

广西师范大学学报(自然科学版)

Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition)

ISSN 1001-6600,CN 45-1067/N

## 《广西师范大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 基于多层复杂网络的高速公路节点重要性研究  
作者: 翁小雄, 谢志鹏  
DOI: 10.16088/j.issn.1001-6600.2020080801  
收稿日期: 2020-08-08  
网络首发日期: 2020-12-09  
引用格式: 翁小雄, 谢志鹏. 基于多层复杂网络的高速公路节点重要性研究. 广西师范大学学报(自然科学版). <https://doi.org/10.16088/j.issn.1001-6600.2020080801>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.16088/j.issn.1001-6600.2020080801

# 基于多层复杂网络的高速公路节点重要性研究

翁小雄\*, 谢志鹏

（华南理工大学 土木与交通学院，广东 广州 510640）

**摘 要：**随着我国高速公路体系不断完善和地区高速公路网络的成型，系统网络化分析逐渐成为高速公路运营管理的重要内容。复杂网络作为现实系统的抽象模型是研究网络的重要工具，本文根据高速公路系统运行特点，结合道路基础设施网络和出行者出行网络，建立高速公路多层复杂网络模型。在多层复杂网络的基础上，对 PageRank 算法和 TOPSIS 算法进行改进，构建 PageRank-TOPSIS 融合算法，并对高速公路节点重要性进行分析评估。结果表明，各收费站节点在不同性质的属性值下重要性差异较大，PageRank-TOPSIS 融合算法能够根据不同的加权回归系数综合反映收费站节点在高速公路复杂网络的重要性。基于多层复杂网络的高速公路节点重要性分析给予高速公路节点研究新的视角，为高速公路网络分析和运营管理部门提供可靠的理论支持。

**关键词：**多层复杂网络；高速公路；节点重要性；PageRank-TOPSIS 算法

**中图分类号：**U495      **文献标志码：**A

## Study on Freeway Nodes Importance Based on Multilayer Complex Network

WENG Xiaoxiong\*, XIE Zhipeng

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** With the continuous improvement of China's freeway system and the formation of regional freeway network, system network analysis has gradually become an important part of freeway operation and management. As an abstract model of real system, complex network is an important tool to study the network. According to the operation characteristics of freeway system, combined with the road infrastructure network and the traveler travel network, this paper establishes the multilayer complex network model of freeway. On the basis of multilayer complex network, the PageRank algorithm and TOPSIS algorithm are improved, the PageRank-TOPSIS fusion algorithm is constructed, and the importance of freeway nodes is analyzed and evaluated. The results show that the importance of each toll station node varies greatly under different attribute values. PageRank-TOPSIS fusion algorithm can comprehensively reflect the importance of toll station node in complex freeway network according to different weighted regression coefficients. The importance analysis of freeway nodes based on multilayer complex network gives a new perspective to the research of freeway nodes, and provides reliable theoretical support for freeway network analysis and freeway operation management departments.

**Keyword:** multilayer complex network; freeway; nodes importance; PageRank-TOPSIS algorithm

随着我国经济的快速发展，高速公路网络建设不断提速。截止 2018 年年末，我国高速公路里程达 14.26 万公里，国家高速公路年平均日交通量为 26 435 辆<sup>[1]</sup>。区域高速公路网络化水平进一步提升，路网的系统化管理和研究成为高速公路系统协调发展，交通一体化和区域物流产业整合的重要基础。如何对高速公路路网各节点的重要性作出评价，是路网系统整体化分析的重要内容。复杂网络作为研究现实世界系统的抽象理论工具，在高速公路系统研究中具有重要的实际运用意义和理论创新价值。

高速公路网络具有复杂网络的基本特征，众多学者在高速公路领域进行了一系列理论运用和创新。文

收稿日期：2020-08-08

基金项目：国家自然科学基金(51578247)

通信作者：翁小雄(1958—)，女，浙江杭州人，华南理工大学教授，博导。E-mail: 565454168@qq.com。

献[2]根据复杂网络理论,定义了结构度、中间性和最短路径长度等改进评价指标,以此提出考虑有效路径数的高速公路网络连接可靠性评价方法,对不同情景的高速公路网进行实例研究,认为高速公路网络的结构特性和可靠性分析有助于道路规划和突发性重大事件的控制;文献[3-5]根据复杂网络理论对四川、广东和陕西的区域高速公路网进行研究,分析网络的拓扑结构和鲁棒性,对改善高速公路道路网络结构和提升网络连通可靠性提出建议;文献[6]建立多层复杂网络,结合 GIS 和城际路网区域经济数据对高速公路网络进行分析,揭示了以西安为中心的内地城际路网的交通衔接具有枢纽和辐射的结构特点,但在环渤海地区、长三角地区、京沪高速公路沿线表现出以高负荷为中心的结构特点。

相关学者运用复杂网络理论在高速公路领域的研究在不断深入,但目前的研究还存在一些不足:在网络研究视角上,主要是针对高速公路道路硬件网络的网络特征和层次结构分析,并没有考虑高速公路网络的出行者作为行动主体和网络运行主体的出行网络;在网络模型选择上,多数选择无权网络模型,忽略了高速公路复杂网络的边所实际承载的各种信息数据,对实际网络运行过程的分析存在偏差。

