

# 基于传输贡献矩阵的城市路网节点重要性评估方法

陈亮<sup>1</sup>, 王京京<sup>1</sup>, 周志华<sup>2</sup>, 李巧茹<sup>1</sup>, 陈明明<sup>1</sup>

1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401

2. 广州市交通规划研究院, 广州 510230

**摘要** 在城市道路中,通常采用交叉口流量或道路连接数等单一指标确定路口重要性,很难保证突发事件下道路网络运行的可靠性。鉴于城市道路网络的无标度特性,以交通阻抗为权重,将城市道路网络抽象为加权网络,提出节点重要度传输贡献矩阵方法,评估道路交叉口重要性。该方法综合考虑交叉口所处路网位置、道路连接数及关联路段交通阻抗,采用节点效率值表示其位置信息,通过融合节点度值和交通阻抗值,构建交通信息传播过程中节点之间的重要度关联,以表示相邻路口间重要性依赖关系。以天津市区域路网为例计算各交叉口重要度,采取连续移除重要节点方式,模拟连锁故障过程,并将结果与节点收缩法进行对比。实证分析表明:在移除最重要的8个节点后,路网最大连通子图规模较节点收缩法降低9.10%,验证了该方法的有效性。

**关键词** 城市路网;交叉口节点;交通阻抗;复杂网络

城市道路网络是支撑城市区域经济和城市发展的重要基础设施。由于恶劣天气及交通事故等原因,北京、上海等诸多城市频繁发生大面积交通瘫痪,揭示了城市路网交通的脆弱性<sup>[1]</sup>。道路网络中,某些路口极易受到交通事件的破坏导致通行能力降低,引发关联路段车辆连锁排队,进而形成大面积的道路网络堵塞。因此,准确评估路网节点重要性,快速有效识别关键交叉口,对区域交通控制管理和拥堵预警具有重要的指导意义。

随着复杂网络小世界效应及无标度性的发现,复

杂网络研究逐渐成为多个学科共同关注的前沿热点。目前关于复杂网络的节点重要度研究广泛应用在通信网<sup>[2]</sup>、电力网<sup>[3]</sup>等多个领域中,已有研究表明城市道路网络满足复杂网络特性<sup>[4]</sup>。高自友等<sup>[5]</sup>从多个方面提出复杂网络在城市交通网络中的应用前景。部分学者从路网结构方面对道路网络节点重要度进行研究<sup>[6-7]</sup>,基于此,结合道路交通流影响,王力等<sup>[8]</sup>应用FCM模糊聚类方法对交叉口的重要性进行分类。王建强等<sup>[9]</sup>选取行程车速、延误等指标对城市道路交通关键节点进行辨别。郑黎黎等<sup>[10]</sup>提出行程时间介数、节点度等评价指标

收稿日期:2017-08-07;修回日期:2017-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51678212);北京城市交通协同创新中心项目

作者简介:陈亮,副教授,研究方向为道路交通管理科学与技术,电子信箱:karlchen@126.com;李巧茹(通信作者),副教授,研究方向为智能交通,电子信箱:qiaoruli129@126.com

引用格式:陈亮,王京京,周志华,等.基于传输贡献矩阵的城市路网节点重要性评估方法[J].科技导报,2018,36(6):105-111;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2018.06.013

建立基于灰色关联分析的节点重要性评估算法。文献[11]分别以路径长度、通行能力和交通效率为权重,对道路网络节点重要度进行排序。

以上研究没有兼顾节点的全局和局部特性。节点的重要性不仅受所在路网结构或道路交通流影响,也依赖于相邻节点连接关系的制约。周漩等<sup>[12]</sup>针对节点收缩法、介数法的不足,充分考虑节点在网络中的全局和局部重要性,基于重要度评价矩阵建立关键节点辨识算法。范文礼等<sup>[13]</sup>利用复杂网络理论,通过分析邻接节点间影响,提出一种基于网络传输效率矩阵的节点重要度排序方法。但研究对象均是具有普适性的复杂网络节点重要度。

本文基于复杂网络特征参数和道路网络交通流特性,结合节点效率值、节点度值和节点间交通阻抗值构建重要度传输贡献矩阵,提出基于该矩阵评估路网交叉口重要性的方法。该方法综合考虑交叉口自身位置信息和路网交通流影响,融合节点度值和交通阻抗值得到相邻路口间的重要度关联,全面评估道路交叉口重要性,使评价结果更加贴近路网交通实际情况。

