

中文引用格式:何云勇,何恩怀,陈治宇,等.改进 LeaderRank 算法下高原山区公路网络关键节点识别[J].中国安全科学学报,2025,35(5):229-236.

英文引用格式:HE Yunyong, HE Enhuai, CHEN Zhiyu, et al. Key node recognition of highway network in high altitude mountainous area based on improved LeaderRank algorithm [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 229-236.

改进 LeaderRank 算法下高原山区公路 网络关键节点识别*

何云勇¹正高级工程师, 何恩怀¹正高级工程师, 陈治宇^{**1}, 高建平²教授,
张乐¹工程师, 孙璐¹正高级工程师
(1 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041;
2 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400041)

中图分类号:X951;U411 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.1144

资助项目:四川省交通运输科技项目(2025-A-09, 2022-A-01)。

【摘要】 为提升高原山区公路网络的稳定性和安全性,选取度中心性、中介中心性、接近中心性、行程时间权值和邻接节点通行时间度5项指标,建立关键节点评价指标体系,提出一种综合考虑拓扑结构和交通功能的关键节点识别方法,并以四川西部高原山区公路为例,在无向加权网络框架中,探究改进 LeaderRank、PageRank 和度中心性3种算法的关键节点识别效果与节点失效情况下网络效率和连通率的变化差异性。结果表明:3种算法在节点的关键程度上展现出不同优先级;按照改进 LeaderRank 算法排序的节点失效时,网络效率与连通率的下降最为迅速,且下降幅度也更为显著。

【关键词】 改进 LeaderRank; 高原山区公路; 网络关键节点; 节点重要性; 复杂网络

Key node recognition of highway network in high altitude mountainous area based on improved LeaderRank algorithm

HE Yunyong¹, HE Enhuai¹, CHEN Zhiyu¹, GAO Jianping², ZHANG Le¹, SUN Lu¹

(1 Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu
Sichuan 610041, China; 2 School of Traffic & Transportation, Chongqing
Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To improve the stability and safety of highway networks in plateau mountainous areas, an evaluation index system for critical nodes was established by selecting five indicators: degree centrality, betweenness centrality, closeness centrality, travel time weight, and adjacent node travel time degree. A critical node identification method integrating topological structure and traffic functionality was proposed. Taking the highway network in western Sichuan Plateau mountainous region as a case study, the differential performance of three improved algorithms was investigated. This algorithms included modified LeaderRank, PageRank, and degree centrality. Their performance was examined in identifying critical

* 文章编号:1003-3033(2025)05-0229-09; 收稿日期:2024-12-16; 修稿日期:2025-02-14

** 通信作者:陈治宇(1998—),男,重庆人,硕士,助理工程师,主要从事道路工程方面的工作。E-mail: chen_zhiyu@schdri.com。

nodes within an undirected weighted network framework. Additionally, the variations in network efficiency and connectivity rate under node failure scenarios were systematically examined. The results demonstrate that the three algorithms exhibit distinct prioritization in assessing node criticality. Node failure sequences ranked by the modified LeaderRank algorithm induce the most rapid and significant decline in both network efficiency and connectivity rate.

Keywords: improved LeaderRank; highway in plateau mountain area; network key node; node importance; complex network

0 引言

随着现代化的快速推进,国家公路网已具有一定规模,但高原山区的复杂地形与气候条件对公路网建设形成多重制约:频发地质灾害和极端气候事件加剧了路网构建难度,导致关键节点对外部交通依存度高且结构孤立性突出。但该区域路网普遍存在冗余度不足、交通流单向依赖等问题,显著削弱抗灾韧性并易引发局部连通失效和运输效能下降等风险。通过关键节点识别技术优化网络拓扑结构,对提升高原山区公路系统稳定性和安全性能具有重要理论价值与实践意义。

在研究分析公路网络时,学者们运用复杂网络理论进行公路网络建模和分析网络结构特性,如刘瑞等^[1]采用中介中心性和网络效率等指标分析我国高速公路的网络结构特性;崔杨等^[2]构建西部地区公路网的网络拓扑模型,并通过度与度分布、平均路径长度、网络效率等指标定量分析其网络结构。由于公路网络是一种现实交通网络,不仅网络结构具有复杂性,同时还受到交通属性的影响,因此,部分学者考虑公路网络实际因素的模型、指标分析逐渐成为研究趋势。如代洪娜等^[3]建立以流量加权的高速公路网络模型,通过出行效率和出行需求满足率等交通属性指标分析高速公路网络特性;林培群等^[4]引入客货车流量建立高速公路加权网络,并根据多元特征引力模型提出加权网络的中心性指标。目前,众多学者针对公路网络重要节点也展了大量的相关研究,如吴丽娜等^[5]结合网络连通性和可靠性等关键指标,评估了高速公路网络的节点重要度;AKBARZADEH 等^[6]发现节点的中介中心性与节点权值能有效识别公交网络中的关键节点;王灵丽等^[7]通过构建道路交通无向加权网络模型,结合节点交通量和 PageRank 值等指标与改进的随机森林算法,计算加权网络节点的重要性;张贵兰^[8]采用熵权法确定指标的权重,结合灰色系统评价与层次分析法综合评价公路网络节点的重要度;冯慧

