

天津轨道交通复杂网络和 应急选址研究

王宝顺^{1,2}, 姜 卉¹

(1. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049; 2. 天津轨道交通运营集团有限公司, 天津 300392)

摘 要: 天津已逐步形成轨道交通网络化运营模式, 但各线路间的应急管理相对独立、协同性差, 导致应急资源利用效率低, 应急响应不及时。建立基于 11 条天津轨道交通线路的复杂网络模型, 对其进行统计特性分析, 开展车站站点失效的脆弱性研究。在考虑需保护的脆弱站点的基础上, 建立适用于天津轨道交通网络化运营条件下的应急设施中心选址模型, 确定应急设施中心共计 26 个, 同时明确其覆盖范围。选址结果可提高未来线网的应急效率, 其分析过程适用于其他轨道交通网络。

关键词: 轨道交通; 网络化运营; 复杂网络; 应急设施中心; 选址

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)01-0174-06

Complex Network and Emergency Site Selection of Tianjin Rail Transit

WANG Baoshun^{1,2}, JIANG Hui¹

(1. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

2. Tianjin Rail Transit Operation Group Co., Ltd., Tianjin 300392)

Abstract: Tianjin has gradually formed a network operation mode of rail transit, but the emergency management of each line is independent and poorly coordinated, resulting in low efficiency of emergency resource utilization and delayed emergency response. A complex network model based on 11 Tianjin rail transit lines is established, statistical characteristics are analyzed, and the vulnerability to station failure is examined. Based on the vulnerable sites to be protected, a site selection model for emergency facility centers suitable for the networked operation of Tianjin rail transit is established, 26 emergency facility centers are identified, and their coverage is clarified. The site selection results can be used to improve the emergency efficiency of future network operations. The analysis process is also applicable to other rail transit networks.

Keywords: urban rail transit; networked operation; complex network; emergency facility centers; site selection

2020 年, 全国城市轨道交通运营线路增至 244 条, 新增运营线路长度 1 233.5 km^[1], 网络化运营趋势已成为必然。城市轨道交通相对封闭、人员密集、设备集中^[2], 一旦发生影响运营的突发事件, 将造成不可预估的影响, 轻则造成短时行车延误和乘客积压, 重则导致

长时间停运, 波及整个线网, 甚至造成路面交通瘫痪。

目前, 天津轨道交通已运营 1~6(含二期)、9 号线共 7 条城市轨道交通线路, 各线路突发事件响应相对独立, 这样的应急模式无法适应网络化应急响应需求, 易造成响应不及时和应急人力、资源的浪费。下

收稿日期: 2022-01-27 修回日期: 2022-03-27

第一作者: 王宝顺, 男, 硕士, 工程师, 从事城市轨道交通技术管理工作, 602869929@qq.com

通信作者: 姜卉, 女, 博士, 教授, 从事应急管理研究, huijiang@ucas.ac.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(E0E48947)

引用格式: 王宝顺, 姜卉. 天津轨道交通复杂网络和应急选址研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(1): 174-179.

WANG Baoshun, JIANG Hui. Complex network and emergency site selection of Tianjin rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 174-179.

面通过构建复杂网络,对统计特性进行分析,研究合理的应急设施中心选址方案,缩短应急响应时间,提高应急资源利用率,为迅速、高效、妥善的应急处置提供依据。

1 复杂网络脆弱性研究

1.1 构建复杂网络

研究复杂网络时,研究对象通常置于原始法 L 空间和对偶法 P 空间之中。 L 空间较为直观地反映站点的连接状态,因此采用 L 空间建模^[3]。基于图论,考虑双向载客,将城市轨道交通网络映射到无向图 $G=(V, E, d)$ 之中,其中 $V=\{n_1, n_2, n_3, \dots, n_N\}$ 是无向图 G 的节点,即车站站点, E 为 G 的边集, $e=(v_i, v_j)$ 是图 G 中一条边,即区间, G 中每一条边 $e=(v_i, v_j)$ 均有一个数 $a(e)=a_{ij} (a_{ij} > 0)$ ^[4]。 A 为对称矩阵,有

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

假设网络节点和区间无优先级,且数量短期不变化,则采用 2025 年时的线网状态进行建模^[5],即市区 11 条线路、251 个站点(部分段场与相近车站进行了合并处理),对站点进行编号,建立复杂网络图(见图 1),构造 L 空间拓扑邻接矩阵 A 。



