

# 上海城市轨道交通网络通达性与路径冗余性 评估研究<sup>\*</sup>

张 琦

(上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海)

**摘 要** [目的]为了更好地衡量城市轨道交通网络在常态和非常态下的性能水平,需对城市轨道交通网络通达性和路径冗余性进行评估。[方法]以上海城市轨道交通网络为例,对其进行通达性和路径冗余性计算分析。在通达性层面,基于考虑换乘时间的最短路径行程时间构建评价指标,计算不同出行时间下的可达范围和服务人群规模;在路径冗余性层面,将路径冗余性表征为考虑路径选择行为偏好的有效路径数量。[结果及结论]上海城市轨道交通网络通达性相对较好,约50%和95%的出行能够在50 min和90 min内完成;仅有少数OD(起讫点)对具有较高的路径冗余性;以行程时间与有效路径数量之比来表征OD对抗扰动能力,该比值近似服从偏正态分布;位于分布尾部且出行需求较大的OD对具有较高的脆弱性,需要在未来规划设计中予以重点关注。

**关键词** 城市轨道交通网络;通达性;路径冗余性

**中图分类号** F530.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.20230424

## Evaluation and Research on Accessibility and Path Redundancy of Shanghai Urban Rail Transit Network

ZHANG Qi

(Technology Center, Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] To better measure the performance level of urban rail transit networks under both normal and abnormal conditions, it is essential to evaluate the accessibility and path redundancy of urban rail transit networks. [Method] Taking the urban rail transit network in Shanghai as an example, calculation and analysis of accessibility and path redundancy are conducted. In terms of accessibility, evaluation indicators are established based on the shortest path travel time considering the interchange time, to calculate the reachable area and the scale of the served population under different travel time scenarios. While in terms of path redundancy, the path

redundancy is characterized by the number of effective paths that take into account path selection behavior preferences. [Result & Conclusion] The urban rail transit network in Shanghai demonstrates relatively good accessibility, with approximately 50% and 95% of trips being completed within 50 minutes and 90 minutes, respectively. Only a small number of OD (origin-destination) pairs exhibit higher path redundancy. The ratio of travel time to the number of effective paths is used to characterize the OD pair ability against disturbances, which approximately follows a skewed normal distribution. OD pairs located at the tail of the distribution with higher travel demand show greater vulnerability, requiring special attention in future planning and design.

**Key words** urban rail transit network; accessibility; path redundancy

网络通达性和路径冗余性是评价交通网络特征的常用指标。其中:通达性能够刻画城市的空间延展和城市内部不同区域联系的紧密程度<sup>[1]</sup>;而冗余性是韧性的重要维度之一,常指代元素、系统或其他组件的可替代程度,从而能在异常事件发生后满足系统的正常运营要求<sup>[2]</sup>。对于城市轨道交通网络而言,研究其通达性不仅有助于全面衡量其发展水平和服务质量,还能为网络结构优化、土地利用开发等提供方向指引;而研究其冗余性则能够反映系统在非常态下的网络抵抗能力和灾前储备情况。本文构建了基于网络通达性和路径冗余性的评价方法及指标,并以上海城市轨道交通网络为例进行研究,分析了两者间的内在联系与耦合效应。

## 1 网络通达性评价

### 1.1 网络通达性的概念

通达性是一项综合指标,目前学界对通达性的定义尚未形成统一的标准,但其概念同连通性和可

<sup>\*</sup>上海市“科技创新行动计划”项目(22dz1200800)

达性关系密切。连通性的概念由文献[3]在可靠性分析中提出,最初是根据网络的通断情况简单划分为连通或者不连通两种状态;文献[4]进一步将连通性从两点的连通性,拓展到多点的连通性,以及网络的连通性。可达性兼具空间和时间概念,反映空间节点或区域间的空间尺度以及节点或区域在交通系统中克服距离消耗的时间,体现交通节约的经济价值<sup>[5]</sup>,常以行程时间为指标来度量。文献[6]最早在 1959 年提出通达性的概念,认为通达性是交通网络中各节点相互作用机会的大小。

本文认为,通达性应既能反映轨道交通网络自身的特征和结构(即网络的连通程度),也能反映轨道交通网络是产业、经济、人口等流动的载体,从而体现对城市发展和居民出行的支撑作用。因此,本文以不同出行时间内能够满足的潜在出行需求量作为城市轨道交通网络通达性的评价指标。

