

文章编号: 1672-4747 (2019) 04-0134-07

考虑乘客出行容忍度的城市轨道交通网络的 连通可靠性分析

刘 杰, 彭其渊, 陈锦渠, 殷 勇

- (1. 西南交通大学, 交通运输与物流学院, 成都 611756;
2. 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 成都 611756;
3. 综合交通大数据应用技术国家工程实验室, 成都 611756)

摘 要: 城市轨道交通网络的连通可靠性对乘客的出行和网络的正常运营具有重要意义, 为衡量城市轨道交通网络的连通可靠性, 提出容忍系数确定车站间的可容忍路径。以车站间的可容忍路径数目衡量车站间的连通可靠性, 并据此计算车站和网络的连通可靠性。以成都地铁为例, 运用运营数据分析了考虑车站权重和不考虑车站权重时成都地铁网络的连通可靠性。通过计算和分析, 确定了连通可靠性最强和最弱的车站并分析了成都地铁在不同时间段、不同容忍系数下的连通可靠性。结果表明, 当容忍系数小于 1.6 时, 容忍系数对成都地铁网络的连通可靠性影响很大。

关键词: 城市轨道交通; 网络连通可靠性; 容忍系数; 自动售检票系统 (AFC) 数据

中图分类号: U239.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-4747.2019.04.018

Analysis of Connectivity Reliability of Urban Rail Transit Network Considering Passengers' Travel Tolerance

LIU Jie, PENG Qi-yuan, CHEN Jin-qu, YIN Yong

- (1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
2. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Chengdu 611756, China;
3. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Chengdu 611756, China)

Abstract: The connectivity reliability of urban rail transit network has important influence on passengers' travel and the operation of urban rail transit. In order to evaluate the connectivity reliability of urban rail transit network, the tolerable coefficient is proposed to determine the tolerable travel paths between pairs of stations. The connectivity reliability between pairs of stations is measured from the number of tolerable travel paths between them. The connectivity reliability of urban rail transit network is calculated with the connectivity reliability between pairs of stations. Chengdu's metro is taken as an example, network's

收稿日期: 2019-01-09

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2017YFB1200700)。

作者简介: 刘杰 (1993—), 男, 汉族, 四川德昌人, 西南交通大学交通运输与物流学院博士研究生, 主要研究方向: 交通运输规划与管理。

引文格式: 刘杰, 彭其渊, 陈锦渠, 等. 考虑乘客出行容忍度的城市轨道交通网络的连通可靠性分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2019, 17 (4): 134-140.

connectivity reliability with the weights of stations and without the weights of stations are analyzed through operational data. The stations with the strongest and weakest connectivity reliability in Chengdu's subway network are determined respectively. The connectivity reliability of Chengdu metro network during different periods and under different tolerable coefficients is analyzed. The result shows that the tolerable coefficient has a great influence on the connectivity of Chengdu metro network when tolerable coefficient is less than 1.6.

Key words: urban rail transit; connectivity reliability of network; tolerable coefficient; Automatic Fare Collection (AFC) System data

0 引言

城市轨道交通因其高速、大运量、节能环保的特点逐渐发展成了重要的公共交通运输方式，提高城市轨道交通网络的可靠性对城市轨道交通的正常运营，以及为乘客提供高质量运输服务具有重要意义。针对交通运输网络，研究学者提出了交通网络的连通可靠性、时间可靠性、运输能力可靠性。虽然交通网络的可靠性受到了研究学者的重视，但关于城市轨道交通网络可靠性的研究却不多，WANG 等^[1]在 2014 年的论文中指出，仅有 8% 的网络可靠性分析中涉及轨道交通网络，因此，城市轨道交通网络的可靠性研究亟待深入。现有城市轨道交通网络的可靠性研究可以分为两类：第一类研究仅考虑网络的拓扑结构，第二类研究在考虑网络拓扑结构的同时，进一步考虑网络所承担的交通功能。

第一类研究中，叶青^[2]以重庆市轨道交通为例，以网络平均最短路径距离为可靠性指标，采用蓄意攻击和随机攻击车站的方式研究网络的可靠性。类似的研究包括用最大连通子图、网络效率等指标评估城市轨道交通网络的可靠性，采用实证分析的方法分析不同城市的轨道交通网络在遭受攻击时的可靠性^[3-7]。高速铁路网络的可靠性研究中，以网络效率和最大连通子图为衡量指标，分析了我国高速铁路三个时期的可靠性

