

考虑行程时间的高速公路网脆弱性研究

范宏贤¹, 代洪娜^{2*}, 李 辉³, 李忠锐¹, 焦雯雯⁴, 赵欢欢¹

¹山东交通学院, 交通与物流工程学院, 山东 济南

²山东交通学院, 顿河学院, 山东 济南

³枣庄市交通运输综合执法支队, 山东 枣庄

⁴交通运输部公路科学研究院, 北京

收稿日期: 2024年4月9日; 录用日期: 2024年5月17日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

为避免突发事件造成路网中的部分节点或路段失去其通行能力, 进而影响整个路网的运行效率, 保障高速公路网络安全运营, 运用复杂网络理论对高速公路网络脆弱性进行研究。首先, 在Space-L方法的基础上, 构建行程时间加权的高速公路网络拓扑结构, 并提出了此加权网络中节点重要度的衡量指标; 其次, 基于节点与边的相关指标, 采用删除法模拟高速公路网络在不同攻击策略下的脆弱性变化; 最后, 结合山东省区域高速公路网交调数据与高速公路收费数据, 研究行程时间加权下的高速公路网脆弱性。实例结果表明: 行程时间加权的节点重要度指标能够综合考虑高速公路网的多项指标, 更好地体现节点的重要度; 在高速公路网络的脆弱性方面, 不管是节点攻击还是边攻击, 高速公路网络对不同攻击策略都表现出一定的脆弱性; 从攻击效果来看, 蓄意攻击节点策略中, 贪心攻击策略要优于初始攻击策略, 并且不论是节点还是边攻击策略下, 贪心加权介数的攻击策略都要优于其它攻击策略, 使网络表现出更强的脆弱性。

关键词

高速公路, 复杂网络, 行程时间, 删减法, 脆弱性

A Study on the Vulnerability of Expressway Networks Considering Travel Time

Hongxian Fan¹, Hongna Dai^{2*}, Hui Li³, Zhongrui Li¹, Wenwen Jiao⁴, Huanhuan Zhao¹

¹School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

²Don College, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

³Zaozhuang City Transportation Comprehensive Law Enforcement Detachment, Zaozhuang Shandong

⁴Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing

Received: Apr. 9th, 2024; accepted: May 17th, 2024; published: May 31st, 2024

*通讯作者。

文章引用: 范宏贤, 代洪娜, 李辉, 李忠锐, 焦雯雯, 赵欢欢. 考虑行程时间的高速公路网脆弱性研究[J]. 交通技术, 2024, 13(3): 204-219. DOI: 10.12677/ojtt.2024.133024

Abstract

To prevent partial nodes or sections in the road network from losing their traffic capacity due to unexpected events, thus affecting the overall operational efficiency of the network and ensuring the safe operation of the highway network, this study applies complex network theory to research the vulnerability of highway networks. Firstly, based on the Space-L method, a journey time-weighted topological structure of the highway network is constructed, and indicators for measuring the importance of nodes in this weighted network are proposed. Secondly, using node and edge-related indicators, the vulnerability changes of the highway network under different attack strategies are simulated through a deletion method. Lastly, combining regional highway network traffic data and toll data from Shandong Province, the vulnerability of the journey time-weighted highway network is studied. The results show that the journey time-weighted node importance indicators can comprehensively consider multiple indicators of the highway network, better reflecting the importance of nodes. In terms of the vulnerability of the highway network, whether it is node or edge attacks, the highway network shows certain vulnerability to different attack strategies. From the perspective of attack effectiveness, in the intentional node attack strategy, the greedy attack strategy is superior to the initial attack strategy. Moreover, whether under node or edge attack strategies, the greedy weighted betweenness attack strategy outperforms other strategies, revealing a greater vulnerability of the network.

Keywords

Highway, Complex Network, Travel Time, Deletion Method, Vulnerability

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会快速发展和城市化加速,高速公路网成为现代交通运输系统的核心,承载着重要的客货运任务。但面临日益频发的交通事故、自然灾害、设施故障、节假日等多重风险,这些挑战可能严重影响高速公路运行效率。因此,深入研究高速公路网的脆弱性对于理解其运行特性、预防和应对潜在风险至关重要。

近年来,复杂网络的相关知识已被用来研究不同交通方式的路网脆弱性中。S. Mukherjee [1]等人对印度公路网络进行了统计分析,发现该网络具有小世界和无标度网络的特征。X. Zhang [2]、S.D. Dimitrov [3]、F.A. Lopez 等[4]将度中心性、介数中心性等复杂网络分析指标用于轨道交通网络的重要节点识别和脆弱性分析中。杨峰[5]、王希良[6]等人分别分析了城市道路网络和地铁系统的脆弱性及其结构特征。张欣[7]等构建了全球集装箱海运网络模型,分析网络在随机干扰和蓄意干扰下网络的脆弱性。高速公路网的脆弱性研究方面,刘瑞[8]等人利用复杂网络理论研究了全国 26 年间高速公路网络的拓扑特性。翁小雄[9]等人则基于多层复杂网络模型,设计了一种 PageRank-TOPSIS 融合算法,对高速公路节点的重要性进行了分析,为高速公路节点重要性研究提供了新的视角和方法。杜佳昕[10]等提出了基于加权流量介数中心性的路网脆弱性分析方法。李博[11]等从最大连通子图的角度设计了一种改进的攻击策略,从节点攻击和边攻击两方面分析了高速公路网络的脆弱性。