## 1.2 网络通达性评价指标

在城市轨道交通网络中,各 OD(起讫点)对间的行程时间通常使用最短路径的行程时间代替,可以通过 Dijkstra 单源最短路径算法高效求解。此外,本研究在经典 Dijkstra 单源最短路径算法中存储了各条最短路径对应的换乘次数,将换乘时间和换乘次数纳入分析范畴。各层面评价指标表示如下:

1) 站点平均行程时间。站点平均行程时间  $t_{\text{sta}}(i)$  定义为站点  $i$  到其他  $m-1$  个站点的平均行程时间:

$$t_{\text{sta}}(i) = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^{m-1} t(i,j) \quad (1)$$

式中:

$t(i,j)$ ——站点  $i$  到站点  $j$  的最短路径的行程时间。

2) 线路平均行程时间。线路平均行程时间  $t_{\text{line}}(l)$  定义为属于线路  $l$  的站点平均行程时间均值:

$$t_{\text{line}}(l) = \frac{1}{h} \sum t_{\text{sta}}(i) \quad (2)$$

式中:

$h$ ——线路  $l$  的站点数量。

3) OD 对行程时间与全网总行程时间。由于任意两个站点组成 1 个 OD 对  $(i,j)$ , OD 对行程时间即为  $t(i,j)$ 。全网总行程时间为所有 OD 对行程时间之和。

4) 网络通达性。通过综合分布模型法建立某城市潜在 OD 出行需求矩阵,结合上述指标计算不同出行时间内(如 30 min、60 min 等)能够满足的潜在出行需求量的占比,即可计算出该城市轨道交通网络的通达性。

## 2 网络路径冗余性评价

### 2.1 路径冗余性的概念

国内外学者通常将出行者可选路径的多样性作为交通网络冗余性的定义。例如,文献[7]认为交通网络的冗余性是指 OD 对间存在多种可选的交通方式或出行路径;文献[8]认为灾难性事件对交通网络的影响取决于出行者是否能够获得多条替代路径;文献[9]将出行者路径多样性作为交通网络冗余性的重要维度。

本文采用路径冗余性作为城市轨道交通网络冗余性的重要测度,通过 OD 对间的可选路径的数量来衡量。

### 2.2 路径冗余性的计算

参考既有研究,本研究中有效路径通过“渐行渐远”和“行程时间可接受”两个约束来计算。

#### 2.2.1 “渐行渐远”约束

根据文献[10],有效路径应当离起点越来越远,即对于有效路径上的每个路段,其尾节点与 OD 对起点的距离应当小于其头节点与起点的距离。将城市轨道交通网络抽象为有向图  $G(N,A)$ ,其中  $N$  为城市轨道交通网络的节点集合, $A$  为城市轨道交通网络的路段集合。则对于 OD 对  $(r,s)$ ,其有效路径中的路段  $ij$  应满足:

$$t(r,i) < t(r,j), \quad \forall ij \in A \quad (3)$$

式中:

$t(r,i)$ 、 $t(r,j)$ ——OD 对起点  $r$  到边  $ij$  的尾节点  $i$  和头节点  $j$  的最短路径行程时间。

#### 2.2.2 “行程时间可接受”约束

对于出行者而言,如果某条路径的行程时间超过了一定阈值,则出行者不会将其视为可选路径。然而,当出行者的行程时间较短时,其一般会考虑可选路径与最短路径行程时间的绝对差,而非仅考虑相对差。因此,参考文献[11]的既有研究成果,本文对相关定义做出如下改进。

当 OD 对行程时间小于 15 min 时,有效路径行程时间与最短路径行程时间的绝对差值应当不超过 10 min。即:对于  $(r,s)$  间的有效路径  $k$ ,应当满

足如下约束:

$$\sum_{ij \in A} \delta_{k,ij} t_{ij} - t(r,s) \leq 10 \text{ min} \quad (4)$$

式中:

$\delta_{k,ij}$ ——路径-路段关联变量,当路径  $k$  经过路段  $ij$  时,  $\delta_{k,ij}$  取 1, 否则取 0;

$t_{ij}$ ——路段  $ij$  的行程时间;