## 1 复杂网络节点重要度

在复杂网络节点重要度评估中,节点自身的位置信息是研究的重点。范文礼等<sup>[13]</sup>定义节点效率表示节点在网络中位置。节点*i*的效率 $e_i$ 是指该节点与网络中其他节点间距离倒数之和的平均值,即

$$e_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{d_{ij}} \quad (1)$$

式中, $n$ 为网络中节点数目; $d_{ij}$ 为节点*i*与*j*之间的最短距离。

在实际交通出行中,一些交叉口易受突发事件影响发生拥堵,并逐渐向路网中相邻路段和节点进行传播。节点效率表达了该节点到网络中其他节点的平均难易程度,体现了对网络信息传输所做的贡献。节点效率值越大,表明该节点处于网络中心位置的可能性越高,发挥信息传输作用越大。可见,节点效率在一定程度上反映节点的重要程度。

网络由节点和边共同组成,节点的重要度必然会受到其相邻节点的影响,如图1所示。若节点7与节点9之间没有连边,则节点7对节点9没有太大影响,但二者有连边存在,导致节点9的度值、效率值乃至整个网

络的最短路径等特性在节点7影响下发生改变。由此可知,相邻节点间存在重要性依赖关系,相邻节点连边对节点的重要度存在贡献;另一方面,节点5和节点7在网络中的度值相同,但由于节点在网络中的位置及其相邻节点不同,造成二者重要程度明显不同。同理,各道路交叉口在路网中所处地理位置不同,连接的路段各异,在保持网络连通性和可靠性方面发挥的作用也不同,从而表现出不同的重要性。本文利用网络邻接矩阵,融合节点效率值、度值和交通阻抗值,构建节点重要度传输贡献矩阵,计算道路交叉口重要度。

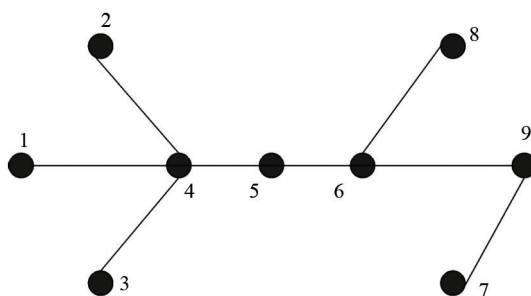


图1 节点间重要性依赖关系示意

Fig. 1 Dependencies of importance between nodes

## 2 路网节点重要度评估

### 2.1 城市道路加权网络模型

城市道路网络可抽象为一个无向加权网络,该网络用图 $G=(V, E, W)$ 表示。道路交叉口是2条或者2条以上道路相交的区域,是车辆与行人转向和疏散的必经之地,对应于节点*i*,相邻道路交叉口之间的街道对应于边 $e_{ij}$ ,车辆在道路上行驶遇到的阻抗(所花费的行驶时间)对应于边的权重 $w_{ij}$ 。各路段阻抗是道路出行者出行考虑的必要因素,在很大程度上影响路网交通流分布,因此有必要将道路阻抗引入加权网络模型中。

### 2.2 节点重要度传输贡献矩阵

任何互相连通的节点间都存在一定的节点重要性依赖关系,而最直接、重要的依赖关系存在于相邻(直接相连)节点之间。一旦节点间相互连接,就可能会导致节点重要度变化,通过节点之间的传输,形成一个重要度贡献关系的拓扑。为衡量相邻节点间重要性传输比的大小,需要考虑网络中不同节点之间连接关系对节点重要性的影响。周漩等<sup>[12]</sup>定义节点重要度贡献矩

阵,在节点数为  $n$ ,平均度值为  $\bar{k}$  的无自环无向网络中,若节点  $i$  的度为  $D_i$ ,则  $i$  将自身重要度的  $D_i/\bar{k}^2$  贡献给每一个相邻节点。本文结合边权对节点贡献的影响,得到加权网络节点对其相邻节点的传输比。对于相异性加权网络,权重越小,说明两节点之间关系越紧密,因此,定义某一节点  $j$  对其相邻节点  $i$  的重要性传输比  $H_{ij}$  为

$$H_{ij} = \frac{D_j}{w_{ij}\bar{k}^2} \quad (2)$$

式中,  $D_j$  为节点  $j$  的度值;  $w_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间连边的权重。