节点重要性是复杂网络研究内容的重要组成部分。除传统的  $k$  核算法外,各学者从不同角度提出了其他节点重要性算法。文献[7]根据部分现实系统结构存在的多维共存特征,提出了维度相似性的概念来度量各维度间的关系,结合实际存在的信息传播过程中信息衰减特点,引入传播衰减率的概念,以此定义节点重要性度量指标和算法模型;文献[8]根据部分现实系统结构存在的社区结构特性,提出了一种按照社区划分的节点重要性排序方法 CD-PR,将 LPA 标签传播算法对社区划分的结果纳入 PageRank 节点重要性算法之中,结果显示改进算法能够更加全面衡量节点的重要程度;文献[9]根据城市道路网的自由标度特性,建立以交通阻抗为权重参数的加权复杂网络,综合考虑路网中交叉口位置、连接路段数量和交通阻抗等多属性特点,提出了基于传输贡献矩阵节点重要性算法,对交叉口节点的重要性进行评价;文献[10]考虑航空网络中节点防御和攻击特点,根据网络效率、最大组件大小和网络流量等属性,提出一种节点被删除后不返回网络的多属性决策方法 NR 算法作为航空网络节点重要度评估的定制方法,与传统  $k$  核算法相比更能发现潜在关键节点。

PageRank 算法和 TOPSIS 算法是经典的节点重要性分析方法,在复杂网络不同领域都存在相似的运用。在社交网络领域,文献[11-13]在分析用户影响力中,都是通过设计不同的用户影响力特征因素并融入 PageRank 算法,建立多影响力评价算法,从不同的特征角度有效反映用户的实际影响力;在地址网络领域,文献<sup>[14]</sup>从物流交通需求角度入手,将各节点货运需求量通过 PageRank 算法进行排序,获得所有需求同时满足的物流节点,而文献[15]则是从交通基础设施静态要素入手,结合 PageRank 算法对重要节点进行挖掘;在道路网络领域,文献[16]综合考虑路网中交叉口节点间静态结构连接关系和流量,通过节点繁忙程度指标改进 PageRank 算法,对交叉口节点的重要性进行排序,文献[17]在 PageRank 算法的基础上结合贪心算法思想,提出了一种基于贪心策略的 PageRank 关键节点识别方法,使的道路交通网络中关键节点识别的结果更合理。TOPSIS 算法是一种多目标决策分析算法,主要运用在需要综合多种特征因素的分析中,比如多指标的经济评价<sup>[18]</sup>、交通路段重要性的多属性评价<sup>[19]</sup>、多重属性视角的工程项目评价<sup>[20]</sup>。

高速公路是现代经济运行的重要依托,路网的有效运营管理是保障各项功能的基础。路网有效运营管理的前提是对路网结构有整体性认识和分析,高速公路复杂网络研究对全面认识路网结构和出行分布具有重要意义。无论是道路基础设施网还是出行网,其基础承载单元是收费站节点,节点重要性分析对把握路网客观存在的结构性差异具有重要意义,是全面挖掘路网结构特点和关键节点的基础之一。

各类节点重要性算法都有其自身的特点和优势,但在复杂网络分析中如何能够让节点重要性算法更为贴近所研究的网络系统,则需要考虑算法的整体性和适用性。PageRank 算法的运用上,必须在考虑网络的实际特征下进行改进才可能区分出不同节点的特征差异,得到较为适用的结论;传统的 TOPSIS 算法虽然考虑了多特征因素,但却没有考虑不同特征因素对目标的影响差异,通过对不同特征的权重进行定量设定有利于提升算法性能。将 2 种适用于不同拓扑性质网络的算法进行融合是多层复杂网络节点重要性算法的重要创新。高速公路复杂网络的节点重要性研究尚且不多,综合考虑道路基础设施网络和出行网络的高速公路多层复杂网络模型下的节点重要性研究将更加体现高速公路系统实际运行特征和算法的融合性,改进并挖掘现有节点重要性算法及应用价值。

# 1 高速公路多层复杂网络

## 1.1 多层复杂网络

复杂网络是为了研究现实的系统而抽象形成的理论模型,网络由节点和连边构成,连边表示网络节点之间的连接关系。但在现实系统中,各节点间往往存在多种连接关系,多层复杂网络模型的建立目的在于精确体现节点连边的多属性特征。<sup>[21]</sup>多层复杂网络是由两个或以上单层网络组成,根据不同网络层是否存在连接关系,分为多维型多层网络<sup>[22]</sup>和依存型多层网络<sup>[23]</sup>。多维型多层网络的节点同质,各层网络间相互独立;依存型多层网络的节点异质,各层网络间相互依赖。

## 1.2 高速公路网络建模

高速公路硬件设施由收费站、基本和过渡路段、匝道组成,高速公路系统除了高速公路硬件基础设施外,还包括通行在硬件基础设施上的出行车辆。高速公路系统运行是具有一定出行需求的车辆在道路硬件基础设施网络通行的过程,以此高速公路网络系统包含两层网络性质,一层为由道路硬件组成的基础设施网络,一层为由出行者出行构成的出行网络。