对于高速公路网的脆弱性分析多采用传统的网络分析方法,往往仅考虑了节点间实际距离对网络的影响,而很少考虑到行程时间这一重要因素。实际上,行程时间是衡量高速公路网服务水平的重要指标之一,也是影响道路使用者出行选择的关键因素。因此,考虑行程时间的高速公路网脆弱性研究具有重要的理论和实践价值。

2. 加权网络模型的构建及节点重要度指标

在传统网络拓扑模型构建方法的基础上,本文综合考虑流量、车速等指标,提出了考虑行程时间构建高速公路加权网络模型,以更准确地评估网络的结构和功能,并识别出对网络脆弱性影响最大的节点。

2.1. 行程时间加权网络模型的构建

基于复杂网络理论,将网络抽象为 $G = (N, S, W)$,式中: N 为高速路网节点的集合, $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, n 为高速路网节点的数量; S 为高速路网中节点关系的集合, $S = (s_{ij})$, $i, j \in N$, $s_{ij} = 1$ 表示节点 i 与节点 j 相连, $s_{ij} = 0$ 表示节点 i 与节点 j 不相连; W 为高速路段的权重值的集合, $W = (w_{ij})$ 。 w_{ij} 为路段的行程时间,参考美国联邦公路局函数计算,其具体公式为:

$$w_{ij} = t_{ij0} \times \left(1 + \alpha \left(\frac{Q}{C}\right)^\beta\right) \quad (1)$$

$$t_{ij0} = \frac{L_{ij}}{V_{ij}} \quad (2)$$

其中, t_{ij0} 为路段自由行驶时间, L_{ij} 为路段的实际里程, V_{ij} 为路段的设计时速, Q 为当时通过该路段的交通量,单位 pcu/h , C 为路段的实际通行能力,单位 pcu/h , α 、 β 为模型待定参数,取值分别为 0.15, 4。

2.2. 节点重要度指标

本文在传统节点重要度指标的基础上提出了加权度、加权介数、加权 PageRank 值三个重要度指标,该方法能够捕捉到更微妙的网络动态,如交通拥堵、路线选择偏好等因素,从而使得即便是在表面上连接数相同的节点,也可能因为其连接的行程时间不同而有不同的重要度评估。

2.2.1. 节点加权度

复杂网络理论中节点度是指和该节点相关联的边的条数,可以用于衡量网络中的关键性节点,但在节点较多的网络中往往存在大量度值相同的节点,不能够很好地适用于以上构建的高速公路网络。本文在传统度定义的基础上提出了节点的加权度 D_i ,其定义为:与节点 i 相连的各条边的行程时间的均值。如果一个节点的加权度较小,意味着它与网络中其他节点的连接更为紧密,在网络中扮演着更为关键的角色。计算公式为:

$$D_i = \sum_{i, j \in N, i \neq j} \frac{w_{ij}}{f_i} \quad (3)$$

式中, f_i 为节点 i 的度值,即节点 i 连接的边的条数。

2.2.2. 节点加权介数

节点加权介数反映的是节点在网络中的中心性或者重要程度。它是节点在网络中所有最短路径中出现的次数,这些节点间的最短路径即为节点间权重值最小的路径。因此,加权介数更能反映节点在网络中的控制力和影响力。节点 i 的加权介数 M_i 的定义为:

$$M_i = \frac{\sum_{i,j \in N, i \neq j} n_{ij}(q)}{\sum_{i,j \in N, i \neq j} n_{ij}} \quad (4)$$

式中, n_{ij} 表示节点 i 、 j 之间的最短路径的个数; $n_{ij}(q)$ 表示节点 i 、 j 之间的最短路径中经过节点 i 的个数。

2.2.3. 加权 PageRank 值 PR

近年来, PageRank 算法已广泛应用于各种领域, 包括社交网络、生物信息学和推荐系统等。本文采用加权 PageRank 算法对高速公路网络节点的重要度进行分析。

$$PR(i) = \frac{1-d}{N} + d \sum_{j=1}^N PR(j)/C_{out}(j) \quad (5)$$

式(5)中 $PR(i)$ 为节点的 i 的 PageRank 值; d 为阻尼因子, 通常取值为 0.85; $PR(j)$ 为节点 j 的加权 PageRank 值; $C_{out}(j)$ 为节点 j 的出度, 即从该节点出发的有向边的数量。

2.3. 边重要度指标

2.3.1. 边权重

在构建加权网络时, 已定义行程时间为边权重。行程时间不仅取决于路段的长度和设计时速, 还受到交通流量、路况等因素的影响。因此, 边权重可以用来反映高速公路网络中不同路段的通行效率和拥堵程度。

2.3.2. 边加权介数

与节点介数相同, 它基于加权最短路径的概念, 计算一条边在所有节点对之间的加权最短路径中出现的频率。边的加权介数中心性越高, 说明该边在连接网络中的不同部分方面起着更加重要的作用。在高速公路网络中, 一条边的加权介数中心性高意味着它是许多最短行程时间路径的一部分, 因此在网络的通行效率和连通性方面具有较高的重要性。