由定义可以看出  $H_{ij}$  与节点自身的度值和节点对之间的边权有关,度值越高,权重越小,则对相邻节点的重要性影响越大。为直观地说明节点重要度传输过程,假设某网络中节点  $i$  与相邻节点  $j, x, y, z$  的连接关系如图 2 所示。由于相邻节点间存在重要性依赖关系,节点  $i$  重要度分别受到节点  $j, x, y, z$  重要性影响,同理,这些节点重要度也依赖于节点  $i$  重要性。以相邻节点  $j$  为例,  $j$  将自身重要度的  $D_j/w_{ji}\bar{k}^2$  传递给  $i$ ,同时节点  $i$  以传输比  $D_i/w_{ij}\bar{k}^2$  贡献给  $j$ 。

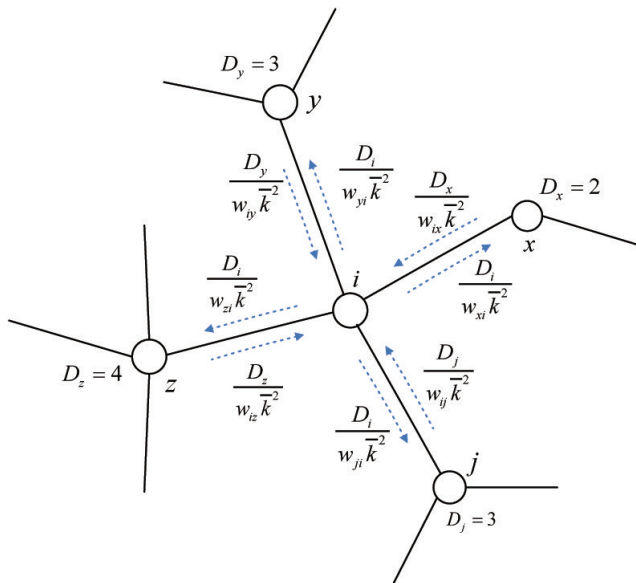


图 2 节点  $i$  及相邻节点的重要性双向传输示意

Fig. 2 Bidirectional transmission of important degree between node  $i$  and adjacent nodes

结合节点自身位置信息,融合节点效率值,确定加权网络的节点重要度传输贡献矩阵  $H_E$ 。网络中每个节点重要度依赖于其余节点的程度可通过  $H_E$  矩阵计算

$$H_E = \begin{bmatrix} e_1 & \delta_{12} \frac{D_2}{w_{12}\bar{k}^2} e_2 & \cdots & \delta_{1n} \frac{D_n}{w_{1n}\bar{k}^2} e_n \\ \delta_{21} \frac{D_1}{w_{21}\bar{k}^2} e_1 & e_2 & \cdots & \delta_{2n} \frac{D_n}{w_{2n}\bar{k}^2} e_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1} \frac{D_1}{w_{n1}\bar{k}^2} e_1 & \delta_{n2} \frac{D_2}{w_{n2}\bar{k}^2} e_2 & \cdots & e_n \end{bmatrix}$$

其中,  $\delta_{ij}$  为节点的邻接信息,当节点对之间直接相连时,  $\delta_{ij} = 1$ , 否则  $\delta_{ij} = 0$ 。通过网络邻接矩阵表示节点之间的连接关系。

利用节点重要度传输贡献矩阵反映相邻节点间的重要性依赖关系。将道路网络节点重要度  $M_i$  定义为节点自身效率与该节点对相邻节点重要性依赖度之和的乘积,即

$$M_i = e_i \sum_{j=1, j \neq i}^n \delta_{ij} D_j e_j / w_{ij} \bar{k}^2 = e_i \sum_{j \in N_i} H E_{ij} \quad (3)$$