芳等^[9]通过改进网页排名方法 PageRank 算法,有效识别出有向加权网络的关键点。综上,有效结合节点重要性评估和重要节点识别的研究还相对较少,多数识别方法对节点综合重要性的考虑仍十分欠缺。

鉴于此,笔者拟考虑高原山区公路的网络结构和交通功能,建立关键节点重要性评价指标体系,结合基于主、客观组合确定的综合权重,提出识别节点重要度的改进 LeaderRank 算法,以期为高原山区公路网络关键节点识别研究提供新的研究思路。

1 复杂网络模型构建

1.1 网络拓扑模型构建

将高原山区公路网络拓扑为复杂网络模型是一个重要的研究方法,而实现转化目标的技术方法主要有 Space-L、Space-R 和 Space-P 等。Space-L 的核心思想是根据公路网络中节点与路段之间的实际关系进行映射和模型构建,这种抽象映射的结果可以直观地反映实际路网中节点的位置关系和空间结构,能够在复杂网络理论的框架下深入剖析公路交通系统的拓扑结构,从而揭示关键节点、重要路段及整体空间布局,有助于深入理解交通网络的基础结构和节点间的实际联系。因此,为研究公路网中各交通节点的重要性,将采用 Space-L 方法构建高原山区公路网络拓扑模型。

将高原山区公路网络构建为无向有权网络模型 $G = (V, E, W)$, 其中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示节点的集合, n 为节点总数; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 表示边的集合, m 为连边总数; 邻接矩阵 $W = (w_{ij})_{n \times n}$ 表示加权网络的权重分布, w_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间边的权值。

1.2 复杂网络理论

作为典型的现实复杂系统,高原山区公路网络呈现出系统结构和功能的多层次复杂性。从系统结构的角度来看,公路交通系统具备庞大而错综复杂的道路网络;而从系统功能的角度来看,公路网络中

存在复杂的物资、信息和流量的交互关系。复杂网络理论为深入理解高原山区公路交通系统的结构和功能提供了有力的工具^[10]。

1.2.1 度与度分布

在复杂网络理论中,节点的度^[11]是衡量节点性质的关键指标之一,它以简单且直观的方式反映一个节点在网络中的影响力,因此,也被称为节点度。网络中与节点*i*直接相连的其他节点数量即为该节点的度值,用 k_i 表示。度分布是由节点度所构成的概率分布形式,在不同类型的网络中具有不同形式。

1.2.2 聚类系数

聚类系数通过刻画节点与其邻接节点之间的连接状态,能有效反映网络中节点局部聚集程度。

1.2.3 平均路径长度

最短路径长度是指节点*i*与节点*j*之间最短路径包含的边数,平均路径长度常用网络中所有节点对间的最短路径长度平均值表示。

2 高原山区公路网络关键节点识别

2.1 关键节点评价指标体系建立

综合考虑高原山区公路网络的拓扑结构与交通特点,关键节点的评价指标体系主要从网络拓扑结构和交通属性 2 个方面构建。高原山区公路网络关键节点评价指标体系构建结果如图 1 所示。

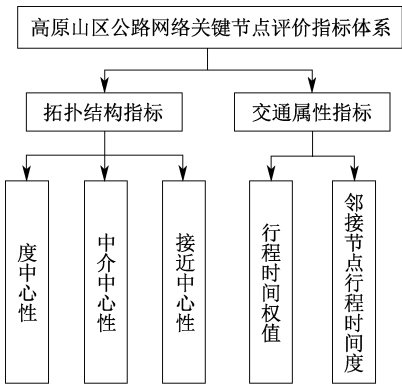


图 1 关键节点评价指标体系

Fig.1 Key node evaluation index system

在网络拓扑结构分析中,为全面考虑节点的重要性,引入度中心性、中介中心性和接近中心性 3 个指标;在交通属性方面,选取节点的行程时间权值和邻接节点行程时间度 2 个指标,以更准确地反映节点在交通流中的作用。

