

城市轨道交通网络拥堵易发点的识别及评价

汪瑞琪¹ 张 纓²

(1. 广东省交通运输规划研究中心, 510101, 广州; 2. 同济大学交通运输工程学院, 201804, 上海//第一作者, 工程师)

摘 要 在城市轨道交通物理拓扑层、设施能力层与客流分布层网络模型基础上, 构建了多属性网络。阐述了网络拥堵易发点的网络拓扑、网络运输能力及网络客流等特征指标, 并采用基于 AHP-熵权法的组合权重法对拥堵易发点进行拥堵风险的辨识和评估, 探究了网络拓扑结构、运输能力和客流需求之间的关联性。在北京轨道交通的实例中, 识别的拥堵易发点多为衔接郊区线与市区线的换乘站。这验证了识别和评价方法的有效性和实用性。

关键词 城市轨道交通网络; 拥堵识别; 客流特征

中图分类号 U293.1⁺3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.08.035

Identification and Evaluation of Congestion-prone Points in Urban Rail Transit Network

WANG Ruiqi, ZHANG Ying

Abstract Based on the network model of physical topology layer, facility capability layer and passenger flow distribution layer of urban rail transit, a multi-attribute network is constructed. The feature indicators of network congestion-prone points, such as network topology, network transportation capacity, and network passenger flow are expounded, and combination weight method based on AHP-entropy weight method is adopted to identify and evaluate the congestion risk of congestion-prone points, and to explore correlation among network topology structure, transportation capacity and passenger flow demand. In the case of Beijing Rail Transit, most of the identified congestion-prone points are the transfer stations that connect suburban line and urban line. This verifies the validity and practicability of the identification and evaluation method.

Key words urban rail transit network; congestion identification; passenger flow characteristics

First-author's address Guangdong Provincial Transportation Planning & Research Center, 510101, Guangzhou, China

目前,我国各大城市的城市轨道交通系统已由单纯的线路运营阶段过渡到网络运营阶段,呈现出网络结构复杂、客运量大、突发事件传播快等趋势。

日益增长的客流量使得城市轨道交通系统的客流与运能矛盾突出,客流拥堵已成为常态。城市轨道交通网络面临着严峻的安全运营挑战并迫切需求相应的应急策略。

现有对交通网络拥堵的识别主要考虑复杂网络特征或网络行车流。文献[1]将复杂网络应用于城市轨道交通网络,发现其具有小世界和无标度特征;文献[2]利用复杂网络理论来分析城市轨道交通网络换乘节点对网络运营效率的影响;文献[3]提出了基于 TOC(约束理论)的能力瓶颈定位方法;文献[4]结合网络最大流理论,根据线路运输能力来判断交通网络中的瓶颈。本文根据城市轨道交通为一开放、复杂的网络系统,从其拓扑结构、运输能力及客流特征等对网络拥堵进行辨识,并深入分析其拥堵诱因,为拥堵疏解提供依据。

1 城市轨道交通网络拥堵界定

对城市轨道交通网络而言,区间和车站在网络拥堵的形成和传播过程中相互作用。为此,应先分别对区间拥堵和车站拥堵进行定义,再考虑二者的独立性及其关联性,进而综合评价城市轨道交通网络的拥堵状态。

1.1 车站拥堵

目前,城市轨道交通车站内部客流情况较为复杂,所以应针对不同的交通设施或步行空间,采用客流负荷水平、客流密度、走行速度等指标进行综合评价。

文献[5]根据客流密度将排队区域、通道、楼梯等不同检测区域的拥堵状态进行强度等级划分;文献[6]提出以排队长度和等待时间作为客流拥堵的评价指标,在采用聚类分析法进行样本数据分析的基础上评定车站的拥堵状态。本文使用站台客流密度和进出站客流量等客流强度指标来评估车站的拥堵状态。车站的客流强度越大,越容易发生拥堵。

1.2 区间拥堵

区间拥堵是指在城市轨道交通网络上区间运行列车的客流拥堵程度,一般使用断面满载率或列车满载率指标进行评价。北京轨道交通网络使用不同颜色来区分区间拥堵状态(见表1)。

表1 北京轨道交通的区间拥堵状态划分		
拥堵状态	颜色	断面满载率
舒适	绿色	0 ~ <0.8
较拥堵	黄色	0.8 ~ <1.0
拥堵	红色	1.0 ~ <1.2
极拥堵	黑色	≥1.2