并确定了网络中的重要站点^[8]。

第二类研究中，MATTSSON 等^[9]指出在研究交通运输网络可靠性的过程中，考虑交通需求和运输供给显得尤为必要。例如在考虑运输网络承担的交通功能时，通过客流、开行列车数、航线班次等确定节点和边的权重，再通过可靠性评估指标分析网络的可靠性^[10-13]。有人运用交通分配后路径的剩余能力衡量路径的可靠性，最后分析了交通网络的可靠性^[14]。

上述文献多着重于分析城市轨道交通网络在拓扑结构上的连通可靠性。虽然城市轨道交通网络的可靠性研究逐步过渡到第二类研究，但现有的研究文献多采用相同的评估指标评估区间或节点损毁等特殊情况下的城市轨道交通网络可靠性，缺乏网络运营秩序正常情况下的网络可靠性评估。同时，在已有的网络连通可靠性研究中，多数学者认为，只要两个节点之间存在路径，两个节点就处于连通状态，这样的假设并未充分考虑乘客在城市轨道网络内的出行路径选择行为。网络连通可靠性作为网络可靠性中最重要的部分，反应了交通运输网络的连通程度，是决定乘客能否通过城市轨道交通出行的基础。因此，本文结合自动售检票系统（Automatic Fare Collection System，简称 AFC）数据和列车运行时间数据等分析了城市轨道交通网络在正常运营情况下的连通可靠性。

1 模型建立

1.1 城市轨道交通车站的连通可靠性

在乘客的实际出行过程中,乘客往往会选择出行时间最短的出行路径(时间最短路)。如果该路径不可用时,乘客会选择其他连通路程出行,但如果其他连通路程的出行时间远远超过网络未受损前的时间最短路,即使其他路径处于连通状态,乘客也会放弃使用这些连通路程而采用其他交通方式出行。为确定哪些连通路程的出行时间没有超过乘客的可忍受程度,提出容忍系数以确定哪些连通路程会被乘客使用,即确定网络中的可容忍路径。

本文使用可容忍出行路径替代连通路程,以反应乘客的出行特征。定义车站 o 的连通可靠性为 δ_o , δ_o 的值等于车站 o 与其他车站之间可容忍出行路径数目的平均值,表示如下:

$$\delta_o = \frac{1}{n_{net} - 1} \sum_{d \in N, o \neq d} \sum_{i=1}^k a(t_{od}^i, t_{od}^{shortest}) \quad (1)$$

式中: N 为车站集合; n_{net} 为网络中车站的数量; k 为从车站 o 到车站 d 的连通路程数目; $a(t_{od}^i, t_{od}^{shortest})$ 为 0-1 常量,用于判定从车站 o 到车站 d 的第 i 条路径是否为可容忍路径,如果是可容忍路径, $a(t_{od}^i, t_{od}^{shortest}) = 1$, 否则为 0。采用式(2)确定 $a(t_{od}^i, t_{od}^{shortest})$ 的值:

$$a(t_{od}^i, t_{od}^{shortest}) = \begin{cases} 0; & t_{od}^i / t_{od}^{shortest} > \alpha \\ 1; & t_{od}^i / t_{od}^{shortest} \leq \alpha \wedge t_{od}^{shortest} \neq \infty \end{cases} \quad (2)$$

式中: $t_{od}^{shortest}$ 为车站 o 到车站 d 的出行时间最小值; α 为乘客的出行容忍系数, t_{od}^i 为车站 o 到车站 d 的第 i 条路径的出行时间,采用下式计算:

$$t_{od}^i = \sum_{e \in E_{od}^i} t_e + \sum_{m \in M_{od}^i} t_m^{dwell} + \sum_{n \in N_{od}^i} t_n + t_{wait}^o \quad (3)$$

式中: e 和 E_{od}^i 分别表示从车站 o 到车站 d 的第

i 条路径上的区间和区间集合; t_e 为列车在区间 e 的运行时间(包括起停车附加时分); m 和 M_{od}^i 分别表示从车站 o 到车站 d 的第 i 条路径上的非换乘站和非换乘站集合; t_m^{dwell} 为列车在车站 m 的停站时间; n 和 N_{od}^i 分别表示从车站 o 到车站 d 的第 i 条路径上的换乘站和换乘站集合; t_n 为换乘站 n 的换乘时间; t_{wait}^o 为乘客在车站 o 的候车时间,本文取 t_{wait}^o 的值为发车间隔的 1/2。