根据高速公路系统特征,定义高速公路多层复杂网络  $S = (G_{road}, G_{travel})$ , 其中  $G_{road}(V_{road}, E_{road}, \omega_{road})$  表示基础设施网络,  $G_{travel}(V_{travel}, E_{travel}, \omega_{travel})$  表示出行网络,属于多维型多层复杂网络。 $V_{road} = V_{travel} = (t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n)$ , 其中  $t_i$  为收费站  $i$ 。在  $G_{road}$  中,  $E_{road}$  为连接收费站之间的道路,考虑高速公路道路存在的物理属性差异(距离、设计时速等),  $\omega_{road}$  为收费站间的通达时间,计算公式为:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} \frac{D_{ij}}{v_{ij}}, & t_i \text{ 与 } t_j \text{ 相连,} \\ 0, & t_i \text{ 与 } t_j \text{ 不相连。} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $D_{ij}$  为收费站  $i$  与收费站  $j$  间的距离;  $v_{ij}$  为所在道路的设计时速。

在  $G_{travel}$  中,  $E_{travel}$  为收费站间的出行关系,  $\omega_{travel}$  为收费站之间出行车辆所承载的流量  $Q$  与费用  $F$ , 公式为:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} (Q_{ij}, F_{ij}), & t_i \text{ 与 } t_j \text{ 存在车辆出行,} \\ 0, & t_i \text{ 与 } t_j \text{ 不存在车辆出行。} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $Q_{ij}$  为收费站  $i$  与收费站  $j$  的流量;  $F_{ij}$  收费站  $i$  与收费站  $j$  的费用。

为描述高速公路多层复杂网络拓扑特性和度量节点重要性,定义以下复杂网络统计量。节点的度是网络中与该节点相连的节点数量,节点  $t_i$  的度计算公式为

$$d_i = |T_i|, \quad (3)$$

式中  $T_i$  为与节点  $t_i$  连接的节点集合,  $|T_i|$  为集合  $T_i$  的元素个数。

节点的点强度是加权网络中与该节点相连的边的权重之和,节点  $t_i$  的点强度计算公式为

$$s_i = \sum_{j \in T_i} \omega_{ij} \circ \quad (4)$$

根据不同网络层的权重意义,点强度分为通达时间强度、流量强度和费用强度。

# 2 高速公路节点重要性算法

## 2.1 PageRank 算法及 TOPSIS 算法介绍

### 2.1.1 PageRank 算法及其改进

PageRank 算法是由斯坦福大学研究生 Larry Page 和 Sergey Brin 在对网页排序问题的研究中,借鉴学术界评判学术论文重要性的通用方法后设计的对网页重要性的评价分析方法<sup>[24]</sup>,属于网络链接分析算法,



现已延伸应用于一般复杂网络分析。该算法的核心思想为：若一个网页被很多其他网页链接，则该网页重要性高；若重要性高的网页链接到一个其他的网页，则被链接到的网页的重要性会相应提高<sup>[25]</sup>。

引入 PageRank 算法，是将多层复杂网络中基础设施网络的收费站节点模拟为网页，将连边模拟为节点间的链接，两者具有相似性：具有越多连边的收费站节点，其在网络中通达程度较高；相邻收费站间道路长度越长即通达时间权重越大的收费站节点，其连续交通通行条件较好，则通达程度越高。由于车辆出行在高速公路道路间是连续的，故与通达程度高的节点相连的节点的通达性也越好。因此，PR 值是适用于道路基础设施网络节点重要性的重要指标。

该算法的原理为：为网络中所有节点设置相同的初始 PageRank (PR) 值，通过一定的迭代规则对各节点的 PR 值进行更新，直到各节点 PR 值收敛稳定。若网络中有  $n$  个节点，算法步骤为：

第 1 步：初始化节点的 PR 值分布  $\omega_1 = (PR_1^1, PR_2^1, \dots, PR_i^1, \dots, PR_n^1) = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right)$ ，其中  $PR_i^1$  为第  $i$  个节点的初始 PR 值；

第 2 步：根据网络拓扑结构，计算第  $k$  次迭代的 PR 值分布  $\omega_k = (PR_1^k, PR_2^k, \dots, PR_i^k, \dots, PR_n^k)$ ， $PR_i^k = \frac{1-q}{n} + q \sum_{j \in T_i} \frac{PR_j^k}{d_j}$ ，其中  $q$  为阻力系数， $q \in (0,1)$ ，一般取 0.85。直到 PR 分布趋于稳定。

节点的 PR 值代表节点的重要性。根据 PR 值计算公式，节点  $i$  的重要性与其链接节点数量和重要性有关，当链接节点数量越多，节点  $i$  的 PR 值越大；链接节点的重要性越大，节点  $i$  的 PR 值越大。

由于 PageRank 算法针对无权网络，在基础设施网络中，由于各边具有通达时间权重含义，即不同的边具有权重差异，故对 PR 值公式进行加权改进，以使具有相同度且连边权重差异的节点重要性进行区别。

根据加权网络特性对 PR 值计算公式进行改进，加权网络节点  $i$  的 PR 值  $PR_i = \frac{1-q}{n} + q \sum_{j \in T_i} \frac{\omega_{ij} \cdot PR_j}{d_i}$ 。