3. 高速公路网脆弱性分析模型

在行程时间加权网络中, 最短路径意味着找到具有最小总权重的路径, 本文通过使用 Dijkstra 算法来实现。

3.1. 网络脆弱性衡量指标

1) 网络运行效率

当高速公路网络中的节点(例如出入口、立交桥)或边(路段)受到干扰(如事故、维修、拥堵)时, 网络的运行效率必然会受到影响。高速公路网络运行效率 e 可以表示为:

$$e = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (6)$$

其中, d_{ij} 表示节点 i 到节点 j 之间经过的路径的行程时间的最小值。

高速公路网络效率的相对大小 Q , 具体表达为:

$$Q = \frac{e'}{e} \quad (7)$$

其中, e 为网络初始效率值, e' 为受干扰后的网络效率值。

2) 最大连通子图

当高速公路网络的节点(例如出入口、立交桥)或边(路段)受到干扰后, 网络可能会分裂成若干子网络, 其中含有节点数量最多的子网络被称为最大连通子图。最大连通子图的大小直接反映了高速公路网络的稳定性以及抵抗攻击或干扰的能力。最大连通子图的相对大小 G 可以用以下公式表示:

$$G = \frac{M'}{M} \quad (8)$$

式中: G 表示最大连通子图的相对大小; M' 表示干扰后最大连通子图的节点数; M 表示干扰前最大连通子图的节点数。

如果 G 值越大, 说明最大连通子图的规模越大, 高速路网的稳定性越强, 对攻击或干扰的抵抗力也越强。因此, 通过计算 G 值, 我们可以评估高速路网在受到干扰后的稳定性和抵抗力。

3.2. 高速公路网络攻击策略

基于删除法的攻击策略可以分为两种主要类型, 具体流程见图 1: 单个节点或边攻击策略和累计节点或边攻击策略。

3.2.1. 单个节点或边攻击策略

即删除网络中的每一个节点或边, 并计算节点或边删除后网络效率与最大连通子图的变化。这种方法可以帮助识别哪些单个节点或边对网络的整体性能和稳定性至关重要。

3.2.2. 累计节点或边攻击策略

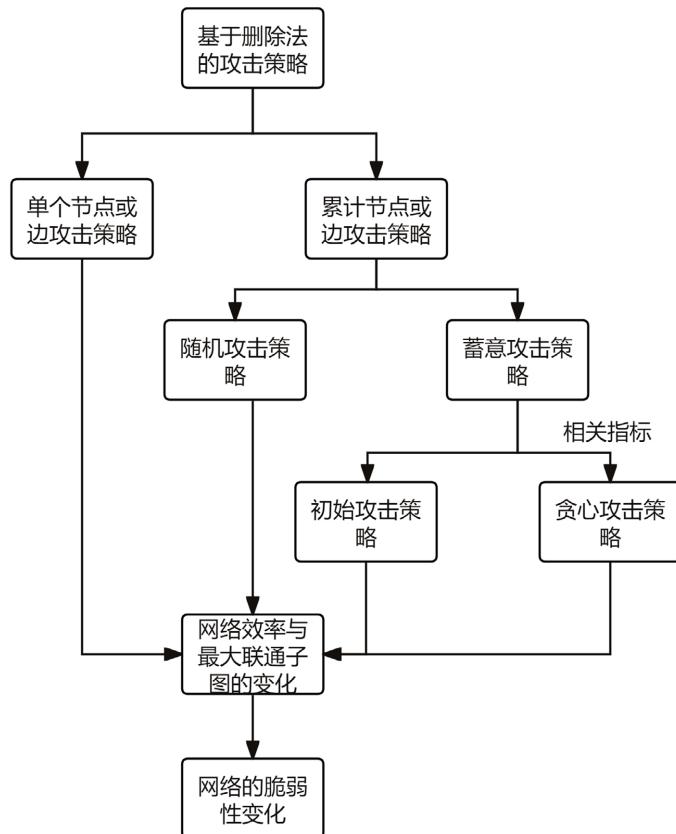


Figure 1. Attack strategy flowchart

图 1. 攻击策略流程图

这种策略涉及按照某种顺序删除多个节点或边，然后观察网络性能的累积变化，可以分为随机攻击策略和蓄意攻击策略。

随机攻击策略随机选择网络中的节点或边进行攻击，在这种策略中，节点或边是随机选择并累计删除的。这种方法模拟了网络在随机故障或攻击下的表现，可以用来评估网络的脆弱性。

蓄意攻击策略则根据网络中某一参数的大小(如节点的度、介数、PageRank 值等)，有针对性地累计攻击网络中的节点和边。目前，蓄意攻击策略主要有两种主流的攻击方式：初始攻击策略和贪心攻击策略[12]。

① 初始攻击策略：在这种方法中，根据网络中节点的初始指标(如度、介数等)大小进行排序，然后按照这个顺序依次攻击节点。这种策略假设网络中的重要节点在攻击开始时就已经确定。

② 贪心攻击策略：这种策略在初始攻击策略的基础上增加了动态调整的过程。每次攻击后，都会重新计算网络中剩余节点的指标并进行排序，然后根据新的排序结果选择下一个攻击目标。这种方法考虑了网络结构随攻击进展而变化的情况，更接近实际情况。

4. 实例分析

本文以山东省境内的所有收费站点及互通式立交为节点，采用 Space-L 建模方法建立网络拓扑结构。根据山东省交通厅网站提供的山东省高速公路实时路况信息，得到山东高速公路网络拓扑图见图 2，网络拓扑模型中共有 657 个节点，节点之间共有 725 条边。