2.1.1 度中心性

节点的度中心性直接量化了节点的连接密度,

度值较高的节点通常被认为具有较高的中心性,因为它们与网络中的多个节点具有直接的联系。节点*i*的度中心性 D_i 表达式为:

$$D_i = k_i \tag{1}$$

2.1.2 中介中心性

中介中心性是一种从整体网络结构的角度出发,侧重于评估节点在网络信息传递与流通中作为中介的关键程度。节点*i*的中介中心性 B_i 表达式为:

$$B_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{N_{st}(i)}{N_{st}} \tag{2}$$

式中:*s*和*t*为网络中的 2 个节点,且*s*≠*t*≠*i*; N_{st} 为节点*s*到节点*t*的最短路径数量; $N_{st}(i)$ 为节点*s*到节点*t*的最短路径中经过节点*i*的路径数量。

2.1.3 接近中心性

接近中心性常用于量化节点在网络中与其他节点的距离长短,它揭示节点在网络拓扑结构中的相对位置。节点*i*的接近中心性 C_i 表达式为:

$$C_i = \frac{n - 1}{\sum_{i,j \in V, i \neq j} d_{ij}} \tag{3}$$

式中 d_{ij} 为节点*i*与节点*j*间的距离。

2.1.4 行程时间权值

行程时间权值是将网络连边的权重信息转移到节点上,定义为节点权值,可反映节点在网络结构和实际公路中的重要地位。节点*i*的行程时间权值 T_i 的计算公式为:

$$T_i = \sum_j^n w_{ij}(i \neq j) \tag{4}$$

2.1.5 邻接节点通行时间度

在研究高原山区公路网络时,由于节点间存在频繁的交通流联系,节点的重要性不仅受到其自身特性的制约,还受到其邻接节点的影响。为更有效地评估高原山区公路网络中节点的重要性,充分考虑节点在其邻域内的作用,同时结合公路网络交通流的动态特性,提出邻接节点行程时间度的概念,用以评估节点在高原山区公路网中的重要性。邻接节点通行时间度 A_i 可表示为:

$$A_i = T_i + \frac{T_i}{\sum_{j \neq i} T_{ij}} \times (\sum_{j \neq i} T_{ij} - T_i) \tag{5}$$

2.2 关键节点评价指标权重计算

2.2.1 主观权重计算

主观权重通过模糊层次分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)确定。权重计算有以下步骤:

1) 构建决策层次。在模糊层次分析法中,首先划分层次结构,将复杂决策问题的众多指标及准则划分为多个层级,包括目标层、准则层和指标层^[12]。

2) 构建判断矩阵。邀请专家成对比较同一准则层下各指标的相对重要程度,按照“1—9 标度法”给指标打分,根据分数构建简化三角模糊判断矩阵。

3) 一致性检验。一致性检验用于确保决策者的成对比较判断在逻辑上具有一致性,否则需要重新调整判断矩阵。

4) 求解模糊综合程度。在简化三角模糊判断矩阵通过一致性检验后,采用三角模糊数相应替换简化模糊数,构造出一个仅含三角模糊数^[13]的完整判断矩阵。根据构建的三角模糊数判断矩阵,计算专家给出的评估判断的模糊综合程度 Z_i 。

5) 主观权重确定。根据 Z_i , 确定同一层级中各指标的归一化权重,由各个指标权重共同组成最终的主观权重向量 W_F ,如下式:

$$w_i^0 = \min \mu(Z_i \geq Z_k), k \neq i \quad (6)$$

$$W_F = [w_1^F, w_2^F, \dots, w_j^F, \dots, w_m^F] \quad (7)$$

式中: w_i^0 为归一化前第 i 个指标的权重; w_i^F 为归一化后第 i 个指标的权重。

2.2.2 客观权重计算

基于指标相关性的权重确定法 (Criteria Importance Though Intercriteria Correlation, CRITIC) 法虽综合考虑了评价指标之间的相互关联性,但忽略了在实际决策问题中评价指标的数据存在离散性。将熵权法引入 CRITIC 法中,能有效度量数据离散程度,进而使得客观权重的确定更加科学。熵权改进的 CRITIC 法确定客观权重具体计算步骤如下:

1) 数据无量纲化。鉴于不同指标的量纲具有较大差异,需先进行数据集的归一化。

2) 波动性分析。波动性是指同一个指标在不同节点中取值的差距大小,有助于确定指标关于节点的敏感程度。指标的波动性常用标准差 S_j 表示。

3) 冲突性分析。冲突性即不同指标之间的相互关联性,常用相关系数 r 进行计算。绝对值相同的相关系数,其反映的指标间相关性强度应是相等的,因此,在计算指标间的对比强度时用 $(1 - |r|)$ 代替原方法中的 $(1 - r)$ 更适合:

$$R_j = \sum_{k=1}^n (1 - |r_{jk}|) \quad (8)$$

式中: R_j 为指标 j 的冲突性系数; r_{jk} 为指标 j 与其他指标的相关系数。

4) 熵值计算。根据信息熵理论,一个指标的熵

值越低,其所含信息量越大,因而在指标权重的分配中具有较大贡献和重要性,反之同理。所以熵值 e_j 的计算公式为:

$$e_j = - \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \frac{x'_{ij}}{\sum_i x'_{ij}} \times \ln \left(\frac{x'_{ij}}{\sum_i x'_{ij}} \right) \quad (9)$$

式中 x'_{ij} 为归一化处理后的指标数值。

5) 客观权重确定。指标的客观权重计算方法如下式,由各个指标的客观权重组成基于熵权改进 CRITIC 法确定的客观权重向量 W_C 。

$$w_j^C = \frac{C_j^E}{\sum_{j=1}^n C_j^E} = \frac{(S_j + e_j) \times R_j}{\sum_{j=1}^n (S_j + e_j) \times R_j} \quad (10)$$

$$W_C = [w_1^C, w_2^C, \dots, w_j^C, \dots, w_m^C] \quad (11)$$

式中: w_j^C 为基于熵权改进 CRITIC 法计算的第 j 个指标的客观权重; C_j^E 为第 j 个指标的熵值改进信息量。

2.2.3 综合权重计算

博弈论综合赋权法^[14]的核心思想是通过博弈论的框架来协调主客观赋权法之间的权重差异,以求得一种折衷的解决方案。该方法通过最小化主客观权重间的离差,以实现指标权重的合理分配^[15]。计算步骤如下:

1) 构建线性组合优化模型。根据博弈论的框架,需要明确定义参与博弈的多个权重以及它们之间的决策变量和目标函数,因此,构建权衡各权重关系的线性组合模型:

$$W = \alpha_1 W_F + \alpha_2 W_C \quad (12)$$

式中: W 为综合权重; α_1 和 α_2 为线性组合系数。

2) 计算最终综合权重。借鉴博弈论中求解纳什均衡点的理念,针对线性组合系数进行优化,达到主观与客观权重之间差距最小化的目的。并根据最优的线性组合系数 α_1^* 和 α_2^* ,最终求得指标体系的综合权重 W 。

$$\alpha_i^* = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^2 \alpha_i} \quad (13)$$

$$W = \alpha_1^* W_F + \alpha_2^* W_C \quad (14)$$

2.3 基于改进 LeaderRank 算法的关键节点识别

LeaderRank 算法是一种在 PageRank 算法基础上进行改进的,该算法通过提出的 LeaderRank 值 (简称 LR 值) 代替 PageRank 算法中的 PageRank 值,达到不依赖主观参数且结果表达形式更加严谨

的目的。

在原网络结构中增加一个额外的背景节点,并使该节点与原网络中的所有节点均建立双向连接,进而构建一个新网络。赋予原网络节点初始 LR 值为 1,背景节点初始 LR 值被赋为 0,将每个节点的 LR 均匀传递给其指向的节点,并以此建立跳转矩阵。通过反复迭代计算该矩阵,直至网络中所有节点的 LR 值不再变化,即认可网络已达到稳态,此时每个节点的最终 LR 值被作为节点重要度^[16]。

将高原山区公路网络构建为无向加权网络模型,为综合全面考虑关键节点的网络结构和交通特性,基于节点综合权重改进 LeaderRank 算法,使其与高原山区公路网络更加契合适用。改进 LeaderRank 算法中改进部分主要有:背景节点与原网络节点间的连接为单向连接,连线方向为原网络节点指向背景节点;节点的出度由节点的度值代替;将高原山区公路网络节点的综合重要度值作为原网络节点的初始 LR 值,并且节点的综合重要度值也要同样参与迭代计算,具体步骤如下:

1) 初始化参数。根据指标权重,得到邻接矩阵与节点综合重要度 C_i 。设置背景节点的改进 LR 值 (Improved LR, ILR 值),在初始时刻为 0,节点 i 初始时刻的 ILR 值为 C_i ,如下式:

$$C_i = W \times [D_i, B_i, C_i, T_i, A_i]^T \tag{15}$$

2) 迭代循环计算。计算网络中各节点在 t 时刻的 ILR 值,当网络中所有节点的 ILR 均保持不变时,则认为已达到收敛状态,停止迭代:

$$ILR_i(t) = \frac{ILR_i(t-1)}{k_i} + \sum_{j=1}^{n+1} \frac{a_{ij}}{k_i} ILR_j(t-1) \tag{16}$$

式中: $ILR_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的改进 LR 值; k_i' 为节点 i 的权值。

3) 节点重要度排序。计算各节点的重要度 ILR 值,并根据 ILR 值对节点进行重要性排序。

3 改进 LeaderRank 算法实例分析

3.1 川西高原山区公路网络模型构建

四川作为西南地区重要交通运输中心,公路网向西部高原山区纵深延伸。选取四川西部高原山区为研究范围,以映秀至马尔康、雅安至康定和雅安至西昌等走廊带为主的高速公路和国道组成的公路网为研究对象。将川西高原山区公路网络拓扑为无向加权网络模型,经过简化提取 236 个节点,255 条连

边,部分节点名称与序号见表 1。

表 1 公路网络节点序号表(部分)

Table 1 Highway network node numbers (part)

序号	名称	序号	名称	序号	名称
1	都江堰	6	汶川	11	朴头
2	龙池	7	克枯	12	古尔沟
3	映秀	8	桃坪	13	米亚罗
4	银杏	9	薛城	14	尽头寨
5	绵虬	10	理县	15	梭磨

为保证行程时间数据在节假日与交通事故情况下的稳定性,使用高德地图分别获取 2023 年 9 月 21 日(星期四)和 2024 年 1 月 6 日(星期六)的上午 9:00—12:00 与下午 14:00—17:00 时间段内区域路网中各路径行程时间数据。考虑交通使用者对不同行程时间的感知效果和考虑权重因取值相近而无法体现差异性的弊端,将各路径的行程时间按表 2 的区段划分后分配不同的权值。

表 2 行程时间权重取值

Table 2 Travel time weight value

时间区间	[1, 10]	(10, 30]	(30, 60]	(60, 90]	(90, 120]	(120, 180]
权重取值	11	9	7	5	3	1

根据节点与连边信息,生成川西高原山区公路网络拓扑模型,并通过复杂网络可视化工具 Gephi 软件拓扑图绘制模型,为使高原山区公路网络可视化后更美观且方便观察分析,应用 FR (Fruchterman Reingold) 算法展示网络模型的布局,如图 2 所示。

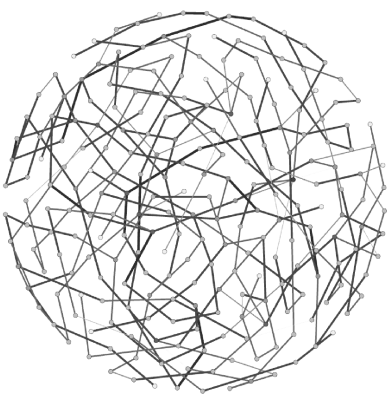


图 2 公路网络拓扑结构

Fig. 2 Highway network topology structure

3.2 川西高原山区公路网络特征分析

在川西高原山区公路网络的 236 个节点中,度值为 2 的节点数量最多,共有 166 个,占节点总数的 70.3%,最高度值为 5,最低度值为 1;公路网络的平均度值为 2.18。

整个川西高原山区的公路网络的平均聚类系数

约为 0.009,处于较低水平,说明节点间的连接具有疏松性,整体网络结构较为简单。川西高原山区公路网络的平均路径长度为 19.433,网络直径为 53,意味着在实际交通活动中,从公路网络的任意节点出发,到达目的地平均需要经过 19 到 20 个节点,最长路径上存在 53 个节点。

3.3 川西高原山区公路网络关键节点识别

3.3.1 关键节点指标数值计算

根据四川西部高原山区公路网络模型,计算出 236 个节点的 5 个评价指标具体数值,部分节点的指标数值见表 3。

表 3 节点评价指标数值表(部分)

Table 3 Node evaluation index values (part)						
序号	节点名称	度中心性	中介中心性	接近中心性	通行时间权值	邻接节点通行时间度
1	都江堰	3	0.089 9	0.044 6	25	36.111 1
2	龙池	2	0.097 3	0.046 5	22	36.317 5
3	映秀	4	0.121 0	0.048 5	38	57.000 0
4	银杏	2	0.127 4	0.050 6	20	32.857 1
5	绵鹿	2	0.134 8	0.052 9	18	29.387 8