图 1 Pajek 展示天津轨道交通复杂网络

Figure 1 Complex network of Tianjin rail transit displayed by using Pajek software

1.2 统计特性分析

2025 年,天津轨道交通共 251 个站点,283 条边。

平均度值为 2.225,即各站点平均与 2.225 个站点直接相连;站点交叉较少,主要原因是中心城区线路向郊区延伸站点较多,9 号线直接延伸至滨海新区。度值越大,在网络中发挥的连接作用越大,对相邻站点影响也越大^[6]。如图 2 所示,度值为 2 的站点数量最多,这与大部分城市的规律相符^[7],度值前 5 的站点分别为天津西站、下瓦房、天津站、文化中心、肿瘤医院。

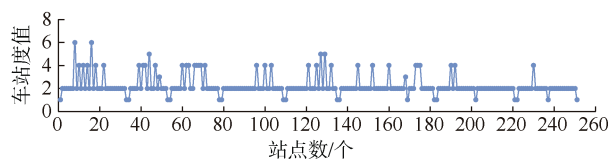


图 2 天津轨道交通车站度值

Figure 2 Degree of Tianjin rail transit station

天津轨道交通网络站点的度分布函数有明显的峰值,近似泊松分布,采用高斯分布函数可以较好拟合(见图 3)。

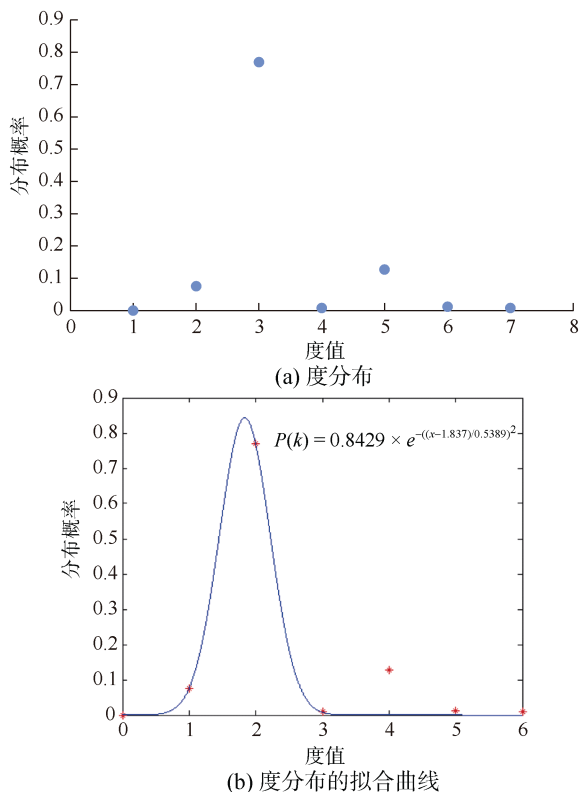


图 3 度分布拟合曲线

Figure 3 Degree distribution fitting curve

天津轨道交通的网络直径为 41,最短路径长度分布在 11 时的概率最大,为 6.15%,整个网络的平均最短路径为 13.28。如果各站客运量相同,则天津市民出行平均车站数为 13.28 站;假设天津轨道交通既有线

路的平均行车速度为 30 km/h, 每站的平均运行时间为 2 min, 则天津市民出行平均需要约 27 min, 网络的连通性尚可。最短路径分布情况如图 4 所示。