$t(r,s)$ —— $(r,s)$  间的最短路径行程时间。

当 OD 对行程时间超过 15 min 时,有效路径行程时间应当不超过最短路径行程时间的 1.6 倍。对于  $(r,s)$  间的有效路径  $k$ ,应当满足如下约束:

$$\sum_{ij \in A} (\delta_{k,ij} t_{ij}) \leq 1.6 t(r,s) \quad (5)$$

针对上述约束,本文选用深度优先搜索方法枚举出各 OD 对间所有的有效路径,再对结果进行统计,计算得出有效路径的数量。

### 3 上海轨道交通网络通达性和路径冗余性计算分析

本文以上海城市轨道交通网络为案例开展实证分析,在通达性和路径冗余性计算分析的基础上,探究其分布特征和两者之间的耦合效应。以下计算均基于截至 2021 年 12 月 23 日的上海城市轨道交通网络,其中路径中的站间行程时间及换乘时间均获取自官方网站。

#### 3.1 网络通达性

采用常用的网络拓扑指标分析上海城市轨道交通网络结构,结果如表 1 所示。由表 1 可以看出:上海城市轨道交通网络平均节点度接近 2,网络直径远大于平均路径长度。该网络整体呈现复杂网络的无标度特性,大部分站点属于线路中间站(平均节点度为 2),仅有不超过 5% 的站点为三线或四线换乘站。

表 1 上海城市轨道交通网络拓扑统计指标取值

Tab. 1 Statistical indicators of Shanghai urban rail transit network topology

统计指标	平均路径长度/min	网络直径/min	平均节点度	集聚系数
取值	56.27	164.25	2.31	0.008 9

在站点层面,全网络各站点  $t_{sta}(i)$  的平均值、最大值和小值分别为 56 min、103 min 和 34 min,各站点的  $t_{sta}(i)$  数值整体呈现由市中心向四周辐射递减的趋势。

在线路层面,各条线路  $t_{line}(l)$  的平均值、最大值和最小值分别为 56 min、81 min(5 号线)和 39 min(4 号线)。各条线路  $t_{line}(l)$  的箱型图如图 1 所示。由图 1 可知: $t_{line}(l)$  与所属站点的位置有关。由于 5 号线属于郊区线路,全部站点位于外环以外,而 4 号线属于市区环线,站点均位于内环以内,因而 5 号线的平均行程时间显著高于后者。

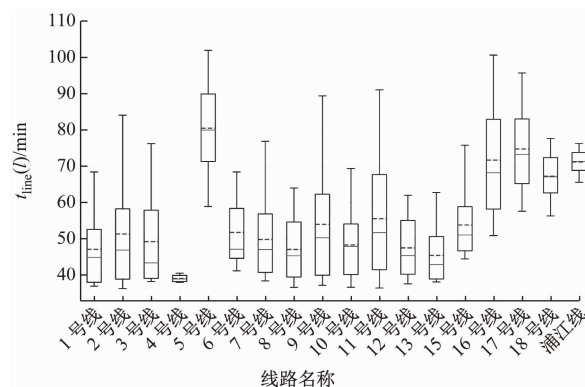


图 1 上海城市轨道交通各条线路  $t_{line}(l)$  箱型图

Fig. 1 Box plot of the  $t_{line}(l)$  (average route travel time) of each Shanghai urban rail transit line

进一步将出行需求纳入通达性评估中,得到不同出行时间内能够满足的出行需求及占比,如图 2 所示。由图 2 可见:约 50% 和 95% 的出行能够通过城市轨道交通网络在 50 min 和 90 min 内完成,这表明该网络能够较好地支撑经济活动范围和城市空间拓展。

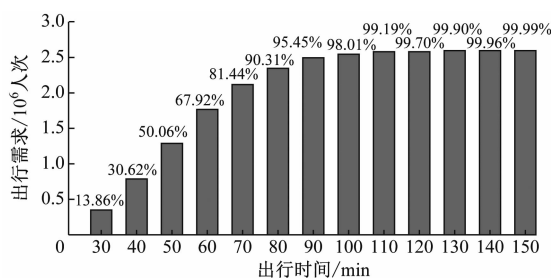


图 2 不同出行时间内能够满足的出行需求及占比

Fig. 2 Travel demands met within different travel time periods and proportions

#### 3.2 路径冗余性

上海城市轨道交通网络各 OD 对路径冗余性(有效路径数量)的频数分布直方图及统计指标,如图 3 所示。由图 3 可见:该分布呈高度右偏长尾特征,即大多数 OD 对的冗余性较低,仅有少数 OD 对具有较高冗余性。具体而言,路径冗余性的均值为 2.48,最大值为 52.00,最小值和中位数均为 1.00,