本文定义当断面满载率大于0.8时,区间拥堵状态为“拥堵”。断面满载率越大,则越易发生拥堵。

2 拥堵易发点的识别及评价方法

2.1 城市轨道交通网络的构建

城市轨道交通网络的一体化构建不仅基于网络拓扑结构和设施服务能力,更要考虑客流分布特征。考虑多方面因素构建的城市轨道交通3层模型如图1所示。在图1中,物理拓扑层模型主要是基于车站与区间等固定设备形成的拓扑网络模型,设施能力层模型主要是基于区间线路运输能力与车站设施服务能力形成的能力网络模型,客流分布层模型主要是基于区间客流量及车站客流量形成的客流网络模型。

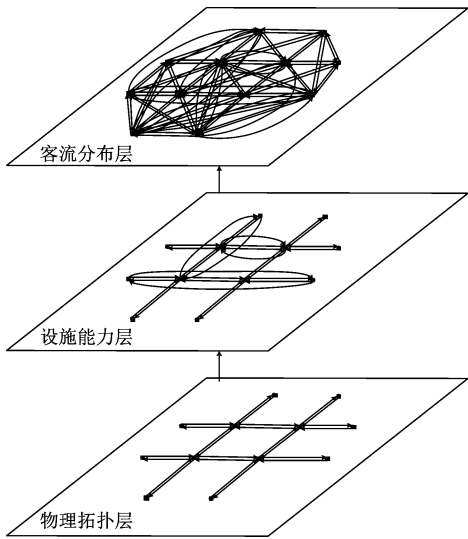


图1 城市轨道交通网络3层模型示意图

结合城市轨道交通系统的结构特点,构建多属

性网络 $G = (V, E)$,如图2所示。网络节点即车站的属性集合为:

$$V = \{v_i, c_i, w_i \mid i = 1, 2, \dots, N\} \tag{1}$$

式中:

- v_i ——网络中第 i 个车站;
- c_i ——车站 i 的设施服务能力;
- w_i ——车站的容纳客流量。

网络边即区间的属性集合为:

$$E = \{e_{ij}, c_{ij}, w_{ij} \mid i, j = 1, 2, \dots, N; i \neq j\} \tag{2}$$

式中:

- e_{ij} ——车站 i 与其相邻车站 j 之间的区间是否连通, $e_{ij} = 0$ 表示不连通, $e_{ij} = 1$ 表示连通;
- c_{ij} —— $i \rightarrow j$ 区间的运输能力;
- w_{ij} —— $i \rightarrow j$ 区间的断面客流量。

V 及 E 各按物理拓扑层、设施能力层及客流分布层划分。

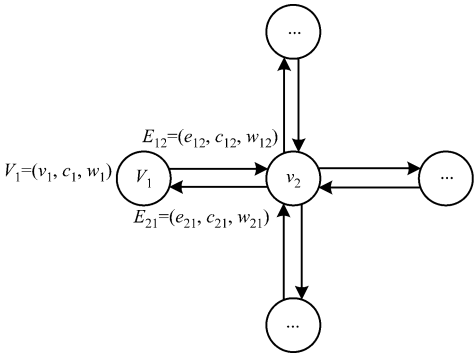


图2 城市轨道交通多属性网络示意图

2.2 网络拓扑指标

根据复杂网络理论,计算城市轨道交通网络拓扑特征指标值。网络拓扑指标中,节点度反映了网络节点(车站)的换乘系数,接近中心性反映了网络节点(车站)居于网络中心位置的程度^[2],介数中心性反映了网络拓扑结构和乘客出行特征对节点拥堵情况的综合影响^[7]。

2.3 网络运输能力指标

结合车站设施服务能力与区间运输能力两方面进行城市轨道交通网络运输能力指标特征值的计算,从车站和区间的可协调性来评价设施能力层对节点拥堵情况的综合影响。

2.3.1 车站规模

一直以来,相关研究将城市轨道交通换乘站视为简单的空间换乘点,在发生拥堵时其内部空间会全面同时处于拥堵状态。基于这样的假设,换乘站

的内部结构会被忽略,进而出现较大的拥堵判断偏差。车站规模 l_i 主要用于评价换乘站的空间规模。

当车站 i 为双线换乘站时 l_i 以换乘端点的直线距离衡量,有:

$$l_i = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3)$$

当车站 i 为三线换乘站时 l_i 以换乘端点外接圆的半径 r_i 衡量。有:

$$r_i = \frac{abc}{\sqrt{(a^2 + b^2 + c^2)^2 - 2(a^4 + b^4 + c^4)}} \quad (4)$$

$$l_i = nr_i \quad (5)$$

式中:

- x_1, x_2 ——分别为换乘端点的横坐标;
- y_1, y_2 ——分别为换乘端点的纵坐标;
- a, b, c ——分别为换乘端点间的直接距离;
- n ——换乘线路条数。

式(5)所使用的外接圆法也适用于四线及以上换乘站。

2.3.2 单位能力强度

单位能力强度 m_i 表示节点 i 邻边的平均权重。在城市轨道交通网络中 m_i 为车站 i 相邻区间的平均运输能力之和,表征节点在能力层中的重要度。 m_i 越小,越容易发生拥堵。其计算式为^[9]:

$$m_i = \frac{s_i}{k_i} = \frac{\sum (c_{ij} + c_{ji})}{k_i} \quad (6)$$

式中:

- s_i ——节点 i 的区间能力强度;
- k_i ——节点 i 的度,即和节点 i 相关联的边数。

2.3.3 区间能力介数

区间能力介数 ω_i 表示节点 i 的运输能力符合度^[10],考虑了乘客出行特征及区间运输能力对节点 i 拥堵状态的综合影响。对于节点 i, ω_i 为:

$$\omega_i = \sum c_{p,q,i} / \sum c_{p,q} \quad (7)$$

式中:

$c_{p,q,i}$ ——以节点 p 为起点,经过节点 i ,至节点 q 的最短路径运输能力 $p, q, i \in V$,且 $p \neq q \neq i$;

$\sum c_{p,q,i}$ ——节点对 p, q 之间经过节点 i 的最短路径运输能力之和;

$\sum c_{p,q}$ ——网络中所有节点对之间的最短路径运输能力之和。

2.3.4 能力差异系数

能力差异系数 d_i 表示车站 i 相邻区间运输能力

的差异性,可衡量区间运输能力的协调性。 d_i 越大,运输能力差异性越大,发生拥堵的可能性更高。其计算式为:

$$d_i = k_i \sum \left[\left(\frac{c_{ij}}{s_i} \right)^2 + \left(\frac{c_{ji}}{s_i} \right)^2 \right] \quad (8)$$

2.4 网络客流指标

网络客流指标主要结合区间和车站客流状态进行区间客流负荷度和车站客流负荷度的综合评判,从能力与客流的匹配度计算客流对节点拥堵状态的影响。

2.4.1 区间客流负荷度

区间客流负荷度 g_i 表示车站 i 相邻区间的平均负荷强度,即客流需求与运输能力的匹配程度。 g_i 越大,则供需矛盾越大,越可能发生拥堵。其计算式为^[11]:

$$g_i = Q_i / s_i \quad (9)$$

$$Q_i = \sum (w_{ij} + w_{ji}) \quad (10)$$

式中:

Q_i ——节点 i 相邻区间的断面客流量之和。

2.4.2 车站客流负荷度

车站客流负荷度 P_i 表示车站 i 的站台平均客流密度,可结合车站的进出站客流量等指标来进一步评判站台客流模态。 P_i 越大,服务水平越低,越容易发生拥堵。其计算式为^[12]:

$$P_i = \frac{u_i \alpha}{a_{i,s} s_i} \quad (11)$$

式中:

u_i ——节点 i 的高峰小时客流量,包括高峰小时进站客流量、出站客流量和换乘客流量;

$a_{i,s}$ ——车站 i 内的站台有效面积;

α ——调整系数,与站台面积、客流流线及行车组织等有关。

2.5 拥堵易发点的评价

本文采用 AHP(层次分析法)-熵权法对拥堵易发点进行评价。AHP-熵权法能兼顾主观的决策意见和客观的数值因素,在确定指标权重的过程中最大限度地减小了赋权的主观性,使求得的指标权重更为合理、可行。

对城市轨道交通网络拥堵易发点的排序方法应呈现多目标性和多层次性。根据拥堵易发点识别指标体系,以物理拓扑层、设施能力层及客流分布层对应的网络拓扑指标、网络运输能力指标及网络客流指标等3个特征指标作为准则层,建立城市