利用公式(1)计算车站连通可靠性时,只考虑了网络的拓扑结构,即认为网络中所有车站的重要程度一致。但在城市轨道交通网络中,不同车站(换乘站和非换乘站)的功能和承担的运输能力往往不同,因此通过引入车站权重来体现车站的重要程度。定义车站 o 的权重为从车站 o 出发的客流与全网客流的比值。考虑车站权重时,车站 o 的连通可靠性 δ_o^v 表示为:

$$\delta_o^v = \frac{1}{(n_{net} - 1) \cdot V} \sum_{d \in N, o \neq d} \sum_{i=1}^k v_{od} \cdot a(t_{od}^i, t_{od}^{shortest}) \quad (4)$$

式中: V 为城市轨道交通网络总客流; v_{od} 为车站 o 到车站 d 的客流。

1.2 城市轨道交通网络的连通可靠性

在计算车站出行连通可靠性的基础上,将城市轨道交通网络的连通可靠性 δ 定义为两车站间可容忍出行路径数的平均值,表示如下:

$$\delta = \frac{1}{n_{net}} \sum_{o \in N} \delta_o \quad (5)$$

考虑车站权重时,城市轨道交通网络的连通可靠性 δ^v 表示为:

$$\delta^v = \frac{1}{n_{net}} \sum_{o \in N} \delta_o^v \quad (6)$$

2 实例分析

2.1 成都地铁

成都是四川省的省会城市，是西南经济、文化和科技中心。随着成都城市规模的扩大与人口的增长，地铁逐步发展成为成都最主要的公共交通运输方式。以2017年5月运营的成都地铁网络为例，分析成都地铁网络的连通可靠性。

从成都地铁获得地铁线网每个区间的站间距、列车在区间的上下行运行时间（包括列车起停车附加时间）、乘客在换乘站的换乘时间、不同时间段不同线路的发车间隔时间等数据。同

时，还从成都地铁获得了从2017年5月8日到12日期间，5个工作日的乘客刷卡数据。该组AFC数据包括：车票编号及类型、进出站闸机刷卡时间、车站名称及编号。数据处理时，首先剔除了员工票的刷卡数据，接着运用数据库，匹配车票编号以获得站间OD(Origin-Destination)数据。分析客流量数据发现，成都地铁早高峰为早上的八点到九点，晚高峰为晚上的六点到七点。早、晚高峰及全天成都地铁出行人次分别为356 977人次、310 305人次以及1 506 155人次，分小时客运量与占比如图1所示。

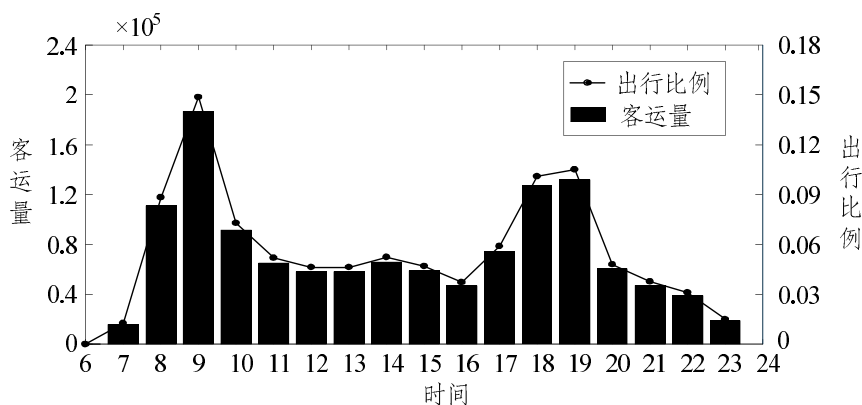


图1 分小时客运量与占比图

Fig.1 Number of trips and the fraction of trips in every hour

2.2 车站连通可靠性

根据列车在区间的上下行运行时间、在站停站时间、乘客的换乘时间以及不同线路的发车间隔，确定正常运行条件下任意两车站之间的最短出行时间。依据AFC数据获得站间OD，计算不同容忍系数下，早、晚高峰及全日的车站连通可靠性。以早高峰为例，早高峰不考虑车站权重与考虑车站权重时车站连通可靠性分别如图2和图3所示。分析图2与3可知，容忍系数对车站的连通可靠性影响较大，容忍系数越大，车站的连通可靠性越强。同时，连通可靠性最强及最弱的车站不同容忍系数的下均最强或最弱。在考虑