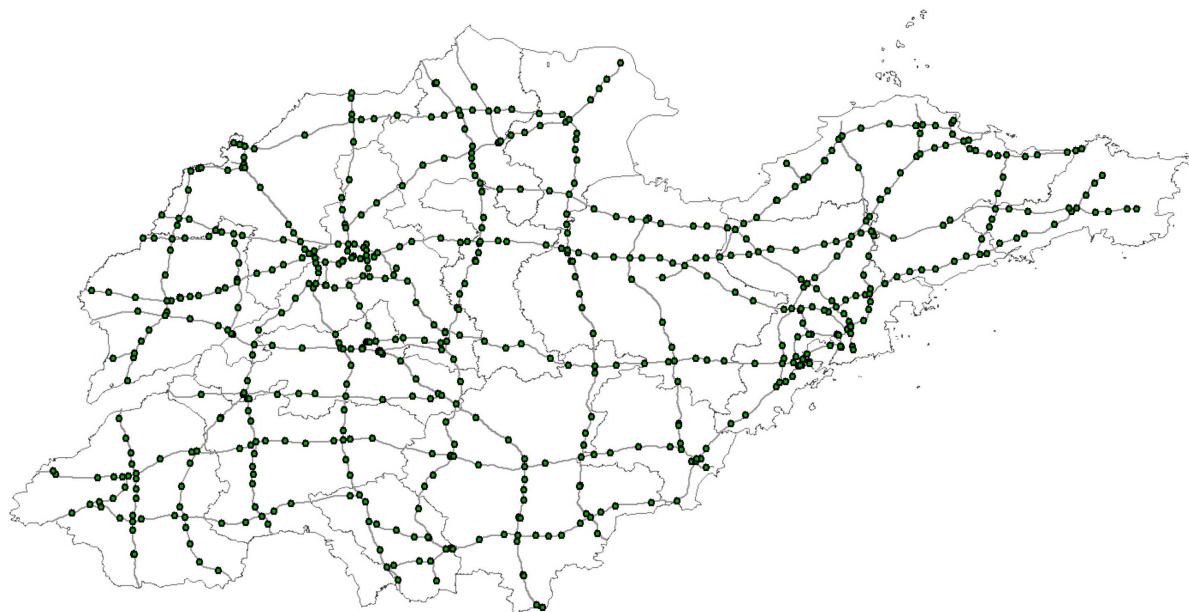


Figure 2. Topology map of Shandong Province expressway network
图 2. 山东省高速公路网拓扑图

4.1. 基于行程时间加权网络的构建

采用 2021 年 10 月 11 日山东省高速公路卡口数据计算出各卡口以小汽车为标准车型的当量交通量，并结合收集到的山东省各高速公路的基本信息，计算出各路段的行程时间见图 3，并以行程时间作为边权重构建加权网络。由以下数据可知，网络中 80% 的路段行程时间处于 0.03 h~0.2 h 之间。

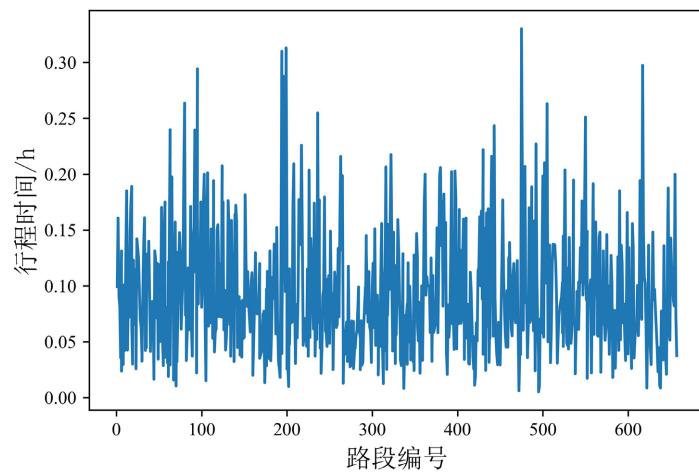
**Figure 3.** Travel time values for each road section