说明 OD 对路径冗余性分布具有极强的异质性,仅有少数 OD 对具有较高的路径冗余性,而大部分 OD 对仅能满足基本连通要求(56.23%的 OD 对仅有 1 条有效路径)。

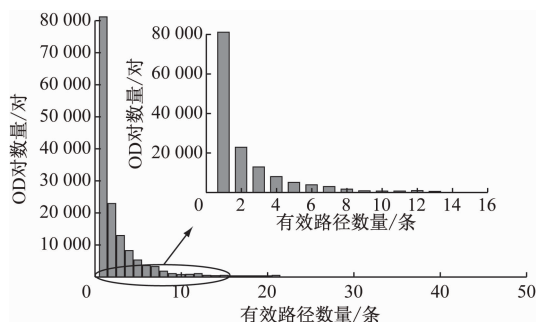


图3 各 OD 对有效路径数量频数分布直方图

Fig. 3 Histogram of frequency distribution of effective path numbers for each OD pair

进一步分析出行需求与路径冗余性分布的匹配性,结果见图 4。由图 4 a)可知:仅有 3.84% 的出行需求拥有超过 5 条有效路径;除最短路径外,还拥有其他替代路径的 OD 对出行需求占比为 17.99%。由此可见,大多数的出行需求缺乏失效场景下的替代路径,82.01% 的出行需求仅有 1 条有效路径。

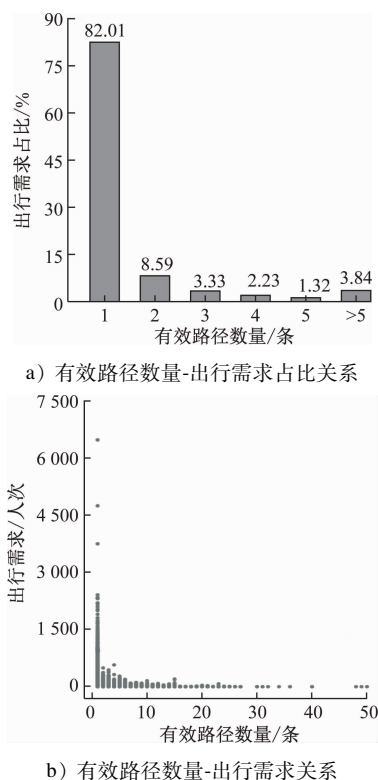


图4 出行需求及其占比同有效路径数量的关系

Fig. 4 Relationship between travel demand & its proportion with effective path numbers

图 4 b)展示了出行需求超过 1 000 人次的低路径冗余性 OD 对分布。其中出行需求最大的 5 个 OD 对(泗泾站—漕河泾开发区站、九亭站—漕河泾开发区站、佘电站—漕河泾开发区站、张江路站—中科路站、泗泾站—合川路站)均位于线路(9 号线、13 号线)末端的近郊区域,O、D 分别属于居住区和就业区,属于典型的通勤出行。这些区域的出行者通常仅能选择 1 条线路出行,遭遇运营中断事件后出行将受到严重影响。

### 3.3 网络通达性与路径冗余性的关系分析

通过图 5 进一步分析 OD 对行程时间和有效路径数量的关系可知:路径冗余性高的 OD 对大多具有中等行程时间,而行程时间过短或过长的 OD 对均具有低路径冗余性。因此,行程时间长的 OD 对可能同时具有很少的替代出行路径,更容易受到异常事件影响导致中断。