式中,  $N_i$  表示  $i$  的相邻节点集合;  $H E_{ij}$  表示节点  $i$  对相邻节点  $j$  的重要性依赖度。

### 2.3 计算步骤

基于传输贡献矩阵的路网节点重要性评估流程如图 3 所示。

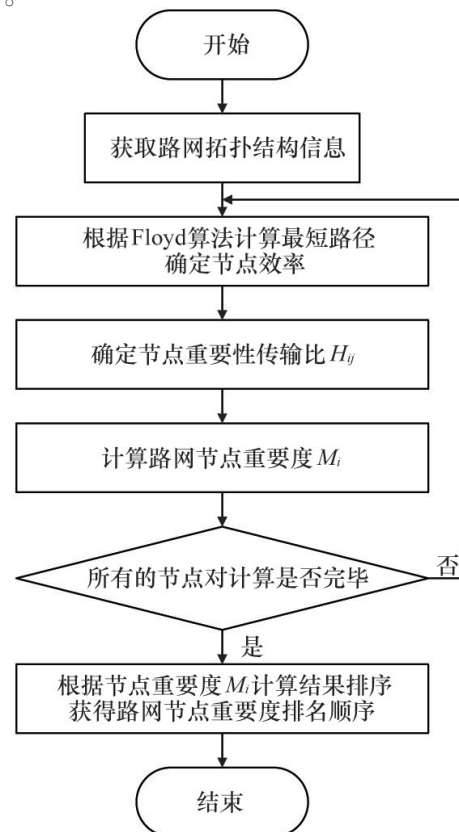


图 3 节点重要性评估流程

Fig. 3 Flow chart of importance evaluation for nodes

输入网络带权邻接矩阵,利用Floyd算法计算各个节点*i*到其余各节点的最短距离 $d_{ij}$ 。依次插入中间节点*k*,对每个节点*i*,比较当前距离 $d_{ij}$ 和 $d_{ik}+d_{kj}$ 的大小,取两者较小值,递归进行*n*次更新,得到所有节点对之间的最短路径矩阵。根据式(1)确定各个节点效率 $e_i$ ;由式(2)计算各节点的度值 $D_i$ 和网络平均度值 $\bar{k}$ ,确定节点重要性传输比 $H_i$ ;由式(3)计算路网节点重要度 $M_i$ ,根据重要度大小确定各节点排序结果。

由该步骤可知,该方法的时间复杂度取决于所有节点对之间最短路径的计算。因此,该方法与Floyd算法的时间复杂度相同,为 $O(n^3)$ 。

### 3 实证分析

以天津市区域路网为例进行验证。路网拓扑结构包含30个节点和61条边,如图4所示,其中节点表示交叉口,边表示路段。根据构建的节点重要度传输贡献矩阵计算节点重要度。选取节点重要度排序前10位的节点,并将其节点度值、效率值和依赖度等指标列表如表1。

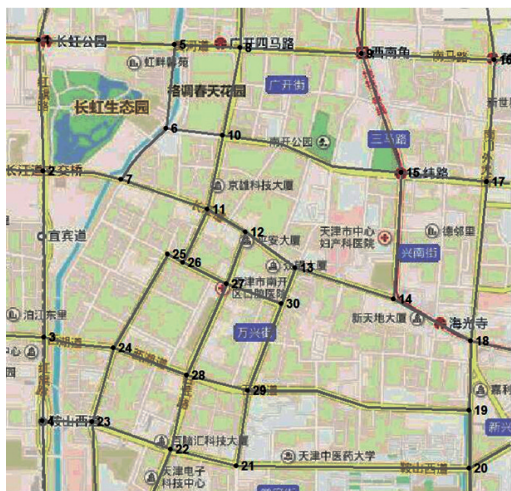


图4 区域路网拓扑图

Fig. 4 Regional road network topology

1) 重要度较高的节点11、12、27和26等主要集中在长江道与广开四马路、白堤路交叉口附近,其中长江道为贯穿东西的交通主干道,是负担交通流量的主体,广开四马路、白堤路等作为连接南北方向的主干路,同时承载着较多的交通流量。这些交叉口附近呈现明显的交通流量聚集性。

2) 节点重要度排名前10的度值分布在3和4之

表1 节点重要度评价结果

Table 1 Evaluation results of node importance

排名	节点编号	节点度值	节点效率值	重要性依赖度	节点重要度
1	11	4	0.3047	0.3574	0.1089
2	12	3	0.3031	0.3500	0.1061
3	27	4	0.2914	0.3345	0.0975
4	26	3	0.2970	0.2511	0.0746
5	10	4	0.2249	0.3098	0.0697
6	15	4	0.1901	0.3129	0.0595
7	13	3	0.2767	0.1535	0.0425
8	28	4	0.2390	0.1643	0.0393
9	29	4	0.2383	0.1430	0.0341
10	24	4	0.2136	0.1498	0.032