### 2.1.2 TOPSIS 算法及其改进

TOPSIS 算法是由 C.L.Hwang 和 K.Yoon 提出的一种反映各评价方案之间差距的多目标决策分析方法。<sup>[26]</sup>该算法的核心思想为：根据方案各项指标找出正理想解（最优方案）和负理想解（最差方案），并通过各备选方案与正理想解和负理想解的比较，分析各方案与正理想解的接近程度，得出各方案的评价。由于 TOPSIS 算法中未考虑各指标在综合评价中的重要程度差异，在高速公路中，由于各车型的费率差异使得出行网络的流量和费用并非呈绝对正相关，可能出现流量大致相等的收费站点出行费用差异较大。为定量考量两者对节点重要性的影响程度，根据熵权法对 TOPSIS 算法中各指标权重进行改进。若节点集  $P = (p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_m)$ ，指标集  $F = (F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_m)$ ，节点  $p_i$  的指标集  $F_i = (f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{ij}, \dots, f_{in})$ ，算法步骤为：

第 1 步：为消除不同指标量纲的影响，根据向量数据规范化原则对指标集  $F$  进行规范化处理，得到规范化指标集  $F^* = (F_1^*, F_2^*, \dots, F_i^*, \dots, F_m^*)$ ，其中  $F_i^* = (f_{i1}^*, f_{i2}^*, \dots, f_{ij}^*, \dots, f_{in}^*)$ 。第  $i$  个节点第  $j$  个指标的规范化数据计算公式为

$$f_{ij}^* = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m f_{ij}^2}} \quad (5)$$

第 2 步：根据规范化指标集得出正理想解  $F^+ = (f_1^+, f_2^+, \dots, f_j^+, \dots, f_n^+)$  和负理想解  $F^- = (f_1^-, f_2^-, \dots, f_j^-, \dots, f_n^-)$ 。第  $j$  个指标的正理想值和负理想值计算公式为：

$$f_j^+ = \begin{cases} \max_i f_{ij}^*, & j \text{ 为正向指标,} \\ \min_i f_{ij}^*, & j \text{ 为负向指标.} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_j^- = \begin{cases} \min_i f_{ij}^*, j \text{ 为正向指标}, \\ \max_i f_{ij}^*, j \text{ 为负向指标}. \end{cases} \quad (7)$$

第 3 步：根据熵权法对各指标赋予权重，得到权重集  $\mathbf{w} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_j, \dots, \omega_n)$ 。第  $j$  个指标的权重计算公式为

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j}, \quad (8)$$

式中  $H_j$  为第  $j$  个指标的熵值，计算公式为

$$H_j = - \frac{\sum_{i=1}^m f_{ij}^* \cdot \ln(f_{ij}^*)}{\ln m}. \quad (9)$$

第 4 步：根据各节点与正负理想解间的距离得到综合评价集  $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_m)$ 。第  $i$  个节点的综合评价计算式为

$$s_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad (10)$$

式中  $d_i^+$  为节点到正理想解的距离， $d_i^-$  为节点到负理想解的距离，计算公式为：

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (f_{ij}^* - f_j^+)^2}, \quad (11)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (f_{ij}^* - f_j^-)^2}. \quad (12)$$

## 2.2 高速公路节点重要性融合算法设计

### 2.2.1 多层复杂网络节点重要性分析

多层复杂网络是由 2 个或以上的单层网络构成的网络，在节点重要性研究中存在两种视角，从部分到整体的视角和从整体到部分的视角。根据不同的视角，研究方法主要分 3 种：1) 视多层网络为一个网络主体，根据网络结构的连接关系，采用多层网络最短路径算法作节点重要性评价；2) 采用投影法将多层网络投影至同一单层网络形成多属性复合网络作节点重要性评价；3) 视不同层网络为不同主体，分别采用单层网络节点重要性算法进行研究，再使用融合算法综合考虑节点重要性。

第 1 种研究方法适用于各层网络边属性相似的多层网络研究；第 2 种研究方法同样适用于边属性相似的多层网络研究，且易出现信息损失；第 3 种研究方法适用于边属性差异较大的多层网络研究。本研究建立的高速公路加权多层网络，考虑节点之间基础设施连接的物理性关系和流量费用连接的社会性关系，边属性间差异性较大，故第 3 种研究方法更适用于高速公路多层网络研究。

基于高速公路网络特征，提出基于 PageRank-TOPSIS 的高速公路节点重要性融合算法。

### 2.2.2 高速公路节点重要性融合算法

在基础设施层网络中，选取通达时间强度作为影响节点重要性排名的指标；在出行网络中，选取流量强度和费用强度作为影响节点重要性排名的指标。PageRank 算法侧重网络节点连接结构进行节点重要性分析，适用于高速公路多层网络的基础设施连接的物理性关系分析。TOPSIS 算法属于多目标决策分析方法，适用于高速公路多层网络的出行流量费用连接的社会性关系分析。综合高速公路网络特征和两种算法特性，提出基于 PageRank-TOPSIS 的高速公路节点重要性融合算法，引入加权回归系数  $\alpha$ 、 $\beta$  对 PageRank 算法

节点重要性  $PR$  值和 TOPSIS 算法节点重要性  $s$  进行线性融合。高速公路节点重要性融合算法为：

第 1 步：根据高速公路多层复杂网络拓扑结构，在基础设施网络层获取网络节点的通达时间强度属性值，在出行网络层获取网络节点的流量强度、费用强度属性值；

第 2 步：根据改进 PageRank 算法对网络节点的通达时间强度属性作节点重要性分析，求得各节点  $PR$  值；

第 3 步：根据改进 TOPSIS 算法对网络节点的流量强度、费用强度属性值作节点重要性分析，求得各节点综合评价值  $s$ ；

第 4 步：将节点  $PR$  值和综合评价值  $s$  作归一化处理，并将两者进行线性回归，得到改进节点重要性  $C$ ，节点  $i$  的改进节点重要性  $C_i = \alpha s_i^* + \beta PR_i^*$ ，其中  $s_i^*$  为综合评价归一化值， $PR_i^*$  为  $PR$  归一化值， $\alpha$ 、 $\beta$  为加权回归系数且  $\alpha + \beta = 1$ 。