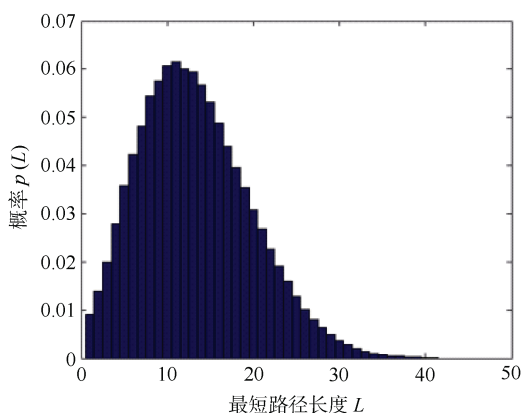


图 4 最短路径分布

Figure 4 Shortest path distribution

计算天津轨道交通全网的聚类系数为 0.002, 比较小。线网中车站的闭合三点组数目较少, 在网络车站受损的情况下, 极易出现网络不连通的情况。

综上分析, 天津轨道交通网络有较小的聚类系数和较大的平均路径, 度分布服从泊松分布。由于随机网络聚类系数和平均距离均较小, 平均路径长度满足 $L \sim \ln N / \ln k$ 的要求, 即平均路径长度随网络规模 N 的增长而呈对数级增长, 度分布近似为泊松分布; 规则网络聚类系数和平均路径均较大; 小世界网络性质介于规则网络和随机网络之间, 具有较小的平均路径长度和较大的聚类系数, 度分布近似于幂律形式; 无标度网络具有增长和偏好依附特性, 服从幂律分布, 平均路径长度和聚类系数均较小^[8]。因此, 天津轨道交通网络不是严格意义上的随机网络, 也不属于规则网络、小世界网络或无标度网络, 是具有一定随机网络性质的混合拓扑结构网络^[9]。网络特征统计如表 1 所示。

表 1 天津轨道交通网络特征统计

Table 1 Tianjin rail transit network characteristic statistics

特征指标	数值
站点数	251
边数	283
平均度值	2.255
平均介数值	0.049
平均紧密度值	0.08
平均路径长度(A 无权重)	13.28
直径(A 无权重)	41
平均聚类系数	0.002

天津轨道交通全网介数值分布如图 5 所示。站点介数值越大, 说明通过其最短路径的数目越多, 站点承担的连通流量越大。对车站度值与介数值进行相关性分析: 由于介数值不属于正态分布, 利用斯皮尔曼等级相关系数, 计算得出度数和介数相关性系数为 0.661, 相关系数在 0.7 以下, 说明车站度值和介数值相关程度较低, 用这两者识别的重要车站有较大差异, 所以需要在脆弱性评估中分别进行模拟分析。

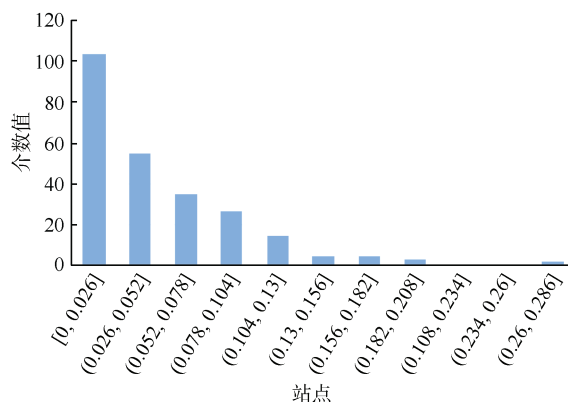


图 5 天津轨道交通站点介数分布

Figure 5 Betweenness distribution of Tianjin rail transit station

1.3 脆弱性评估

针对城市轨道交通线路脆弱性进行研究, 主要是模拟线路的突发事件, 模拟站点或线路出现瘫痪情形下的轨道交通网络变化情况, 即对网络进行模拟攻击, 让网络中的站点失效。

模拟过程采用随机和蓄意攻击两种方式。随机攻击是指站点无序地发生了突发事件而被攻击失效, 各站点均同等对待, 无优先顺序, 全部站点逐一攻击, 每次一个; 蓄意攻击是指站点按照一定规则被攻击失效。根据统计特性分析, 按照站点的度数和介数, 由大到小进行逐一攻击。分别用网络全局效率和最大连通子图的相对大小作为衡量指标, 绘制网络失效曲线。

全局效率表示网络站点信息交换的效率, 其数值越大, 则网络全局连通性越好。

全局效率公式如下:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (0 < E \leq 1)$$

式中, E 表示全局效率, N 为网络站点总数, d_{ij} 表示站点 i 到 j 的最短路径距离。

最大连通子图相对大小 S , 定义为网络站点遭受攻击后最大连通子图站点个数 N_0 与 N 的比值^[10], 计算如下:

$$S = \frac{N_0}{N}$$

每攻击一个站点,记录一次全局效率值和最大连通度值,绘制随站点攻击数量增加的网络失效曲线,如图6所示。

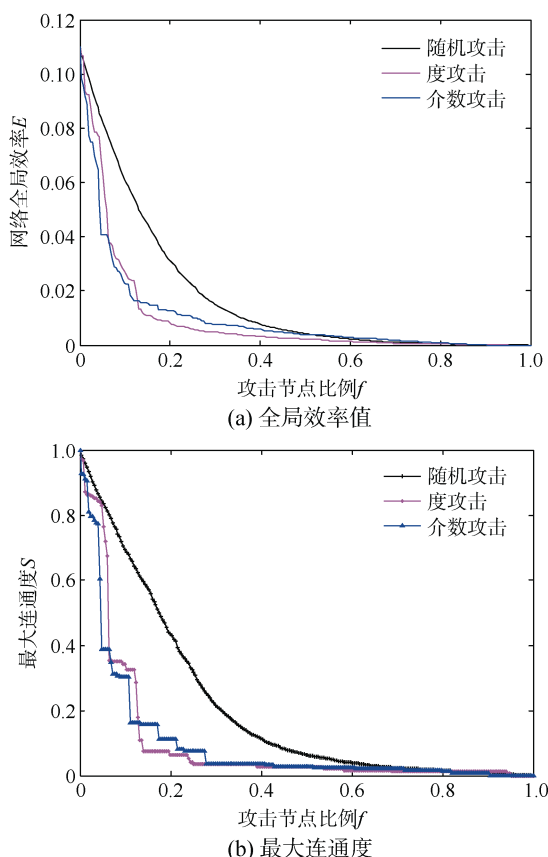


图6 不同攻击方式下的网络失效曲线

Figure 6 Network efficiency values and the most connected subgraphs under different attack modes

在随机攻击、度攻击、介数攻击刚开始时,即攻击站点的个数相对较少时,全局效率值和最大连通子图相对大小的下降幅度极大。在攻击站点比例为60%时,两个评价指标的数值趋近于0,网络遭受到完全破坏。

对比3种攻击模式,随机攻击对网络的破坏效果相对较差,蓄意攻击较随机攻击有更强的破坏性,介数攻击的效果更明显。因此,在网络遭受攻击时,需要优先保护介数值较大的站点。介数较高的10个站点如表2所示。

2 选址模型构建与计算

2.1 构建选址模型

由于天津轨道交通线网的选址站点无固定数目

表2 介数攻击下的重要站点

Table 2 Important station under betweenness attack

攻击站点排序	站点编号	站名	介数值
1	16	下瓦房	0.28
2	125	直沽	0.26
3	8	西站	0.19
4	100	成林道	0.19
5	129	肿瘤医院	0.18
6	44	天津站	0.17
7	14	营口道	0.17
8	18	土城	0.17
9	69	天塔	0.16
10	63	中山路	0.16

要求,且模型必须要覆盖网络中的全部站点,所以采用集合覆盖模型求解。优化目标是应急设施中心的建设费用最小,在假设建设费用相同的情况下,优化目标为设置的总数量最少。

2.1.1 基本假设

建立集合覆盖模型需做出如下假设:突发事件发生时,抢险是沿网络中的最短路径匀速前往的;应急救援过程中,救援队伍的平均行驶速度为25 km/h,救援过程中不考虑交通方式和交通道路情况;应急设施中心设置在网络站点,即车站站点上;面对应急设施中心,各需求点的重要性相同;从应急设施中心到达需求点的响应时间不超过15 min;每个车站站点均承担服务乘客出行的责任,因此应急设施中心应在满足设置成本最小的情况下(设置数量最少),覆盖所有的车站站点。

2.1.2 具体模型

$$\min = \sum_j c_j X_j$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq 1 \quad (\forall i) \quad (1) \\ \text{s.t. } & X_j \in \{0,1\} \quad (j \notin P') \quad (2) \\ & X_j = 1 \quad (j \in P') \quad (3) \\ & P' = \{X | \text{为应急设施中心指定必选点}\} \quad (4) \end{aligned}$$

式中, c_j 为应急设施中心的建设成本,假设各设施中心建设成本相同, P 表示应急设施中心必选点集合。

覆盖参数如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & (\text{需求站 } i \text{ 被备选点 } j \text{ 覆盖}) \\ 0 & (\text{否则}) \end{cases}$$

决策变量如下:

$$X_j = \begin{cases} 1 & (\text{备选站点 } j \text{ 被选为应急设施中心}) \\ 0 & (\text{否则}) \end{cases}$$

约束条件(1)要求,所有需求站点均有满足特定距离或时间(15min)的应急设施中心覆盖;约束条件(2)说明,在非必选点中,如果在 j 点建设应急设施中心,则 X_j 为 1,否则为 0;约束条件(3)说明,必选点对应 X_j 取值均为 1。