间。节点12、26和13的度为3,相比其他节点而言,节点自身效率值较大,因此重要性有所提升。表明本研究所得节点重要性排序结果兼顾了节点的局部特性(节点度值)和全局特性(节点效率值)。

为进一步分析方法的有效性,将所得结果与节点收缩法计算的重要度进行比较,如图5所示。分别选择2种方法中重要度位于前10位的节点得到图6。

由图5看出,总体上2种方法所得节点重要度的变化趋势大致相同,说明本文方法的可行性。由图6可知,节点重要性排序前10的节点中,包含8个相同节点,并且其排序位置也大致相近,其中节点15和节点13排序结果相同。在节点收缩法计算结果中,节点29重要度大于28,而本文所得结果恰恰相反。由表1所知,节点28、29的度值均为4,节点效率值差异性不大,但它们对相邻节点的依赖度分别为0.164、0.143,说明本文

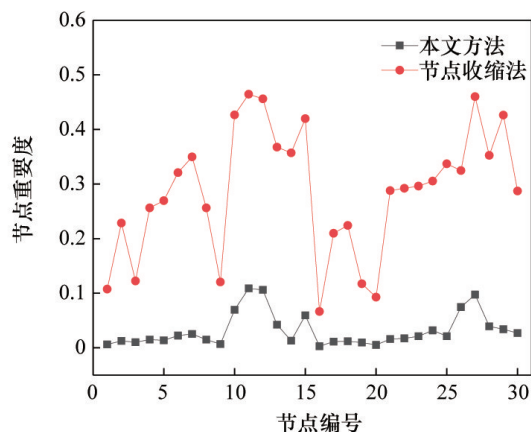


图5 节点重要度对比

Fig. 5 Comparison of node importance

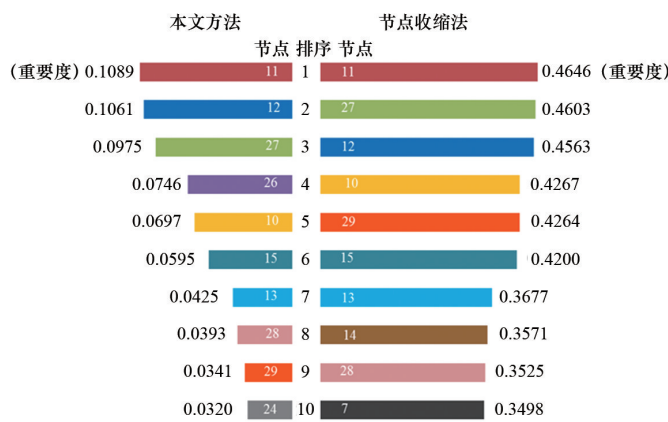


图6 节点重要度对比结果

Fig. 6 Comparison results of node importance

方法在兼顾节点度值和效率值的同时,考虑了节点的相邻信息。

需要重点关注的是节点26,其相关信息如表2所示。本文方法计算得到节点26的重要度排序较节点收缩法靠前。节点收缩法仅从拓扑结构考虑节点重要性,忽略了相邻节点的作用,本文方法考虑路段交通阻抗因素,节点26距离周围路口较近,路段行程时间较短,易受到交叉口节点11、27交通流影响。由此可见,本文方法在计算节点重要度过程中考虑了相邻节点间的作用,评价结果更贴近路网实际。

表2 节点26相关信息

Table 2 Information related with node 26

连接节点编号	节点度值	节点效率值	行程距离/m
11	4	0.3047	350
25	2	0.2555	120
27	4	0.2914	300

#### 4 连锁故障仿真验证

在实际的交通出行中,道路用户更关心突发事件下是否影响其正常出行,例如路网是否仍然连通等信息。为进一步验证方法的有效性,对该路网进行连锁故障仿真。网络遭受攻击后其连通性会受到影响,研究子图中最大连通子图规模的变化情况,有助于从网络结构连通性的角度分析网络遭到破坏的程度<sup>[14]</sup>。对城市道路网络而言,节点受到攻击意味着该区域路网中一个或多个交叉口同时失效,如发生交通事件造成交叉口堵塞、瘫痪等,会引起路网连通性的变化。如图