### 3 实例应用及分析

#### 3.1 应用背景

研究实例选取广东省珠江三角洲地区高速公路，基础数据由高速公路地理数据和收费数据两部分组成，涉及 72 条高速公路路段共计 523 个收费站。高速公路收费数据选取 2018 年 10 月 9 日—2018 年 12 月 9 日收费数据，其中涉及研究分析的收费数据字段如表 1 所示。高速公路地理数据来自广东省交通运输厅公众网，其中涉及研究分析的地理数据字段如表 2 所示。

表 1 高速公路收费数据字段说明

Tab.1 Field description of freeway fee data

序号	字段中文属性名	字段英文标识	具体数据实例
1	IC 卡内部编号	ICInCardID	602883244
2	入口日期及时间	EnTime	2018-12-04 15:22:38
3	入口车牌号码	EnVehiclePlate	粤 BXXXXXX
4	入口收费站	EnStation	小径湾
5	入口所属道路	EnOwnedRoad	惠深沿海 S30
6	出口日期及时间	ExTime	2018-12-04 15:38:57
7	出口车牌号码	ExVehiclePlate	粤 BXXXXXX
8	出口收费站	ExStation	稔山
9	出口所属道路	ExOwnedRoad	惠深沿海 S30
10	收费金额	CashMoney	20.0

表 2 高速公路地理数据字段说明

Tab.2 Field description of freeway geographic data

字段中文属性名	字段英文标识	具体数据实例
收费站名称	Name	泌冲
所在路线编号	RouteNumber	G324
经度	Lon	113.180877
纬度	Lat	23.146736
收费站位置类型	LocationType	主线站

$G_{road}(V_{road}, E_{road}, \omega_{road})$  基础设施网络拓扑抽象按以下列原则进行：1) 对各收费站进行编号处理，以 1~523 代替原有名称；2) 若存在处于不同地区的相同名称收费站，视为不同收费站，且在名称前添加所属高速路段名称；3) 一条高速公路的同一收费站若存在多个出口，视为一个收费站节点；4) 尽管高速公路为双向车道，但由于各向通达存在差异，故视为有向网络。

$G_{travel}(V_{travel}, E_{travel}, \omega_{travel})$  出行网络拓扑抽象按以下列原则进行：1) 对各收费站进行编号处理，以 1~

523 代替原有名称；2) 收费数据中，若缺失车辆入口或出口数据，根据出入口费用和所属车型进行补充，两者都缺失则予以剔除；若缺失车辆收费数据，根据出入口收费标准予以补充；3) 若存在处于不同地区的相同名称收费站，视为不同收费站，且在名称前添加所属高速路段名称；4) 一条高速公路的同一收费站若存在多个出口，视为一个收费站节点；5) 收费站作为出口或入口均涉及相关车辆通行，故视为无向网络。

基础设施网络拓扑结构如图 1。



图 1 收费站节点基础设施网络拓扑结构

Fig.1 Network topology of toll station node infrastructure

### 3.2 节点重要性分析

根据高速公路网络拓扑结构，计算各节点的通达时间强度、流量强度和费用强度属性值。根据 PageRank-TOPSIS 融合算法步骤，取  $\alpha = 0.5$ ， $\beta = 0.5$ ，同时根据改进 PageRank 算法和改进 TOPSIS 算法分别作节点重要性排名次序，重要性排名前 10 名和后 10 名如表 3 和 4 所示。

表 3 三类算法节点重要性前 10 名

Tab.3 Top 10 important nodes of three kinds of algorithms

排名	改进 PageRank 算法	改进 TOPSIS 算法	PageRank-TOPSIS 融合算法
1	常虎中心	龙岗	三元里
2	北二蚌湖	机场站	龙岗
3	苏十顷	北浔峰洲	清湖
4	共和	大岭山	大岭山
5	厚街北	庆丰	皇岗
6	火村	三元里	城区站
7	麻涌	布龙	庆丰
8	四会西	皇岗	厚街北
9	三元里	石碣	常虎中心
10	八斗	清湖	苏十顷

表 4 三类算法节点重要性后 10 名

Tab.4 The last 10 important nodes of three kinds of algorithms

排名	改进 PageRank 算法	改进 TOPSIS 算法	PageRank-TOPSIS 融合算法
514	珠海站	三洲	小塘
515	华快广汕	春岗	蓬江
516	蚬岗	小塘	金白
517	惠来	镇隆	新龙
518	福安	雅瑶	南靖
519	奕垌	横沙	太和