车站权重的情况下，车站的连通可靠性受到车站权重的影响，且车站权重越大，车站的连通可靠性越强。

不考虑车站权重时，车站连通可靠性最强和最弱的5个车站如表1所示。不考虑车站权重时，车站的连通可靠性不会受客流变化影响，因此时间段（早、晚高峰及全日）不会对车站的连通可靠性产生影响。分析表1发现，不考虑车站权重时，在不同容忍度系数下，连通可靠性最弱的车站多为换乘站。换乘站起到了连接多条线路的作用，但从换乘站出发以及到达换乘站的连通路数并不多，因此整个换乘站的连通可靠性不

高。针对连通可靠性较低的换乘站，首先要确保换乘站处于连通状态，以保证其他非换乘站的连

通可靠性；同时在规划中应考虑建立联络多条线路的车站，以增强整体线网的连通可靠性。

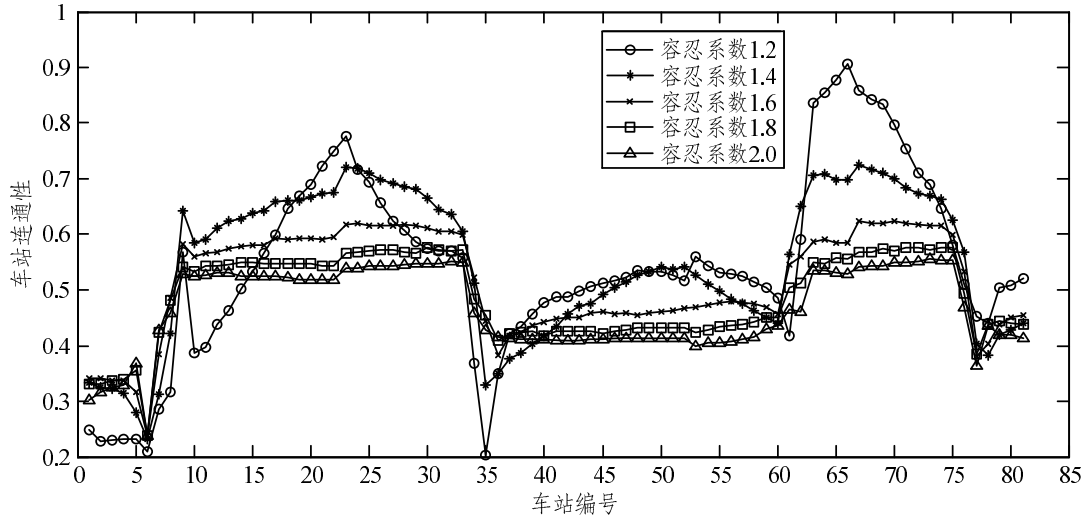


图 2 早高峰时不考虑车站权重时车站的连通可靠性

Fig.2 Connectivity reliability of stations without weights of stations considered in morning peak hours

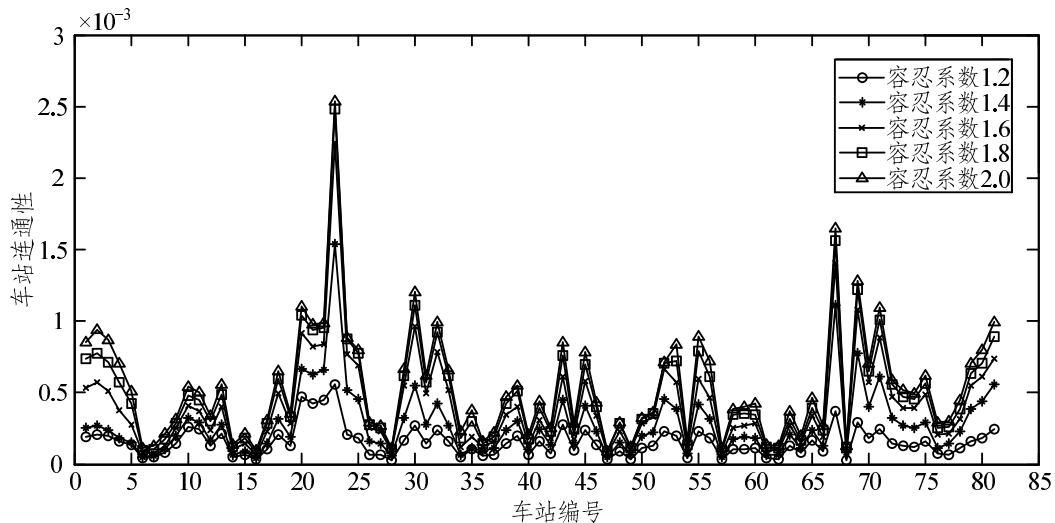


图 3 考虑车站权重时车站早高峰时段的连通可靠性

Fig.3 Connectivity reliability of stations with weights of stations considered in morning peak hours