权重系数。

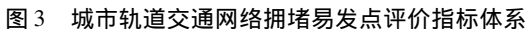
3 实例应用

北京轨道交通网共有 18 条运营线路(包括 17 条地铁线路和 1 条机场轨道交通线路),覆盖北京市 11 个市辖区,总长 554 km。其发展已步入成熟期,网络结构复杂度高,行车组织关联性强,实时客流波动性大,故保障其运营的安全、有序及可控尤为重要。本文以北京轨道交通网络为实例,对城市轨道交通网络拥堵易发点的识别和评价方法进行应用。

3.1 北京轨道交通网络拥堵易发点的识别及评价

结合北京轨道交通网络运营数据,本文选取特征指标下的9个细化指标(如图3所示)作为拥堵易发点识别指标,计算各节点的准则层特征指标值,进而识别网络拥堵易发点,并进行评价。

通过对基础数据的处理及计算,得出按不同特征指标排名的前 10 位拥堵易发点,如表 2 所示。将表 2 中的拥堵易发点进行可视化处理,得到北京轨道交通拥堵易发点分布图,如图 4 所示。在表 2 的基础上,选取北京轨道交通网络中排序前 20% 的拥堵易发点,寻找按不同特征指标评价结果相重合的拥堵易发点(以下称为“拥堵重合点”),探究网络拓扑结构、运输能力和客流需求之间的关联性。



本文主要通过准则层的3个特征指标对城市轨道交通网络拥堵易发点进行识别及分析优化。

在识别拥堵易发点前,先对指标进行归一化处理^[13]。考虑指标样本数据和评价值的阶段变化情况等因素,采用阈值法进行指标的归一化处理。

由于评价目的不同,评价指标之间的相对重要程度也会有所差异。对于给定评价对象的指标值,对其进行归一化处理后,按照权重系数进行评价。权重系数采用结合主客观赋权结果的组合赋权法确定^[13],为:

$$\lambda_{\gamma} = \lambda_{\gamma A} \lambda_{\gamma B} / (\sum \lambda_{\gamma A} \lambda_{\gamma B}) \quad (12)$$

式中:

λ_{γ} ——第 γ 个评价指标的组合权重系数;

$\lambda_{\gamma,A}$ ——基于层次分析法^[14]的第 γ 个指标的主观权重系数;

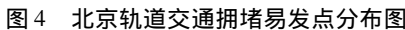
 $\lambda_{\gamma B}$ ——基于熵权法^[13-15]的第 γ 个指标的客观

表2 北京城市轨道交通拥堵易发点排名结果

排名	拥堵易发点		
	按网络拓扑 指标排序	按网络运输 能力指标排序	按网络客流 指标排序
1	西直门站	三元桥站	国贸站站
2	朝阳门站	东直门站	金台夕照站
3	车公庄站	望京西站	三元桥站
4	建国门站	奥林匹克公园站	西二旗站
5	国贸站	T3 航站楼站	四惠东站
6	白石桥南站	T2 航站楼站	呼家楼站
7	军事博物馆站	望京站	团结湖站
8	望京西站	大屯路东站	四惠站
9	六里桥站	军事博物馆站	大望路站
10	鼓楼大街站	七里庄站	亮马桥站

在按各特征指标排序前 50 位的拥堵易发点中,共有 31 个拥堵重合点,重合系数达 62%。这说明按准则层不同特征指标识别出的拥堵易发点具有一定的协调性。统计北京轨道交通各站高峰小时的进站客流量与换乘客流量之和,并进行排序。拥堵重合点的客流量排序结果如表 3 所示。

由表 3 可见:对 3 项特征指标排名均为前 50 位的车站而言,其客流量排名也均位于前 10%;在客流量排名前 10 位的车站中,有 80% 为拥堵重合点。这验证了本文评价方法的可靠性。

3.2 北京轨道交通网络拥堵易发点的特征分析

3.2.1 原发性拥堵的特征分析

按 3 项特征指标评价均为拥堵易发点的拥堵重合点(如国贸站、军事博物馆站、望京西站、宋家庄站等),以及部分按网络拓扑指标与网络客流指标评价均为拥堵易发点的拥堵重合点(如北土城站、大望路站、北京西站站等),都是连接市区线与郊区线的换乘站。这类节点在高峰时段容易引发原发性拥堵。经分析,这些节点都具有以下特征:连通性好,节点度和介数中心性值都较大;市区线和郊区线快慢车发车频次不同,导致两线的能力差异系数较大;因其在网络中的区位特征而承担了较大的通勤客流需求。