2.2 模型求解验证

由于求解过程规模不大,选用最优化规划法作为求解方法。根据集合覆盖模型,将复杂网络分析中的需保护站点(介数值前 5 的站点)设置为必选点,将模型函数整理为 0~1 规划模型,有

$$\begin{aligned} \min &= \sum_{j=1}^n V_j \\ \text{s.t.} &\begin{cases} \sum_{j=1}^n V_{ij} \geq 1 & (\forall i) \\ V_{16}, V_{125}, V_{129}, V_8, V_{100} = 1 \\ j = 1, 2, 3, \dots, 251 \\ i = 1, 2, 3, \dots, 251 \end{cases} \\ V_j &= \begin{cases} 1 & (\text{第 } j \text{ 备选点被选中}) \\ 0 & (\text{否则}) \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, \dots, 251 \\ V_{ij} &= \begin{cases} 1 & (\text{第 } i \text{ 需求点被 } j \text{ 备选点覆盖}) \\ 0 & (\text{否则}) \end{cases} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, 251 \end{aligned}$$

最终的求解结果显示,应急设施中心设置的站点共 26 个,如表 3、图 7 所示。

表 3 应急设施中心所在车站
Table 3 Station where the emergency facility centers are located

站点编号	车站名	站点编号	车站名	站点编号	车站名
V_4	佳园里	V_{83}	双街	V_{175}	丽江道
V_8	西站	V_{89}	天穆	V_{181}	芦北路
V_{16}	下瓦房	V_{100}	成林道	V_{198}	天大北洋园校区
V_{21}	华山里	V_{105}	跃进北路	V_{210}	新立站
V_{29}	北洋村	V_{114}	职业大学	V_{213}	军粮城站
V_{38}	咸阳路	V_{125}	直沽	V_{216}	塘沽站
V_{52}	空港	V_{129}	肿瘤医院	V_{221}	东海路站
V_{57}	华北集团	V_{140}	金钟街	V_{246}	招远路
V_{76}	学府工业区	V_{165}	解放南路		

按照需求点车站站点优先被距离时间更短的应急设施中心覆盖的原则,梳理各应急设施中心所覆盖的

需求站点,即出现突发事件时各应急设施中心负责应急救援的责任范围(见图 8)。



图 7 天津轨道交通应急设施中心位置
Figure 7 Location of Tianjin rail transit emergency facility centers

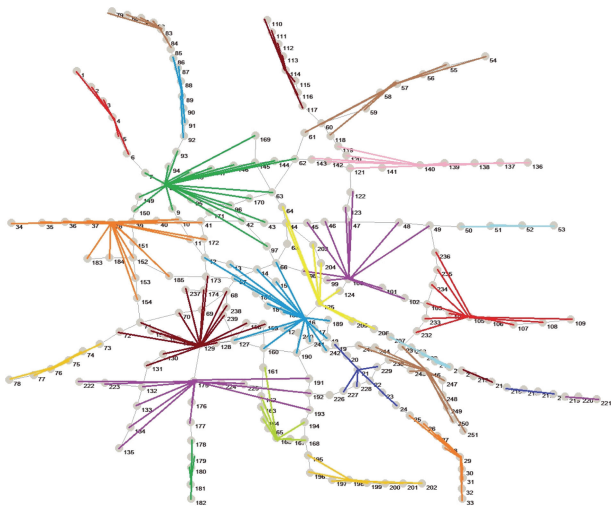


图 8 应急设施中心责任范围
Figure 8 Area of responsibility of the emergency facility centers

对该模型下应急响应时间如分析可知,应急响应时间在 2~3 min 占 14.22%、3~5 min 占 13.33%、5~7 min 占 19.11%、7~9 min 占 15.11%、9~11 min 占 15.22%、11~13 min 占 13.78%、13~15 min 占 6.22%,平均响应时间为 7.81 min。

2.3 应急管理职能

应急设施中心确定后,主要承担防范化解重大城市轨道交通安全风险、应对处置突发事件的责任,实现网络化运营下的应急管理。在该应急模式下,打破线路和专业的区分,实现区域化应急管理责任制,提

高应急效率,从如下几方面发挥职能:

1) 根据应急设施中心所覆盖站点的特点,梳理风险因素,确定各类抢险现场的处置方案,明确救援目标、职责、救援时限、信息传递流程、现场处置流程等。

2) 提升应急指挥效率,实现“扁平化”指挥体系,建立一个线网级应急指挥中心进行集中调度,各应急设施中心相互合作,实现联动。

3) 推动应急设施中心专职的救援队伍建设。重视应急专业化队伍建设的重要性,加大资金投入,确保队伍人数和质量。打破专业界限,培养具备多专业技能知识的专业救援队伍,能够面对不同线路、不同专业的突发应急事件。