图 3. 各路段行程时间值

4.2. 高速公路网络节点指标分析

通过计算, 得到各节点的重要度指标结果见图 4, 并将结果按节点排序, 选出排名前 15 位的节点, 详细信息见表 1。

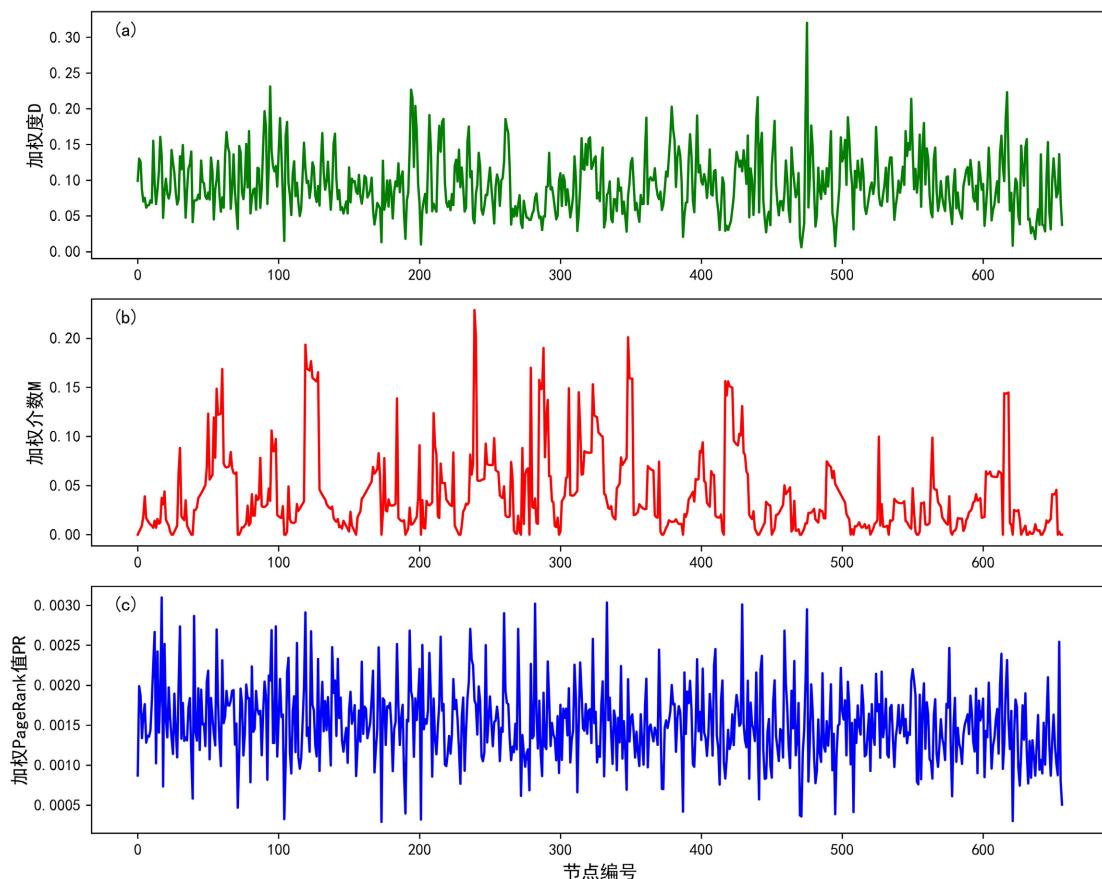
**Figure 4.** Basic parameter values of nodes

图 4. 节点基本参数值

Table 1. Top 15 nodes in basic importance ranking**表 1. 节点基本重要度排序前 15 位**

序号	D		M		PR	
	节点	值	节点	值	节点	值
1	周格庄收费站	0.008	唐王立交	0.229	聊城西立交	0.00310
2	济南兴隆收费站	0.009	唐王东枢纽	0.202	黄岛枢纽	0.00304
3	港沟收费站	0.010	彭家枢纽	0.201	兴隆枢纽	0.00302
4	潍日滨海收费站	0.013	辛庄子枢纽	0.194	东平湖枢纽	0.00301
5	日照收费站	0.015	槐荫枢纽	0.190	宁津收费站	0.00295
6	灵珠山东立交	0.018	滨海南立交	0.177	辛庄子枢纽	0.00291
7	海阳东收费站	0.020	小许家枢纽	0.170	涌泉立交	0.00290
8	德州西收费站	0.023	寿光西收费站	0.169	大杨家立交	0.00287
9	黄岛东收费站	0.026	胶南枢纽	0.169	日兰枢纽	0.00274
10	唐王南枢纽	0.027	寿光北收费站	0.168	王官屯枢纽	0.00273
11	灵珠山东收费站	0.028	寿光东收费站	0.167	齐河北立交	0.00270
12	高青北收费站	0.028	郭家埠枢纽	0.165	夏庄收费站	0.00270
13	兗州西收费站	0.028	潍坊北收费站	0.160	马店立交	0.00270
14	泰肥收费站	0.029	博兴收费站	0.159	竹园枢纽	0.00269
15	临港收费站	0.029	博兴北收费站	0.159	济乐滨德立交	0.00268

由以上图和表可知：

- 1) 从高速路网节点的加权度可以看出, 高速路网中加权度最大值约为 0.320, 最小值约为 0.008, 加权度小于 0.10 的节点约占网络节点总数的 61.8%, 表明网络的大多数节点 BPR 加权度较小, 网络中的节点之间联系紧密。加权度较小的节点大多是处于路段中间的枢纽节点, 这些节点对此区域的连通性起着相对核心的作用, 一旦发生干扰会对该路段的连通性造成破坏, 进而对本区域内的交通产生较大影响。
- 2) 高速路网节点间加权介数最大值为 0.229、最小值为 0, 加权介数超过 0.1 的节点约占网络节点总数的 8.5%。加权介数为 0 的节点共有 44 个, 这是由于这些节点大多是位于山东省境内某条高速公路的起点处或终点处, 处于整个高速公路网的边缘地带, 对整个网络的连通性影响较小。相较于加权度, 加权介数的值整体较低, 但峰值更加突出, 表明网络中有特定的节点控制着大量的最短路径。
- 3) 该网络中节点 PageRank 值的分布较为集中, 最大值为 0.00310, 最小值为 0.00029, 大部分节点的 PageRank 值在 0.001 到 0.003 之间。这表明网络中大部分节点的地位相对较为接近, 只有少数节点的 PageRank 值较高或较低。由于网络中节点数较多且所有节点的 PageRank 值和为 1, 因此每个节点的 PageRank 值差值相对较小。