7所示,删除节点后,原本连通的路网分裂成2个不再连通的路网子图。

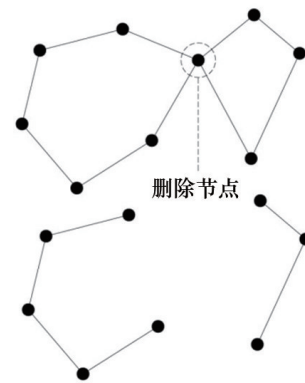


图7 删除节点对道路网络的影响

Fig. 7 Impact of node deletion on road network

根据各方法得到的节点重要度排序,连续删除重要度大的节点,采用连锁故障发生前后路网最大连通子图规模之比 $G$ 作为衡量道路网络可靠性的指标, $G$ 值的求解如下:

$$G = \frac{n_{\max}}{n} \quad (4)$$

式中, $n_{\max}$ 为故障发生后路网最大连通子图包含的节点数目; $n$ 为故障发生前路网节点数目。当连续移除相同节点后,路网最大连通子图规模越小,说明路网可靠性越差,对应的节点重要性评价方法越有效。本文方法与节点收缩法的 $G$ 值变化情况如图8所示。

从 $G$ 的变化趋势可以看出,在整体水平上,随着移除节点数目的增加,本文方法能引起 $G$ 更大幅度下降。

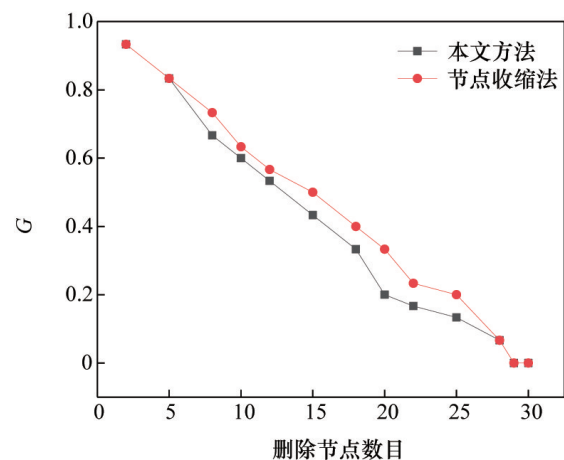


图8 不同评价方法的连锁故障结果

Fig. 8 Cascading failure results of different evaluation methods

在删除前5个节点时,2种算法表现持平,但是在后续删除节点过程中,本文方法对应的 $G$ 值较小。特别是当连续删除前8个节点后,本文方法对应的路网最大连通子图规模比节点收缩法减少9.10%,说明本文所提出的节点重要度评价方法更加有效。

## 5 结论

1) 基于复杂网络节点重要度理论构建传输贡献矩阵,评估城市路网节点重要性。利用节点效率值、节点度值和节点间交通阻抗值等参数,表征交叉口所处路网位置以及路网交通流影响,反映了相邻路口间的重要性依赖关系,克服了仅从单方面考虑路口节点重要性的不足,为有效识别路网关键交叉口和预判交通拥堵节点提供理论依据。

2) 以天津市区域路网为例,计算路网节点重要度,并与节点收缩法所得结果进行对比。通过连锁故障实验分析发现,当连续删除前8个节点后,本文方法对应的路网最大连通子图规模减少9.10%,验证了方法的有效性。该方法可以协助城市交通管理部门确定需要优先维护管理的重要交叉路口,以便提高交通网络的抗毁性;同时还可以指导管理者有针对性地开展应急预防和疏导工作,达到事半功倍的效果。

3) 本研究主要从行驶距离和时间方面考虑道路节点之间交通流的传播,未考虑实际路网交通流的时变性和道路车道数对交通流影响。在后续研究中,可结合城市交通流时变性,分析车道数变化对道路交通流产生影响,对节点重要性评估作进一步探索。