4) 储备充足的抢险物资。结合运营经验和各线路的实际运行情况,在应急设施中心储备足够覆盖范围站点的抢险物资,形成建设标准。

5) 建立应急救援队伍模块化培训和演练体系。规定基本技能,加强职业生涯培养工作,把职业规划意识贯穿到培养过程之中。加强实战训练,定期开展模拟训练。

6) 完善综合人才培养、评价和发展,打通抢险队伍的职业上升通道,增强职业归属感。加强抢险队伍在社会上的宣传力度,尽可能增强抢险队员的自豪感和荣誉感。

3 结语

笔者通过构建复杂网络,论证得出天津轨道交通网络是具有一定随机网络的混合拓扑结构网络。开展基于车站站点失效的脆弱性研究,梳理选址中要保护的关键站点。以建设费用最小为目标,采用集合覆盖模型进行选址建模,确定应急设施中心共计 26 个。研究结果表明,选址模型可指导应急管理工作,使运营公司能够在突发事件发生时更高效、及时地进行响应,将乘客损失、社会不良影响降到最低。

本研究未考虑 PPP 模式下多家企业负责运营的情况,如何在公司协同、专业协同的情况下真正发挥应急设施中心的作用,需要继续深入研究。同时,模型中还有多条未开通线路,因此未来可在获取各线路运营时的突发事件概率、客流量大小等数据的基础上进行深入研究。

参考文献

- [1] 城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2020 年度统计和分析报告[EB/OL]. (2021-04-09)[2021-01-15]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/7647>.
- [2] 袁桂娟. 体系与措施: 城市轨道交通公共安全风险管控[J]. 铁道警察学院学报, 2020, 30(2): 5-10.
YUAN Guijuan. System and measures: public risk control of urban rail transit[J]. Journal of railway police college, 2020, 30(2): 5-10.
- [3] 许葭, 宋守信, 翟怀远, 等. 基于复杂网络的北京地铁网络化发展分析[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(5): 88-93.
XU Jia, SONG Shouxin, ZHAI Huaiyuan, et al. Analysis of network development of Beijing Subway based on complex network[J]. Urban rapid rail transit, 2020, 33(5): 88-93.
- [4] 曲迎春, 徐仲之, 龚航, 等. 城市轨道交通网络脆弱性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(11): 2276-2283.
QU Yingchun, XU Zhongzhi, GONG Hand, et al. Vulnerability analysis of urban rail transit networks[J]. Journal of railway science and engineering, 2016, 13(11): 2276-2283.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于天津市城市轨道交通第二期建设规划(2015—2020 年)的批复[EB/OL]. (2015/09/14)[2021-01-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201509/t20150929_962162.html?code=&state=123.
- [6] 畅明肖, 赵阿群, 吕禄明. 基于复杂网络的轨道交通网络结构特性研究[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(2): 254-259.
CHANG Mingxiao, ZHAO Aqun, LV Luming. Research on structural characteristics of urban rail transit network based on complex network theory[J]. Computer systems & applications, 2017, 26(2): 254-259.
- [7] 殷勇, 范钰. 城市轨道交通网络抗毁性实例研究[J]. 物流技术, 2018, 37(12): 58-62.
YIN Yong, FAN Yu. Case study on survivability of urban rail transit network[J]. Logistics technology, 2018, 37(12): 58-62.
- [8] 安沈昊, 于荣欢. 复杂网络理论研究综述[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(9): 2631.
AN Shenhao, YU Ronghuan. Review on complex network theory research[J]. Computer systems & applications, 2020, 29(9): 2631.
- [9] 张铁岩, 宋瑞, 郑锂, 等. 基于复杂网络理论的国内地铁网络特性分析[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(5): 50-54.
ZHANG Tieyan, SONG Rui, ZHENG Li, et al. Analysis of domestic subway network characteristics based on complex network theory[J]. Journal of transport information and safety, 2012, 30(5): 50-54.
- [10] 赵娜, 柴焰明, 尹春林, 等. 基于最大连通子图相对效能的相依网络鲁棒性分析[J]. 电子科技大学学报, 2021, 50(4): 627-633.
ZHAO Na, CHAI Yanming, YIN Chunlin, et al. Robustness analysis of interdependent networks based on the largest-component relative efficiency[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2021, 50(4): 627-633.

(编辑: 傅依萱)