3.2.2 继发性拥堵的特征分析

积水潭站、东十四条站、六里桥东站、生命科学园站等位于换乘站之间的中间站,其介数中心性值较大,在网络中承担着连接的重要作用。一方面,

在全网最短路径中,经过这些节点的路径占比较大;另一方面,这些节点至少有一段相邻区间与换乘站相连,其通行能力协调性较差。因此,一旦邻近的换乘站发生拥堵,则此类车站很容易受到影响,发生继发性拥堵。

3.3 北京轨道交通网络拥堵易发点的应对思路

根据特征指标计算结果,可以分析拥堵易发点物理拓扑层、设施能力层及客流分布层的协调性,探究客流拥堵的诱发因素,进而采取相应的应对措施,以缓解拥堵问题。

1) 物理拓扑层与客流分布层的协调性不足及应对思路。金台夕照站和西二旗站等地铁站的介数中心性指标值低而客流负荷度高,从网络拓扑指标来看,此类节点不属于拥堵易发点;但从网络客流指标来看,客流需求过大,容易诱发拥堵。因此,此类节点需在早晚高峰时段采取客流限流措施,以保障城市轨道交通的安全运营。

2) 设施能力层与客流分布层的协调性不足及应对思路。郭公庄站的设施输送及容纳能力不足,导致该站容易发生拥堵,故应改善郭公庄站的运输组织。

3) 物理拓扑层、设施能力层与客流分布层的协调性不足及应对思路。对于西直门站、宋家庄站及国贸站等 3 个特征指标均不佳的拥堵重合点,不能采取单一措施解决拥堵问题,既要通过修建新线等来调整网络结构,又要通过开行交路来协调运输组织,还要采取限流等客流需求控制措施,三管齐下,提高运营服务水平。

4 结语

本文在构建城市轨道交通多属性网络的基础上,基于物理拓扑层、设施能力层与客流分布层,计算分析网络拥堵易发点的网络拓扑指标、网络运输能力指标及网络客流指标,采用基于 AHP-熵权法的组合权重法对拥堵易发点进行拥堵风险的辨识和评估。北京轨道交通的实例应用结果表明:拥堵重合点主要是衔接郊区线与市区线的换乘站,根据不同层面拥堵易发点的识别结果可探究各车站拥堵的诱发因素,为大客流状态下的乘客组织和拥堵疏解策略提供理论基础。

表 3 北京轨道交通拥堵重合点及客流量统计结果拥堵易发点评价

拥堵重合点的类型	车站类型	站名	按客流量排名	高峰小时客流量/(人次/h)	拥堵易发点评价结果		
					按网络拓扑指标评价	按网络运输能力指标评价	按网络客流指标评价
按 3 项特征指标评价均为拥堵易发点	三线换乘站	宋家庄站	1	40 444	√	√	√
		西直门站	2	31 392	√	√	√
		国贸站	4	26 157	√	√	√
	二线换乘站	知春路站	8	19 399	√	√	√
		芍药居站	11	18 234	√	√	√
		望京西站	12	17 908	√	√	√
		磁器口站	20	15 223	√	√	√
		军事博物馆站	26	12 559	√	√	√
		望京站	30	10 400	√	√	√
	二线换乘站	东直门站	14	17 222	√	√	×
		鼓楼大街站	21	15 088	√	√	×
		七里庄站	45	8 596	√	√	×
		呼家楼站	3	28 048	√	×	√
		四惠东站	6	23 662	√	×	√
		建国门站	7	22 187	√	×	√
		北土城站	10	18 326	√	×	√
		四惠站	22	15 019	√	×	√
		朝阳门站	23	13 556	√	×	√
		金台路站	25	12 765	√	×	√
		北京西站	27	12 370	√	×	√
		大望路站	71	5 240	√	×	√
按 2 项特征指标评价均为拥堵易发点	中间站	郭公庄站	14	17 518	×	√	√
		三元桥站	70	5 540	×	√	√
		积水潭站	52	7 099	√	×	√
		六里桥东站	53	6 682	√	×	√
		东四十条站	84	4 287	√	×	√
		永安里站	110	3 502	√	×	√
		生命科学园站	58	6 210	×	√	√
		旧宫站	79	4 306	×	√	√
		3 号航站楼站	154	1 907	×	√	√
		2 号航站楼站	170	1 764	×	√	√

注: √表示该站按对应的特征指数评价为拥堵易发点; ×表示该站按对应的特征指数评价为非拥堵易发点。

参考文献

[1] 王海燕. 基于复杂网络的城市轨道交通网络形态分析[D]. 北京: 北京交通大学 2014.