520	机场站	从化北	雅瑶
521	清远西	奕垌	福安
522	北浔峰洲	官田东	兴业
523	新龙	蓬江	奕垌

可以看出,改进 PageRank 算法和改进 TOPSIS 算法对节点重要性的评估差异较大。PageRank-TOPSIS 融合算法结果虽然也异于两者,但根据前 10 名和后 10 名中出现相同节点次数判断则更为偏向改进 TOPSIS 算法。在重要性排名前 10 名中,融合算法与改进 TOPSIS 算法的共有收费站节点数为 6,与改进 PageRank 算法的共有收费站节点数为 3;在重要性排名后 10 名里,融合算法与改进 TOPSIS 算法的共有收费站节点数为 4,与改进 PageRank 算法的共有收费站节点数为 3。说明各节点在以通达时间强度为指标的基础设施网络中的差异程度较小,以流量强度、费用强度为指标的出行网络中的差异程度较大,也存在两者重要性较一致的收费站节点。

三类算法根据各自节点重要性排序下的节点特征如表 5、6 和 7 所示。

表 5 融合算法结果节点特征

Tab.5 Fusion algorithm node feature

重要性排名	通达时间强度均值/min	$10^5$ 流量强度均值	$10^6$ 费用强度均值	重要性评估
1~100	28.41	4 211. 54	5 113. 87	关键节点
101~200	25.32	2 307. 13	3 414. 62	重要节点
201~400	17.89	1 373.40	2 599.17	一般节点
401~523	10.79	1 279.05	2 179.55	不重要节点

表 6 改进 PageRank 算法结果节点特征

Tab.6 Improved PageRank algorithm node feature

重要性排名	通达时间强度均值/min	$10^5$ 流量强度均值	$10^6$ 费用强度均值	重要性评估
1~100	32.73	2 684.23	3 519.02	关键节点
101~200	23.06	2 151.78	2 931.56	重要节点
201~400	17.73	1 603.58	2 849.24	一般节点
401~523	9.49	2 500.92	3 957.32	不重要节点

表 7 改进 TOPSIS 算法结果节点特征

Tab.7 Improved TOPSIS algorithm node feature

重要性排名	通达时间强度均值/min	$10^5$ 流量强度均值	$10^6$ 费用强度均值	重要性评估
1~100	15.44	4 820. 06	5 708. 07	关键节点
101~200	19.54	2 103. 79	3 703. 57	重要节点
201~400	24.23	1 314. 83	2 451. 41	一般节点
401~523	17.30	991.01	1 791. 92	不重要节点

根据结果可知,PageRank-TOPSIS 融合算法中从关键节点到不重要节点的各项特征强度呈依次递减,且排名 1~100 的节点流量强度均值和费用强度均值指标远高于其余节点,是路网中车辆出行 OD 的主要收费站;改进 PageRank 算法结果中仅通达时间强度是按照高低次序排列,但表征车辆出行网络特征却不能得到体现;改进 TOPSIS 算法中由于只考虑出行强度特征,故道路网络特征未能在结果中得到有效显示。以此可以得出,PageRank-TOPSIS 融合算法能够根据高速公路网络的道路网和出行网双重属性对节点进行有效挖掘,综合反映路网结构。

在融合算法评价节点重要性过程中,加权回归系数是不完全定量参数。为研究不同加权回归系数对评价结果的变化过程,对比不同加权回归系数取值对节点重要性的影响,取  $\{(\alpha, \beta) | \beta = 1 - \alpha, \alpha = 0.1, 0.2, \dots, 0.9\}$ ,以  $\alpha = 0.1, \beta = 0.9$  为基准为收费站进行编号,选取重要性排名分布于前中后三段的部分节点,各段在不同加权回归系数下融合算法结果如图 2、图 3 和图 4 所示。

可以看出,当加权回归系数发生变化时,收费站节点的重要性及排名也出现一定的变化,但变化幅度差异较大。随着加权回归系数  $\alpha$  的增大,加权回归系数  $\beta$  的下降,序号 1~100 的节点中重要性变化大的

节点占 19%，数量较少，排名由后往前上升，大部分节点重要性变化较为稳定；序号 200~300 的节点中仅 6% 的节点重要性变化较大，且振幅较小；序号 423~523 的中 76% 的节点重要性变化较大，10% 的节点的重要性上升速度高于平均水平的 2 倍，序号 473 和 475 节点重要性由 0.2 增大至 0.8。说明部分收费站节点的综合评价价值  $s$  和 PR 值差异较大，若以单一指标角度衡量节点重要程度，未能全面综合反映各收费站节点在高速公路复杂网络的重要性。

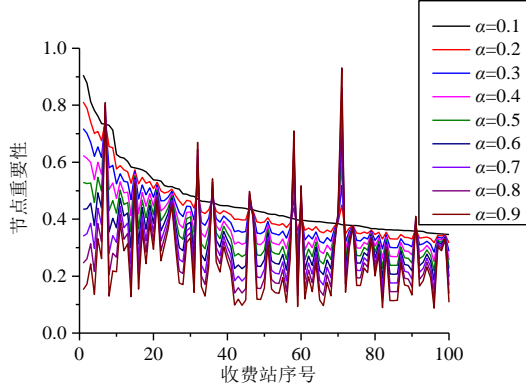


图 2 不同加权回归系数下序号 1~100 融合算法结果  
Fig.2 Results of 1-100 fusion algorithm under different weighted regression coefficients