4.3. 基于节点的高速公路网脆弱性分析

4.3.1. 单个节点攻击下网络的脆弱性

为分析单个节点攻击策略下网络的脆弱性, 基于删除法计算网络中每个节点删除后网络效率与最大联通子图相对大小的变化见图 5。

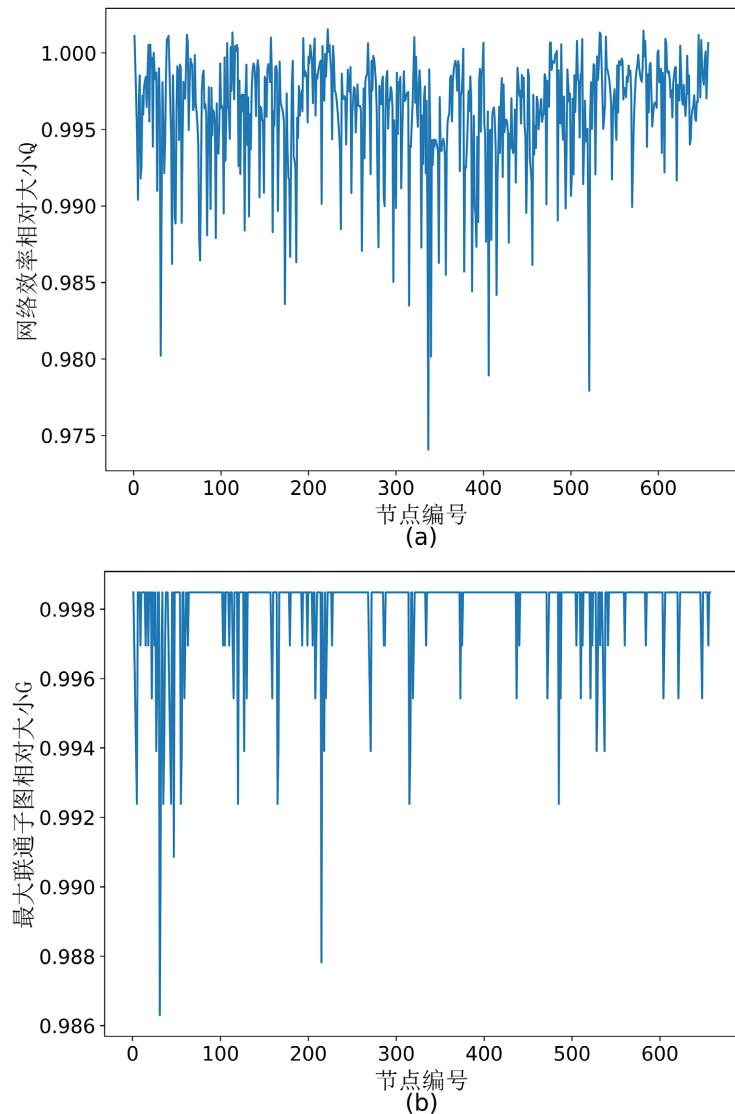


Figure 5. Changes in network performance under a single node attack strategy
图 5. 单个节点攻击策略下网络性能变化情况

Table 2. Top 12 impact of single node attack strategy on network performance

表 2. 单个节点攻击策略下对网络性能影响前 12 位

序号	节点	$\frac{(E - E_i)}{E}$	节点	$\frac{(G - G_i)}{G}$
1	唐王立交	0.02593	田庄枢纽	0.01370
2	东平湖枢纽	0.02208	文登西枢纽	0.01218
3	孔村枢纽	0.02107	曹州枢纽	0.00913
4	唐王东枢纽	0.01984	莘县北收费站	0.00913
5	田庄枢纽	0.01979	临沂南枢纽	0.00761
6	临沂南枢纽	0.01651	济广枢纽	0.00761
7	辛庄子枢纽	0.01641	成武枢纽	0.00761

续表

8	泰山枢纽	0.01581	德州北枢纽	0.00761
9	殷家林枢纽	0.01558	疏港路枢纽	0.00761
10	莱芜枢纽	0.01496	沾化思源湖枢纽	0.00761
11	于家庄枢纽	0.01450	莘县收费站	0.00761
12	晏城枢纽	0.01429	菏泽东收费站	0.00761

