快捷货运网络鲁棒性分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(3): 150-156.
ZHANG Zhenjiang, ZHANG Yuzhao, WANG Xiaorong. Robustness analysis of railway express freight network[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(3): 150-156.
- [12] XIN Zhongling, NIU Fangqu. Structure and robustness of China's railway transport network[J]. Transportation Letters, 2023, 15(5): 375-385.
- [13] LI Tao, RONG Lili. A comprehensive method for the robustness assessment of high-speed rail network with operation data: a case in China[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2020, 132: 666-681.
- [14] JIAO Jingjuan, ZHANG Fangni, LIU Jian. A spatiotemporal analysis of the robustness of high-speed rail network in China[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 89: DOI: 10.1016/j.trd.2020.102584.
- [15] XIE Fengjie, MA Mengdi, REN Cuiping. Research on multilayer network structure characteristics from a higher-order model: the case of a Chinese high-speed railway system[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2022, 586: DOI: 10.1016/j.physa.2021.126473.
- [16] HONG Liu, YE Bowen, YAN Han, et al. Spatiotemporal vulnerability analysis of railway systems with heterogeneous train flows[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 130: 725-744.
- [17] FENG Xiao, HE Shiwei, LI Yubin. Temporal characteristics and reliability analysis of railway transportation networks[J]. Transportmetrica A Transport Science, 2019, 15(4): 1-41.

作者简介: 李卓 (1993—), 男, 甘肃天水人, 博士研究生, 主要研究方向为交通运输组织优化、网络建模。E-mail: zhuo_li1023@163.com。