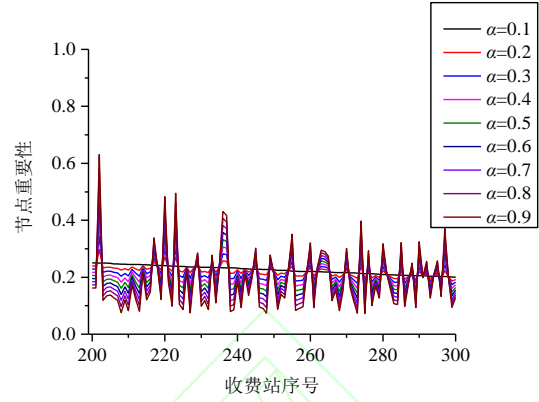


图 3 不同加权回归系数下序号 200~300 融合算法结果  
Fig.3 Results of 200-300 fusion algorithm under different weighted regression coefficients

为分析各节点在不同加权回归系数下重要性排名次序的波动程度，引入波动率描述各节点排名波动差异。波动率  $\lambda$  计算公式为：

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\hat{n}-1} (R_i - R_m)^2}{\hat{n} - 1}}, \quad (13)$$

$$R_i = \frac{N_{i+1}}{N_i}, i = 1, 2, \dots, 8, \quad (14)$$

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^{\hat{n}} R_i}{\hat{n}}. \quad (15)$$

式中： $N_i$  为第  $i$  次排序结果的排名； $N_{i+1}$  为第  $i+1$  次排序结果的排名； $\hat{n}$  为排名的间隔数； $R_i$  为排名变动系数； $R_m$  为排名变动系数均值。所得结果如图 5 所示，红线为平均波动率。

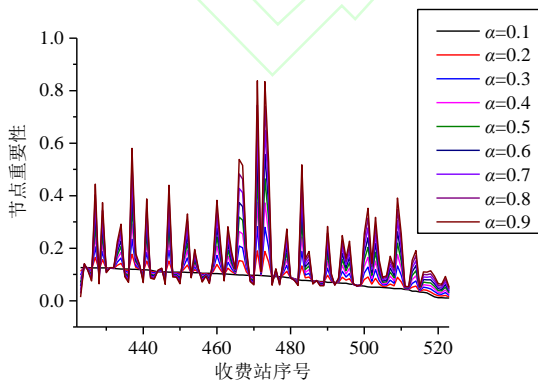


图 4 不同加权回归系数下序号 423~523 融合算法结果  
Fig.4 Results of 423-523 fusion algorithm under different weighted regression coefficients

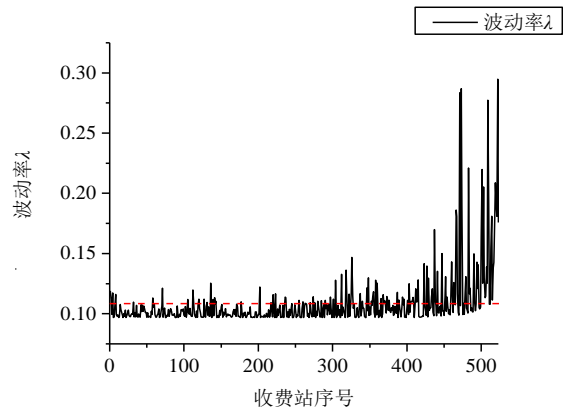


图 5 收费站节点波动率  
Fig.5 Node volatility of toll station

从图5可以看出,大部分收费站节点的波动率低于平均波动率,序号450~523的部分收费站节点的波动率较大。根据波动率分布可知,部分收费站节点在基础设施网络中重要程度较低,但在出行网络中由于流量费用指标与网络其他节点相比较,加权回归系数的变化导致排名变化幅度较大。

综合以上分析,PageRank-TOPSIS融合算法适合于多层复杂网络的节点重要性挖掘,且决策者可根据加权回归系数调整不同属性偏好的节点重要性排序,分析节点重要性随权重变化而波动的幅度,挖掘网络的异质性节点。另一方面,算法也存在2点不足:1)算法未能对节点重要性类型做出边界定量设定。在完成节点重要性排序后,如何确定关键节点、重要节点、不重要节点等节点类型的边界较为合适以及确定多少种节点重要性类型更有利于区分异质性节点,这两方面在融合算法中未能很好实现;2)由于融合算法的前提是网络特征的设计,故最终分析效果不仅取决于算法自身,不同的特征设计也会影响最终的分析结果。

在高速公路交通管理和运营分析中,除了关注在网络中道路通达性较高的收费站,更应关注实际运行过程中出行强度和密度较大的收费站及相应区域的交通运行管理。通达时间强度高且出行强度高的节点是网络的关键节点,是路网出行的主要承载点和影响路网通达性能的主要节点。对于通达时间强度较高且出行强度较低的节点,可以作为分流收费站,采取信息诱导等方式缓解出入分布不均等问题;对于通达时间强度较低且出行强度较高的节点,应成为更为关键的节点区域,进行差异化交通管理模式。

## 4 结论

本文以复杂网络理论为基础,结合高速公路网络特征建立高速公路多层复杂网络模型,并以PageRank-TOPSIS融合算法作节点重要性分析。通过实例分析,得出部分收费站节点以通达时间强度为指标的基础设施网络和以流量费用强度为指标的出行网络的重要性表现差异较大。设定不同的加权回归系数 $\alpha$ ,大部分节点的排名波动区间较为稳定,存在小部分节点波动幅度较大。根据分析结果,传统以道路硬件基础设施为视角作高速公路网络的研究未能全面反映实际高速公路系统运行状况,采取多层复杂网络作高速公路节点重要性研究,在模型建立和算法构建上能够综合反映节点重要性。