### 参考文献(References)

- [1] 张勇, 屠宁雯, 姚林泉. 城市道路交通网络脆弱性辨识方法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 154-161.  
Zhang Yong, Tu Ningwen, Yao Linquan. Urban road traffic network vulnerability identification method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 154-161.
- [2] 熊金石, 李建华, 沈迪, 等. 基于边介数的信息系统网络节点重要性评估方法[J]. 科技导报, 2013, 31(14): 53-55.  
Xiong Jinshi, Li Jianhua, Shen Di, et al. Evaluation method for node importance of information system networks based on edge-betweenness[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(14): 53-55.
- [3] 朱国威, 王先培, 贺瑞娟, 等. 基于重要度评价矩阵的电网关键节点辨识[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3347-3353.  
Zhou Guowei, Wang Xianpei, He Ruijuan, et al. Identification of vital node in power grid based on importance evaluation matrix[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3347-3353.
- [4] Strogatz S H. Exploring complex networks[J]. Nature, 2001, 410(6825): 268-76.
- [5] 高自友, 赵小梅, 黄海军, 等. 复杂网络理论与城市交通系统复杂性问题的相关研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(3): 41-47.  
Gao Ziyou, Zhao Xiaomei, Huang Haijun, et al. Research on problems related to complex networks and urban traffic systems [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2006, 6(3):41-47.
- [6] Adler J L, Satapathy G, Manikonda V, et al. A multi-agent approach to cooperative traffic management and route guidance [J]. Transportation Research Part B Methodological, 2005, 39(4): 297-318.
- [7] Wang Z W, Kuang A W, Wang H J. Calculating node importance considering cascading failure in traffic networks[J]. Research Journal of Applied Sciences Engineering & Technology, 2013, 5(1): 264-269.
- [8] 王力, 于欣宇, 李颖宏, 等. 基于FCM聚类的复杂交通网络节点重要性评估[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(6): 169-173.  
Wang Li, Yu Xinyu, Li Yinghong, et al. Traffic complex network node importance assessment based on FCM clustering[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(6): 169-173.
- [9] 王建强, 代磊磊, 李娅, 等. 基于交通流运行特征的城市干线关键交叉口判别方法[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(3): 49-52.  
Wang Jianqiang, Dai Leilei, Li Ya, et al. Discrimination method for urban critical intersections based on features of traffic flow[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2013, 31(3): 49-52.
- [10] 郑黎黎, 王世广, 王伟, 等. 城市道路交通网络关键节点辨识方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(4): 675-679.  
Zheng Lili, Wang Shiguang, Wang Wei, et al. Study on the identification method of hub node in urban road network[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2015, 39(4): 675-679.
- [11] Tian Z, Jia L M, Dong H H, et al. Analysis of urban road traffic network based on complex network[J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 537-546.
- [12] 周漩, 张凤鸣, 李克武, 等. 利用重要度评价矩阵确定复杂网络关键节点[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 1-7.  
Zhou Xuan, Zhang Fengming, Li Kewu, et al. Finding vital node by node importance evaluation matrix in complex networks[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5): 1-7.

[13] 范文礼, 刘志刚. 基于传输效率矩阵的复杂网络节点重要度排序方法[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(2): 337-342.  
Fan Wenli, Liu Zhigang. Ranking method for node importance based on efficiency matrix[J]. Journal of Southwest Jiao-

tong University, 2014, 49(2): 337-342.

[14] Hu P, Fan W L, Mei S W. Identifying node importance in complex networks[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2015, 429: 169-176.

## Evaluations of node importance of urban road network based on transmission contribution matrix

CHEN Liang<sup>1</sup>, WANG Jingjing<sup>1</sup>, ZHOU Zhihua<sup>2</sup>, LI Qiaoru<sup>1</sup>, CHEN Mingming<sup>1</sup>

1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

2. Guangzhou Transport Planning Research Institute, Guangzhou 510230, China

**Abstract** Some important intersection nodes in the urban road network are generally defined by a single indicator such as the traffic flow or the number of connected links. It is difficult to ensure the reliability of the road network once the traffic incident in the hub node happens. In this paper, according to the free scale features, the urban road network is simplified as a weighted complex network, in which the traffic impedance is taken as the weight parameter, and a method of the weighted network node importance transmission contribution matrix is proposed. The method comprehensively combines the intersection location in the road network, the number of connected links, and the traffic impedance of associated links, to evaluate the intersection node importance. The node efficiency value is used to represent the information related with the intersection location, meanwhile, the node degree value and the traffic impedance value are fused to characterize the importance dependencies of adjacent intersections in the process of the traffic information transmission. A regional road network in Tianjin is used as a test sample to validate the proposed approach. The cascading failure is simulated on the network by continuously removing important nodes. Simulation results show that the largest subgraph size based on the proposed method falls by 9.10%, as compared with the weighted node contraction method when the top 8 important nodes are continuously removed. These results provide a theoretical basis for the congestion warning for the urban traffic network.

**Keywords** urban road network; intersection node; traffic impedance; complex network ●



(责任编辑 刘志远)