3.3.2 关键节点指标权重计算

1) 主观权重计算。采用 FAHP 法确定指标的主观权重,邀请 10 位相关领域专家遵循“1—9 标度法”成对比较评估同一准则层中各个指标的相对重要程度,分别构建拓扑结构指标和交通属性指标下的判断矩阵,计算得到判断矩阵,再进行一致性检验。在高原山区公路网络中,考虑到拓扑结构与交通属性对于关键节点的重要性具有同等重要影响,所以在分析层次中的准则层具有相同的权重均为 0.5,各指标的主观权重结果见表 4。

表 4 关键节点评价指标主观权重

Table 4 Subjective weight of key node evaluation indicators				
准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	主观权重
拓扑结构指标	0.5	度中心性	0.625	0.313
		中介中心性	0.136	0.068
		接近中心性	0.238	0.119
交通属性指标	0.5	行程时间权值	0.302	0.151
		邻接节点行程时间度	0.698	0.349

2) 客观权重计算。关键节点评价指标均为正向指标,只需归一化处理 5 个指标的节点数据并计算得到指标的客观权重值,见表 5。

表 5 关键节点评价指标客观权重

Table 5 Objective weight of key node evaluation indicators					
评价指标	度中心性	中介中心性	接近中心性	行程时间权值	邻接节点行程时间度
波动性	0.128	0.241	0.258	0.167	0.177
冲突性	1.680	1.556	2.590	1.369	1.291
客观权重	0.188	0.173	0.325	0.160	0.154

3) 综合权重计算。将主观权重与客观权重数值代入基于博弈论构建的线性组合系数优化目标函数中,计算得出最优线性组合系数 $\alpha_1^* = 0.654\ 2$ 和 $\alpha_2^* = 0.345\ 8$,并最终确定川西高原山区公路网络关键节点评价指标体系的综合权重值,见表 6。

表 6 关键节点评价指标综合权重

Table 6 Comprehensive weight of key node evaluation indicators					
评价指标	度中心性	中介中心性	接近中心性	行程时间权值	邻接节点行程时间度
综合权重	0.271	0.104	0.189	0.154	0.282

3.3.3 关键节点识别结果

结合关键节点指标的数值与权重,根据式(15)得到关键节点的综合重要度,并将综合重要度引入改进 LeaderRank 算法中,得到关键节点的重要性排序,改进 LeaderRank 算法得到川西高原山区公路网络关键节点排序前 10 名的节点,见表 7。

表 7 关键节点排序前 10 名

Table 7 Top 10 key nodes in ranking					
排序	节点序号	节点名称	排序	节点序号	节点名称
1	24	康定	6	3	映秀
2	17	雅安	7	76	茂县
3	35	冕宁	8	93	理塘县
4	1	都江堰	9	14	尽头寨
5	39	西昌	10	18	多功

由表 7 可知:基于改进 LeaderRank 算法识别出的康定、雅安和冕宁等节点在公路网络中的关键度高于其他节点。从网络结构的角度来看,这些节点本身就连接了多条路径,使得这些节点在公路网络中具有较高的可达性,其在网络结构中处于中心位置。并且通过这些节点的路径多为高速公路,而高速公路作为高等级公路,具有较高的通行能力和效率,可缩短行程时间,所以无论是将这些节点作为起终点还是途经点,都可为出行者提供较短的行程时长,方便出行者实现出行目的。

3.4 关键节点识别效果分析

为对比分析关键节点识别方法与其他识别方法的差异性,将比较川西高原山区公路网络节点的不同识别方法重要性排序结果,见表 8。

表 8 不同方法识别关键节点排序

排序	改进 LeaderRank 算法		PageRank 算法		度中心性	
	节点序号	节点名称	节点序号	节点名称	节点序号	节点名称
1	24	康定	3	映秀	24	康定
2	17	雅安	93	理塘县	3	映秀
3	35	冕宁	35	冕宁	35	冕宁
4	1	都江堰	86	丹巴县	39	西昌
5	39	西昌	53	会理市	53	会理市
6	3	映秀	82	川主寺镇	76	茂县
7	76	茂县	39	西昌	82	川主寺镇
8	93	理塘县	180	协霍交	86	丹巴县
9	14	尽头寨	74	壤口村	93	理塘县
10	18	多功	79	江油关镇	1	都江堰

为进一步分析不同关键节点对公路网络的影响,按照重要性逐一蓄意攻击网络节点,致使节点结构破坏和功能失效,模拟由于灾害等因素导致公路网节点失效的情况反映识别方法的可行性和准确性。网络效率变化情况如图 3 所示。