表 1 不考虑车站权重时连通可靠性最强和最弱的 5 个车站

Tab.1 The five stations with strongest and weakest connectivityreliability without considering weights of stations

1.2 ≤ α ≤ 1.8		1.8 < α ≤ 2.6		2.6 < α	
最强	最弱	最强	最强	最弱	最强
犀浦	天府广场	军区总医院	天府广场	通惠门	天府广场
天河路	春熙路	熊猫大道	春熙路	人民公园	春熙路
非遗博览园	东门大桥	动物园	东门大桥	宽窄巷子	东门大桥
百草路	骡马市	昭觉寺南路	骡马市	太升南路	牛王庙
广都	牛王庙	非遗博览园	牛王庙	磨子桥	牛市口

注：α 为容忍系数

考虑车站权重时，早、晚高峰及全日车站连通可靠性最强和最弱的5个车站如表2所示。此时车站连通可靠性受客流影响较大，因此，车站的连通可靠性与时间相关（早、晚高峰和全日）。连通可靠性强的车站所处的区域多为中央商务区、火车站等客流量较大的区域，这一类区域乘客出行的路径有多条，能较好地满足乘客出行。

分析连通可靠性最弱的车站发现，无论是高峰时段还是全日，连通可靠性最弱的几个车站均相同，这类车站承担的客流量均较少。同时，乘客出行的可用路径也不多。为提升网络的整体连通可靠性，需要重点提升连通可靠性较弱的车站，同时也要对连通可靠性较强的车站做好防护措施以保证整个线网的连通可靠性。

表2 考虑车站权重时连通可靠性最强和最弱的5个车站

Tab.2 The five stations with strongest and weakest connectivity reliability when considering weights of stations

早高峰		晚高峰		全日	
最强	最弱	最强	最弱	最强	最弱
天府三街	大面铺	天府三街	大面铺	成都东客站	大面铺
犀浦	界牌	犀浦	界牌	犀浦	界牌
骡马市	蔡桥	骡马市	蔡桥	火车北站	蔡桥
高新	驷马桥	天府广场	驷马桥	天府广场	驷马桥
春熙路	东大路	春熙路	东大路	春熙路	东大路

2.3 成都地铁网络的连通可靠性

图4(a)和(b)分别为不考虑车站权重和考虑车站权重情况下成都地铁网络的连通可靠性。分析图4发现，成都地铁网络的连通可靠性主要受容忍系数影响，受出行时段和出行OD的影响较小。当容忍系数为1~1.6时，网络的连通可靠性受容忍系数影响很大。网络的连

通可靠性能随着容忍系数的增加迅速增大；当容忍系数大于1.6后，网络的连通可靠性增强逐步变缓并趋于稳定，说明成都地铁网络的连通可靠性不仅受线网结构的影响，更与乘客出行的可容忍度相关。如果乘客出行的容忍时间为最短出行时间的1.6倍，那么成都地铁网络的连通可靠性将极大提高。