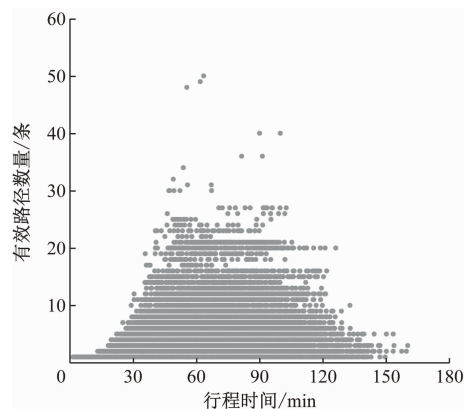


图5 OD 对行程时间与有效路径数量关系

Fig. 5 Relationship between OD pair travel time and effective path numbers

本文以行程时间与有效路径数量之比  $R$  来衡量 OD 对的抗扰动能力,结果如图 6 所示。由图 6 可见: $R$  呈右偏分布。

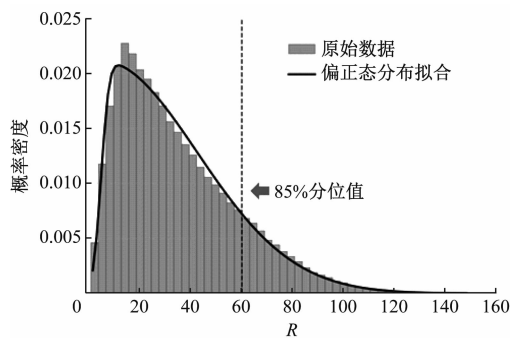


图6 OD 对  $R$  与其概率密度关系

Fig. 6 Relationship between OD pair travel time and probability density of  $R$



为确定抗扰动能力不足的 OD 对,将  $R \geq R(85\%)$  的 OD 对作为研究对象,其在行程时间与有效路径数量散点图中的分布如图 7 a) 所示。该类 OD 对主要位于散点图右下方,路径冗余性为 1 或 2,行程时间均在 60 min 以上。图 7 b) 在此基础上结合出行需求来识别脆弱性较高的 OD 对。在  $R \geq R(85\%)$  的 OD 对中,出行需求大于 100 人次的仅约占 4%,其余 OD 对虽然抗扰动能力很低,但因异常事件而受到影响的出行者数量极少,故应重点关注分布尾部的脆弱性较高的 OD 对。以图 7 b) 中出行需求排名前 5 的 OD 对为例,其起点均位于远郊,终点位于市区边缘,替代路径很少。

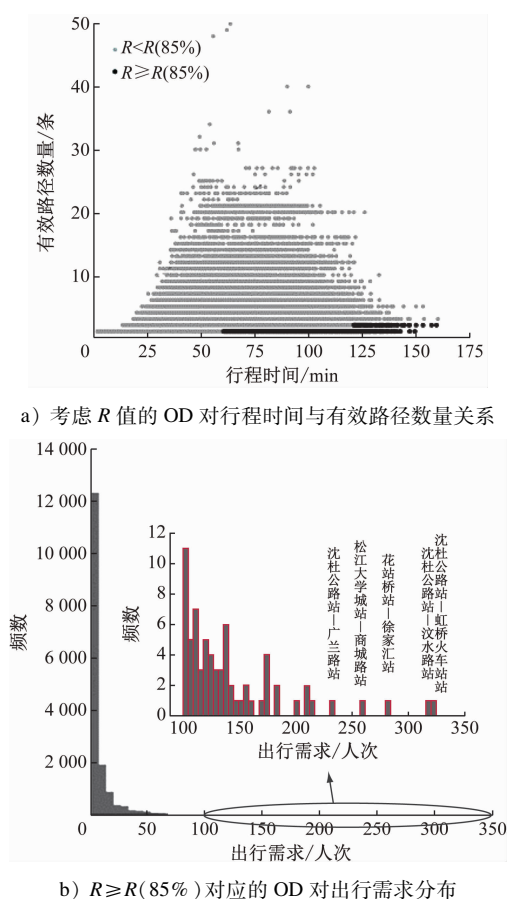


图 7 考虑  $R$  值和出行需求的关键 OD 对分布

Fig. 7 Distribution of key OD pairs considering  $R$  value and travel demands

## 4 结语

1) 本文提出的网络通达性指标可同时反映网络自身结构特征及其与居民出行需求的匹配性,对于评价网络对城市发展的支撑作用具有参考意义。计算结果表明,上海城市轨道交通网络通达性相对

较好,能够较好支撑其经济活动范围和城市空间拓展,但随着网络规模的持续扩大,该指标仍需进一步提升。

2) 本文基于线路换乘时间和出行者路径选择行为,采用有效路径数量代表路径冗余性水平,构建了冗余性评价方法,对面向韧性提升的网络规划及运营具有一定参考价值。当前上海城市轨道交通网络大多数出行需求缺乏失效场景下的替代路径,有必要在规划和运营中重点关注低路径冗余性、高通勤出行需求的 OD 对。