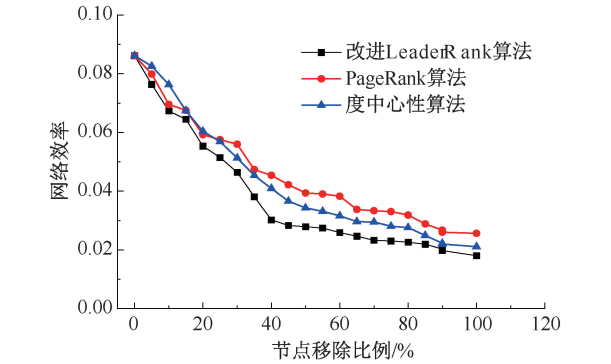


图 3 网络效率变化情况
Fig.3 Changes in network efficiency

从图 3 中可以看出,在关键节点的移除初期,网络效率均出现显著下降趋势,表明这些方法能辨识对网络效率有显著影响的核心节点。然而,不同方法识别结果各异,导致网络效率下降程度存在显著差异。基于改进 LeaderRank 算法识别的关键节点对网络效率影响最大,当 40% 的关键节点被移除后,网络效率迅速大幅下降,显著超过基于 PageRank 算法和度中心性的攻击策略,随着更多关

键节点的失效,网络效率继续下降但速度减缓。在整个过程中,基于改进 LeaderRank 算法的攻击策略下的网络效率始终处于较低水平。

川西高原山区公路网络连通率在节点失效情况下的变化如图 4 所示。可见:川西高原山区公路网络在关键节点失效时的剩余连通率呈现出显著的差异。基于改进 LeaderRank 算法的攻击策略导致网络剩余连通率最低,仅为初始网络的 21.03%,这表明:在该攻击策略下网络结构的破坏最为严重,导致网络连通性大幅下降。相比之下,在基于 PageRank 算法和度中心性的攻击策略下,网络连通性虽受影响,但连通率相对较高,分别为初始网络的 37.44% 和 33.73%。这表明:改进 LeaderRank 算法在识别高原山区公路网络关键节点方面具有较高的有效性和准确性。

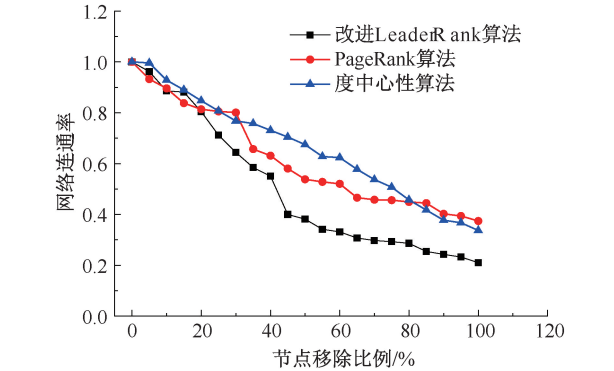


图 4 网络连通率变化情况
Fig.4 Changes in network connectivity

4 结 论

1) 综合考虑高原山区公路网络的拓扑结构和交通特性对节点重要性的影响,选取度中心性、中介中心性、接近中心性、行程时间权值和邻接节点行程时间度 5 个指标,建立节点评价指标体系,并基于评价指标的综合权重,将节点综合重要度作为影响力传递的重要依据,提出一种识别关键节点的改进 LeaderRank 算法。

2) 基于改进 LeaderRank 算法识别结果的关键节点失效对高原山区公路网络的破坏性最大,网络效率和网络连通率在 20 个关键节点失效时的下降幅度较 PageRank 与度中心性 2 种算法均更加显著,实现了关键节点的有效识别,有利于进一步完善并优化应急资源调度和路网布局,提升公路网络的总体运行效率和服务水平。