本次研究中也存在可扩展延伸的空间,比如在不同层次复杂网络中对衡量节点重要性的指标属性上,可以通过其他不同的指标对收费站节点重要性作出评估,并根据不同指标在高速公路网络的应用内涵得出多样化结论,挖掘出其他不同类型的潜在关键节点,适应不同运用背景和目的需求。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部.2018年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. [http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/201904/t20190412\\_3186720.html](http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/201904/t20190412_3186720.html).
- [2] DAI H A, YAO E J, LU N, BIAN K, ZHANG B. Freeway Network Connective Reliability Analysis Based Complex Network Approach[J]. Procedia Engineering, 2016, 137(10): 372-381.DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.271.
- [3] TANG L, LI K. Visual Graphic Analysis of the Complex Network of Expressways in Sichuan Province[C]// International Forum on Management, Education & Information Technology Application. 2016. DOI: 10.2991/ifmeita-16.2016.20.
- [4] 肖平.广东省高速公路网结构复杂性分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [5] 温振国.基于复杂网络理论的陕西省高速公路网结构特性及鲁棒性研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [6] ZHOU P L, JING T H, JIAN Z Y, et al. Spatial Structural Characteristics of Intercity Highway Network Based on Layered Complex Network[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(12): 98-103.DOI: Spatial Structural Characteristics of Intercity Highway Network Based on Layered Complex Network.
- [7] 张昕, 王慧慧, 严沛, 郭阳.一种面向多维复杂网络的节点传播重要性算法[J]. 计算机科学, 2019, 46(S2): 348-353. DOI: CNKI:SUN:JSJA.0.2019-S2-072.
- [8] 王安, 顾益军.基于社区划分的节点重要性评估方法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(8): 42-48. DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.1904-0493.
- [9] CHEN L, WANG J J, ZHOU Z H, et al. Evaluations of node importance of urban road network based on transmission contribution matrix[J]. science & technology review, 2018, 36(6): 105-111.DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.06.013.
- [10] WEN X X, TU C L, WU M G. Node importance evaluation in aviation network based on "No Return" node deletion method[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2018, 503(8): 546-559.DOI: 10.1016/j.physa.2018.02.109.

- [11] 罗芳, 徐阳, 蒲秋梅, 等. 基于 PageRank 的多维度微博用户影响力度量[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(5) : 1354-1358, 1367. DOI: 10.19734/j.issn.1001-3695.2018.10.0798.
- [12] 王顶, 徐军, 段存玉, 等. 基于 PageRank 的用户影响力评价改进算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(5) : 60-67. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201708025.
- [13] 孙红, 左腾. 基于 PageRank 的微博用户影响力算法研究[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(4) : 1028-1032. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.04.015.
- [14] 宋月亭, 吴晟. 基于 PageRank 算法的改进物流节点选址模型研究[J]. 信息技术, 2019, (1) : 88-92. DOI: CNKI:SUN:HDZJ.0.2019-01-023.
- [15] 杜翠凤, 王俊. 基于改进 PageRank 算法的城市轨道交通站点选址规划[J]. 移动通信, 2016, 40(14) : 60-65. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2016.14.013.
- [16] 郭海锋, 张昌世, 穆元杰, 等. 基于改进 PageRank 算法的路网重要交叉口筛选方法[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5) : 925-930. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2016.05.015.
- [17] 严开, 李玲, 秦永彬. 道路交通网络中的关键节点识别方法研究[J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(11) : 1983-1990. DOI: CNKI:SUN:JSJK.0.2018-11-010.
- [18] 潘桔, 王青. 基于 TOPSIS 方法的多指标区域经济不平衡的定量测度[J]. 沈阳大学学报 (自然科学版), 2020, 32(2) : 167-172. DOI: 10.16103/j.cnki.21-1583/n.2020.02.013.
- [19] 陆百川, 舒芹, 马广露, 等. 基于多属性 TOPSIS 决策的交通网络路段重要度计算[J]. 浙江工业大学学报, 2020, 48(3) : 334-344. DOI: CNKI:SUN:ZJGD.0.2020-03-016.
- [20] 赵程伟, 董雄报, 洪青. 基于指标多属性视角的工程项目评标模型[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(4) : 143-147. DOI: 10.13579/j.cnki.2095-0985.2017.04.024.
- [21] KIVELA M, ARENNAS A, BARTHELEMY M, et al. Multilayer Networks[J]. Social Science Electronic Publishing, 2014, 2(3) : 261-268. DOI: 10.2139/ssrn.2341334.
- [22] HOLME P, SARAM K J. Temporal networks[J]. Physics Reports, 2012, 519(3) : 97-125. DOI: 10.1007/978-3-642-36461-7.
- [23] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 463(7291) : 1025-1028. DOI: 10.1038/nature08932.
- [24] SERGEY B, LAWRENCE P. The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine[J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1998, 30(1) : 107-117. DOI: 10.1016/S0169-7552(98)00110-X.
- [25] HAVELIWALA T H. Topic-sensitive PageRank: a context-sensitive ranking algorithm for Web search[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2003, 15(4) : 784-796. DOI: 10.1109/TKDE.2003.1208999.
- [26] NAZEMI S, VESAL H. Multiple Attribute Decision Making[M]. Springer Berlin Heidelberg, 1981. DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9.