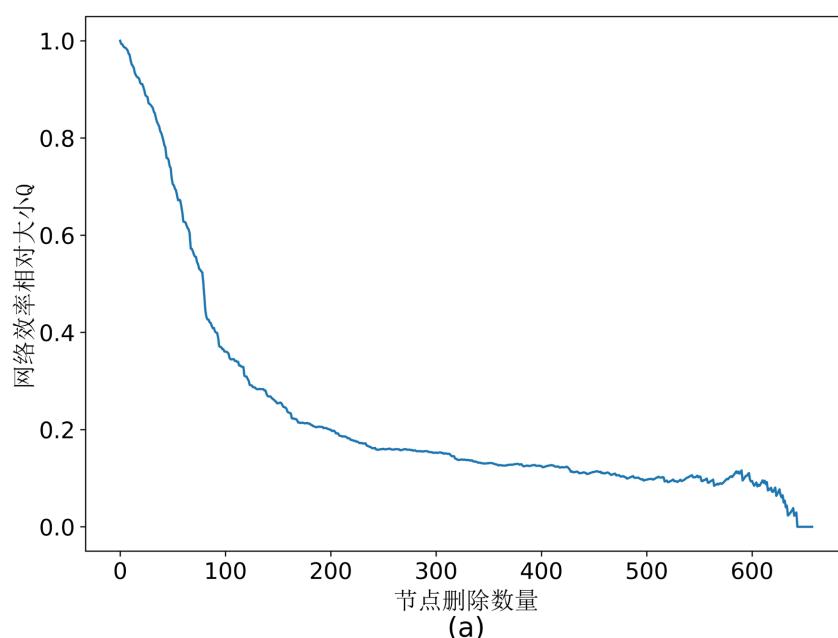
在基于单个节点的攻击策略下,部分节点的删除有时会使网络效率变大,表现出网络的冗余性[13],这通常是由于攻击导致网络流量的重新分配和优化。具体来说,当攻击一个节点时,网络会进行自我调整,以寻找新的路径和连接方式来传输数据。这个过程可能会使得网络中的其他节点和路径得到更好的利用,从而提高了整个网络的效率。此外,攻击也可能导致网络中的一些低效节点被淘汰或优化,从而提高了整个网络的性能。

采用 $\frac{(E-E_i)}{E}$ 和 $\frac{(G-G_i)}{G}$ 分析单个节点失效对高速路网性能的影响,得到影响网络效率和网络结构

前 12 的节点,见表 2。可以看出,单个节点的删除最多能使网络效率下降 2.6%,最大连通子图下降 1.4%。唐王立交、东平湖枢纽、孔村枢纽、田庄枢纽、文登西枢纽、曹州枢纽等对网络效率和网络结构影响较大,特别是田庄枢纽,其失效后网络效率下降 2.0%最大连通子图下降 1.4%。

4.3.2. 随机攻击节点下网络的脆弱性

为保证随机攻击效果的科学性,取多次实验的均值作为实验结果,攻击的最终结果见图 6,在基于节点的随机攻击下,随着节点删除数量的增加,网络效率与最大连通子图会逐渐降低。这表明,随着攻击强度的增加,网络中信息的传递和交通的流动性会受到越来越大的影响。当节点删除数量超过 180 个时,网络效率的相对大小下降至 0.17、最大连通子图的相对大小下降至 0.1,并逐渐趋于平缓,这意味着网络中大部分关键节点被删除,网络的连通性和效率受到了严重破坏。



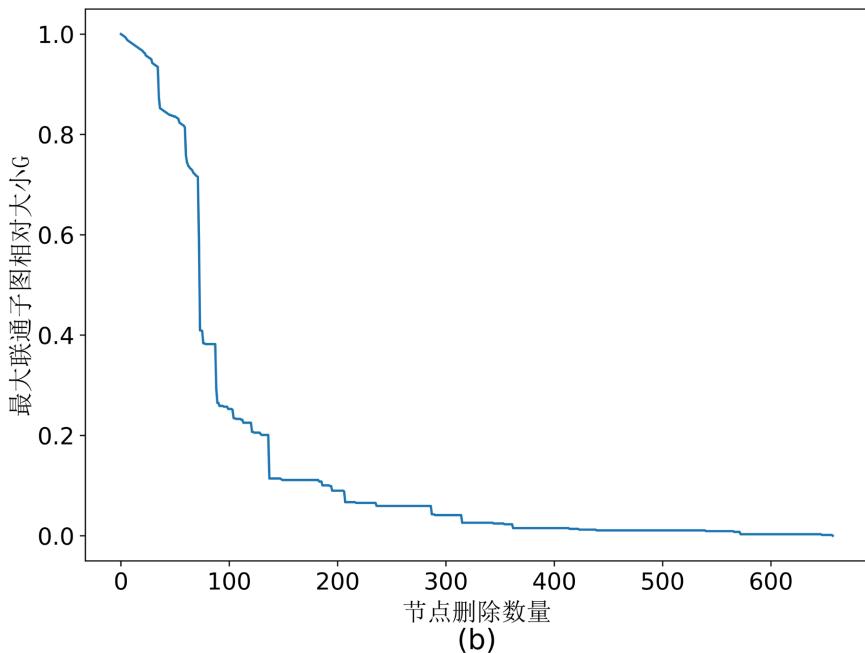
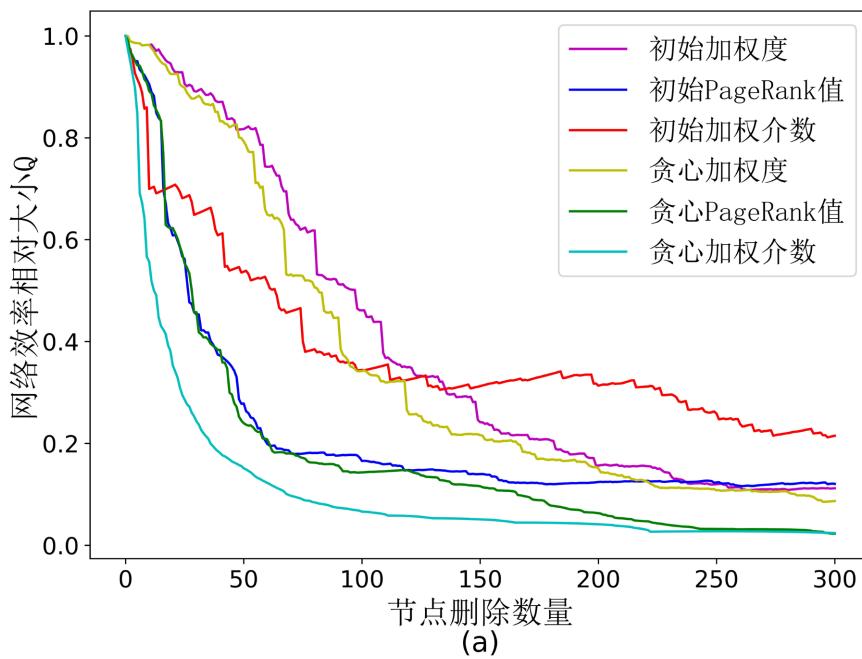