[2] 李明高, 杜鹃, 朱宇婷, 等. 城市轨道交通换乘节点与网络运行效率关系研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015 (2): 48.

[3] 皇妍妍. 基于网络的城市轨道交通运输能力瓶颈问题研究[D]. 北京: 北京交通大学 2011.

[4] 潘瑞. 公交网络瓶颈识别方法研究[D]. 北京: 北京交通大学 2012.

[5] 李婷婷, 宋瑞, 何世伟. 综合客运枢纽行人集散设施瓶颈识别方法[J]. 交通信息与安全 2014 (4): 31.

(下转第 175 页)

表 6 方案 2 各施工步骤下成都地铁 18 号线海西区间隧道结构变形值

施工阶段	竖向最大位移/mm	水平向最大位移/mm
S1	+7.153	1.587
S2	+6.292	1.487
S3	-0.288	0.278
S4	+1.306	0.323
S5	-0.293	0.232
S6	+8.172	1.430
S7	+7.701	1.389
S8	-0.433	0.271
S9	-0.456	0.269

2) 采用方案 2 在青岛路立交节点 B 匝道施工阶段,海西区间隧道结构最大隆起量为 8.2 mm,最大沉降量为 0.5 mm,最大水平位移为 1.6 mm。基坑隆起量超过地铁区间隧道结构变形预警值^[4],结构安全风险不可控。

3) 采用方案 2 扩大基础与海西区间隧道竖向距离较近,B 匝道使用阶段还会对海西区间隧道产生长期振动影响。

综上所述,择优选择方案 1 作为成都青岛路立交节点上跨成都地铁 18 号线区间隧道的最终方案。

5 结语

随着地铁线网的不断加密,与地铁结构紧邻、

近邻的外部作业活动越来越多。地铁区间隧道上方市政建设工程的基础形式是应主要考虑的内容。本文对市政高架桥匝道上跨地铁隧道结构两种基础形式进行了数值计算分析。数值计算分析结果表明:市政建设工程采用桩基础结构形式可大大降低对地铁隧道结构的影响,基本不会对地铁隧道结构产生影响;在施工过程中应根据地铁隧道围岩情况采用不同的成桩工艺和保护措施,以最大限度减少对地铁隧道围岩的扰动;当桥梁基础与地铁区间隧道竖向距离较大时,可考虑采用扩大基础,但要保证作用在地铁隧道结构上的附加应力满足相关规范和设计要求。

参考文献

[1] 刘国斌,王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构安全保护技术规范: CJJ/T 202—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[3] 中华人民共和国交通运输部. 城市轨道交通运营管理规定: 中华人民共和国交通运输部令 2018 年第 8 号[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2018.

[4] 成都市发展和改革委员会. 成都市城市轨道交通管理条例: 成人发[2017]6 号[S]. 成都: 成都市发展和改革委员会, 2017.

(收稿日期: 2021 - 04 - 26)

(上接第 170 页)

[6] 贺杰. 城市轨道交通客流拥堵等级评价模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

[7] 于会,刘尊,李勇军. 基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. 物理学报, 2013(2) : 54.

[8] YANG Y, LIU Y, ZHOU M, et al. Robustness assessment of urban rail transit based on complex network theory: A case study of the Beijing Subway[J]. Safety Science, 2015, 79: 149.

[9] 汪波. 城市轨道交通网络运营理论与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.

[10] 张钰梅. 城市轨道交通路网客流拥挤传播特性及疏解策略研

究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.

[11] 李得伟,韩宝明,鲁放. 城市轨道交通网络瓶颈分析[J]. 城市轨道交通研究, 2011(5) : 49.

[12] 龚华靖. 上海轨道交通车站站台客运能力分析与研究[J]. 城市轨道交通研究, 2013(11) : 115.

[13] 翟向荣. 城市轨道交通车站设备通行能力匹配性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

[14] 吕永波. 系统工程[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2006.

[15] 王西. 基于熵权-双基点法的现代物流企业服务创新绩效评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.

(收稿日期: 2019 - 07 - 27)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》
服务热线 021—51030704