3) 本文采用行程时间与有效路径数量之比  $R$  来衡量 OD 对的抗扰动能力,发现其服从偏正态分布;结合出行需求可识别出出行需求较大且脆弱性较高的若干 OD 对,发现其起点均位于远郊,终点位于市区边缘,因此需要提升此类出行需求的路径冗余性。新建市域铁路线路或城市轨道交通环线、切向联络线是较为有效的方法,能够减轻异常事件对抗扰动能力较低的 OD 对的影响。

## 参考文献

- [1] 刘建军, 陈颖彪, 千庆兰, 等. 广州市交通网络的综合通达性及其空间特征[J]. 经济地理, 2016, 36(2): 45.  
LIU Jianjun, CHEN Yingbiao, QIAN Qinglan, et al. Guangzhou comprehensive accessibility and its spatial characteristics[J]. Economic Geography, 2016, 36(2): 45.
- [2] 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.
- [3] MINE H, KAWAI H. Mathematics for reliability analysis[M]. Tokyo: Asakura-shoten, 1982.
- [4] IIDA Y. Basic concepts and future directions of road network reliability analysis[J]. Journal of Advanced Transportation, 1999, 33(2): 125.
- [5] 刘韶曼. 城市轨道交通网络可达性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.  
LIU Shaoman. Research on accessibility of urban rail transit network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [6] HANSEN W G. How accessibility shapes land use[J]. Journal of the American Institute of Planners, 1959, 25(2): 73.
- [7] BERDICA K. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done[J]. Transport Policy, 2002, 9(2): 117.
- [8] MATTSOON L G, JENELIUS E. Vulnerability and resilience of transport systems—A discussion of recent research[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015, 81: 16.
- [9] XU X, CHEN A, JANSUWAN S, et al. Transportation network redundancy: Complementary measures and computational methods

- [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 114: 68.
- [10] DIAL R B. A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration[J]. Transportation Research, 1971, 5(2): 83.
- [11] ZHU W, FAN W, WAHABALLA A M, et al. Calibrating travel time thresholds with cluster analysis and AFC data for passenger reasonable route generation on an urban rail transit network[J]. Transportation, 2020, 47: 3069.
- [12] MA Z, YANG X, WU J, et al. Measuring the resilience of an urban rail transit network: A multi-dimensional evaluation model[J]. Transport Policy, 2022, 129:38.
- [13] 陈少沛. 城市轨道交通网络通达性度量与空间特征分析: 以广州市为例[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(3): 109.  
CHEN Shaopei. Urban rail transit network accessibility measure and spatial characteristics analysis: a case study of Guangzhou [J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(3): 109.
- [14] 王姣娥, 熊美成, 黄洁. 时空约束下的地铁可达性研究: 以北京为例[J]. 地理科学, 2022, 42(1): 83.  
WANG Jiaoe, XIONG Meicheng, HUANG Jie. Subway accessibility under space-time constraints: a case study of Beijing[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(1): 83.
- [15] LI T, RONG L. 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.
- [16] JING W, XU X, PU Y. Route redundancy-based approach to identify the critical stations in metro networks: A mean-excess probability measure[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(6): 781.
- [17] 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: 126517.
- [18] 陆化普, 王继峰, 张永波. 城市交通规划中交通可达性模型及其应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(6): 781.  
LU Huapu, WANG Jifeng, ZHANG Yongbo. Model and application of transport accessibility in urban transport planning[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2009, 49(6): 781.
- [19] 杜鹏程. 城市轨道交通服务综合评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
DU Pengcheng. Comprehensive evaluation of urban rail transit services[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [20] WANG Z, XU X. Assessing route redundancy of freeway networks in Mega-city regions[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 204: 107204.
- [21] ZHAO R, XU X, CHEN A. Alternative method of counting the number of efficient paths in a transportation network[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2022, 18(3): 1207.
- [22] 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: 102448.
- 收稿日期:2023-04-10 修回日期:2023-05-23 出版日期:2025-06-10  
Received:2023-04-10 Revised:2023-05-23 Published:2025-06-10
- 通信作者:张琦,高级工程师,zqglm@aliyun.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license