3) 研究主要考虑单节点失效情况,但公路网络在面临突发事件干扰时,受灾区域内存在多个节点

同时受到攻击和路段单元中断失效的情况,因此,在后续研究中需要针对多节点和多路段失效进行拓展分析和进一步探究。

参考文献

- [1] 刘瑞,叶堃晖,张正丰. 复杂网络视角下我国高速公路演变特征研究[J]. 项目管理技术, 2020, 18(10): 26-33.
LIU Rui, YE Kunhui, ZHANG Zhengfeng. Research on the evolution characteristics of China's highways from the perspective of complex networks[J]. Project Management Technology, 2020, 18(10): 26-33.
- [2] 崔杨,曾俊伟,钱勇生,等. 基于复杂网络的西部地区公路网可靠性研究[J]. 公路工程, 2018, 43(3): 46-51.
CUI Yang, ZENG Junwei, QIAN Yongsheng, et al. Reliability research of highway network in northwest China based on complex network theory[J]. Highway Engineering, 2018, 43(3): 46-51.
- [3] 代洪娜,李炜. 考虑流量加权的高速公路网脆弱性研究[J]. 公路, 2019, 64(5): 181-187.
DAI Hongna, LI Wei. Study of expressway network vulnerability considering on traffic flow[J]. Highway, 2019, 64(5): 181-187.
- [4] 林培群,刘子豪,闫明月. 基于多元加权中心特征的高速公路网韧性研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2023, 42(10): 122-131.
LIN Peiqun, LIU Zihao, YAN Mingyue. Resilience of highway network based on multiple weighted center characteristics[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2023, 42(10): 122-131.
- [5] 吴丽娜,吕岩峰,慈玉生. 省域高速公路网络连通可靠性:黑龙江省案例分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(增1): 134-140.
WU Li'na, LYU Yanfeng, CI Yusheng. Connectivity Reliability for provincial freeway network: a case study in Heilongjiang, China[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(S1): 134-140.
- [6] AKBARZADEH M, MEMARMONTAZERIN S, DERRIBLE S, et al. The role of travel demand and network centrality on the connectivity and resilience of an urban street system[J]. Transportation, 2019, 46(5): 1 127-1 141.
- [7] 王灵丽,黄敏,高亮. 基于聚类算法的交通网络节点重要性评价方法研究[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(2): 80-88.
WANG Lingli, HUANG Min, GAO Liang. Methods of importance evaluation of traffic network node based on clustering algorithms[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38(2): 80-88.
- [8] 张贵兰. 基于节点综合重要度的城市道路交通网络相继拥堵疏散路径规划[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
ZHANG Guilan. Cascading failure evacuation path planning of urban road traffic network based on comprehensive importance of nodes[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [9] 冯慧芳,柏凤山,徐有基. 基于轨迹大数据的城市交通感知和路网关键节点识别[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(3): 42-47, 54.
FENG Huifang, BAI Fengshan, XU Youji. Urban traffic perception and critical node identification of road network based on trajectory big data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(3): 42-47, 54.
- [10] 李卓,何瑞春,李文霞. 考虑时空动态特征的高速铁路网络鲁棒性评估[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 111-120.
LI Zhuo, HE Ruichun, LI Wenxia. Robustness evaluation for high-speed railway network with spatiotemporal dynamic characteristics[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 111-120.
- [11] 徐云帆. 基于复杂网络理论的公路网脆弱性识别方法研究[D]. 济南: 山东交通学院, 2023.
XU Yunfan. The identification method research of road network's vulnerability based on complex network theory[D]. Ji'nan: Shandong Jiaotong University, 2023.
- [12] 李倩,张飞涟. 模糊可拓工程优选模型的城市轨道交通路网方案评价方法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(6): 126-131.
LI Qian, ZHANG Feilian. Evaluation methodology of urban mass transit network project option using the fuzzy expandable engineering optimization model[J]. China Railway Science, 2009, 30(6): 126-131.
- [13] 朱克毓,董庆兴,梁昌勇,等. 一类三角模糊层次分析法的无效性分析[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(8): 2 104-2 112.
ZHU Keyu, DONG Qingxing, LIANG Changyong, et al. The analysis of the invalidity of one kind triangular fuzzy AHP[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35(8): 2 104-2 112.
- [14] 魏业文,吴希韬,聂俊波,等. 基于博弈论-改进 TOPSIS 的电能质量综合评价[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 50-56.
WEI Yewen, WU Xitao, NIE Junbo, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on BWM-CRITIC-TOPSIS method[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(16): 50-56.
- [15] 王铁旦,穆毅强,彭定洪. HAZOP 风险评级的变权犹豫模糊方法[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(5): 61-67.
WANG Tiedan, MU Yiqiang, PENG Dinghong. Hesitant fuzzy method with variable weight for HAZOP risk sorting[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(5): 61-67.
- [16] 魏震波,鞠昫,易刚春,等. 基于改进 LeaderRank 算法的电网连锁故障关键线路辨识方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4 265-4 273.
WEI Zhenbo, JU Qi, YI Gangchun, et al. Identification of critical lines of power grid cascading failures based on modified LeaderRank algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4 265-4 273.

作者简介: 何云勇 (1986—),男,四川广安人,博士,正高级工程师,主要从事道路工程方面的工作。
E-mail: heyunyong@schdri.com。