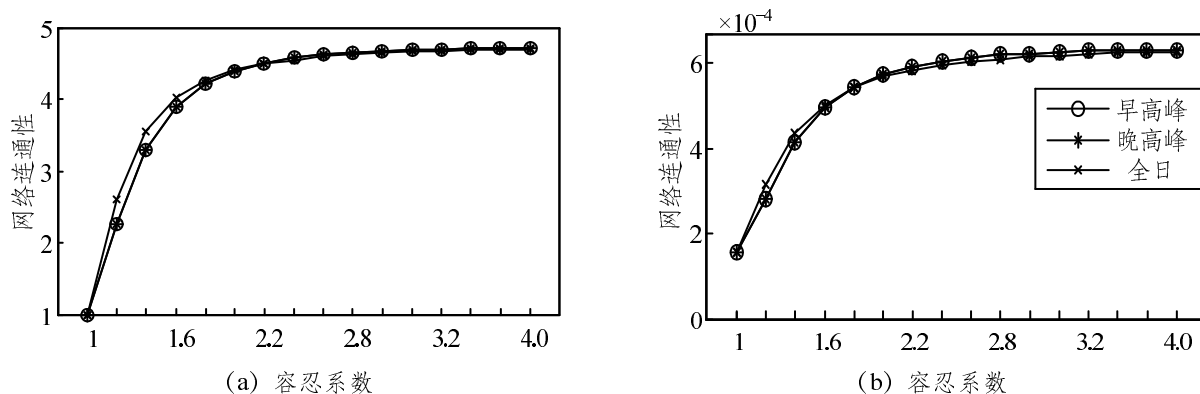


图4 容忍系数1~4情况下成都地铁网络的连通可靠性

Fig.4 The connectivity reliability of Chengdu metro network when tolerable coefficients are from 1 to 4

3 结 论

(1) 为了反应乘客的出行特征, 提出容忍系数以确定出行路径的连通可靠性, 采用可容忍路径代替连通路径衡量车站之间的连通可靠性, 提出了评估城市轨道交通网络正常运行情况下的车站连通可靠性和网络连通可靠性评估指标体系。

(2) 基于 AFC 数据和列车运行数据等计算并分析了成都地铁车站和网络的连通可靠性, 确定了连通可靠性最强和最弱的车站, 同时分析了成都地铁网络连通可靠性与容忍系数之间的关系。

(3) 以成都地铁网络为例进行分析发现, 成都地铁网络的连通可靠性不仅与地铁网络的拓扑结构有关, 还与乘客对出行时间的可容忍度密切相关。当容忍系数小于 1.6 时, 容忍系数对成都地铁网络的连通可靠性影响很大。

(4) 本研究仅是对城市轨道交通网络连通可靠性的计算和分析, 并未分析其原因和解决办法, 这也是下阶段的研究方向。合理的采用调查方式确定乘客出行的容忍系数对于城市轨道交通网络的连通可靠性研究具有重要意义。

参考文献

- [1] WANG Z, CHAN A P C, YUAN J, et al. Recent advances in modeling the vulnerability of transportation networks[J]. *Journal of Infrastructure System*, 2014, 21(2): 06014002-1-06014002-1-9.
- [2] 叶青. 基于复杂网络理论的轨道交通网络脆弱性分析[J]. *中国安全科学学报*, 2012, 22(2): 122-126.
- [3] 韩纪彬, 张苗, 郭进利. 城市轨道交通网络可靠性分析[J]. *城市交通*, 2015, 13(5): 80-84.
- [4] 王志强, 徐瑞华. 基于复杂网络的轨道交通路网可靠性仿真分析[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(20): 6670-6674.
- [5] 邓旭东, 王雪, 徐文平, 等. 城市地铁网络脆弱性对比分析[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 5(12): 152-156.
- [6] 陈卓林. 城市轨道交通网络可靠性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [7] 杨成, 王佳伟, 范文博, 等. 地铁线网结构对连通可靠性影响评价[J]. *交通信息与安全*, 2015, 33(6): 82-88.
- [8] 于宝, 冯春, 朱倩, 等. 中国高速铁路网络脆弱性分析[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(9): 110-115.
- [9] MATTSSON L G, JENELIUS E. Vulnerability and resilience of transport systems—A discussion of recent research [J]. *Transportation Research Part A*, 2015, 81: 16-34.
- [10] 陈峰, 胡映月, 李小红, 等. 城市轨道交通有权网络相继故障可靠性研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, 16(2): 140-145.
- [11] 李成兵, 郝羽成, 王文颖. 城市群复合交通网络可靠性研究[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(3): 565-571.
- [12] LIU J, LU H, MA H, et al. Network vulnerability analysis of rail transit plans in Beijing-Tianjin-Hebei region considering connectivity reliability[J]. *Sustainability*, 2017, 9(8): 1479-1-1479-17.
- [13] 刘海旭, 荣新. 道路交通网络脆弱性评估[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2018, 16(2): 94-99.
- [14] 肖雪梅, 贾利民. 城市轨道交通路网连通可靠度评估模型[J]. *中国铁道科学*, 2016, 37(01): 132-137.

(责任编辑: 刘娉婷)