Figure 6. Changes in network performance under random attack node strategy
图 6. 随机攻击节点策略下网络性能变化情况

4.3.3. 蓄意攻击节点下网络的脆弱性

在基于节点的蓄意攻击策略中,为分析不同指标对高速公路网络脆弱性的影响,笔者基于加权度 D、加权介数 B、加权 PageRank 值三个指标,结合初始攻击策略、贪心攻击策略,设计了 6 种攻击方式对高速路网脆弱性进行分析,蓄意攻击下网络效率和最大连通子图的相对大小见图 7(以删除 300 个节点为阈值)。可以得出:



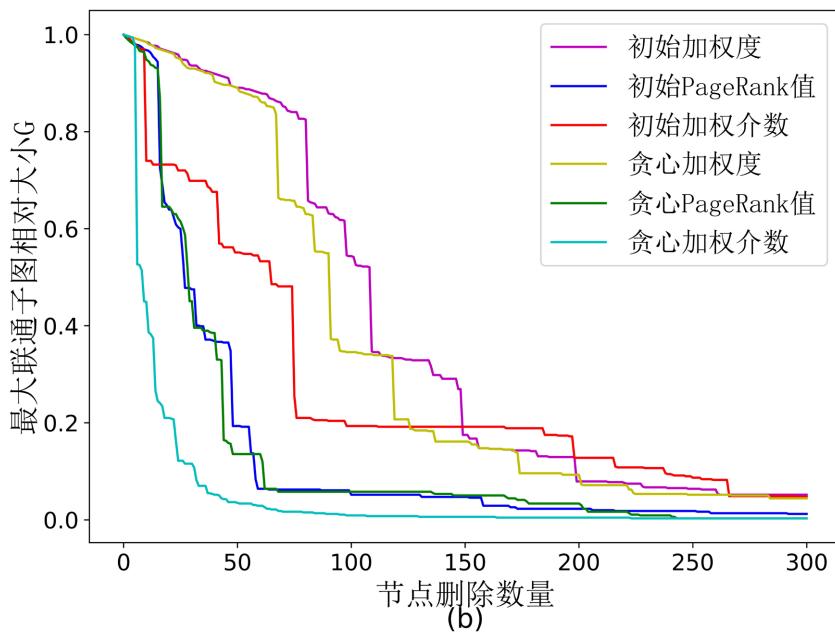


Figure 7. Changes in network performance under intentional attack node strategy

图 7. 蓄意攻击节点策略下网络性能变化情况

1) 对于基于加权度的攻击策略, 从整体上看, 贪心加权度的攻击策略要优于基于初始加权度的攻击策略。具体而言, 当攻击节点数量达到 100 个时, 基于贪心加权度的攻击策略使网络效率下降近 65%, 最大连通子图缩小近 67%, 此时网络结构已被充分破坏, 网络基本处于瘫痪状态。而基于初始加权度的攻击策略要想达到相同的效果, 需要攻击高速路网中近 125 个节点。

2) 对于基于贪心加权介数的攻击策略, 当攻击节点数量达到 30 个时, 网络效率下降至初始网络的 20%, 最大连通子图下降至初始网络的 10%。相比之下, 基于初始加权介数的攻击策略需要删除 200 多个节点才能达到同样的攻击效果。这种差异的原因在于贪心加权介数的攻击策略能更准确地衡量节点对网络连通性的影响, 因此在删除较少节点时即可达到显著的攻击效果。而基于初始加权介数的攻击策略忽略了网络结构的变化, 需要更多的节点删除才能达到相同的效果。

3) 对于基于节点 PageRank 值的攻击策略, 在基于初始 PageRank 值与贪心 PageRank 值的攻击策略下, 网络效率和最大连通子图的相对大小的变化曲线大致相同。这两种攻击策略所达到的效果仅次于基于贪心加权介数的攻击策略。

总之, 高速公路网络对蓄意攻击表现出一定程度的脆弱性。从攻击效果来看, 贪心加权介数的攻击策略表现出来的脆弱性效果最优, 初始加权介数的攻击策略表现出来的脆弱性效果最差。总体上而言, 贪心策略要优于基于初始攻击策略。

4.4. 基于边的高速公路网脆弱性分析

4.4.1. 单条边攻击下网络的脆弱性

基于删除法计算网络中每条边删除后网络效率与最大连通子图相对大小的变化见图 8。

可知, 任意一条边失效后, 网络效率都有所下降, 但对于最大连通子图而言, 网络中 80% 的边失效后, 网络的最大连通子图并没有发生变化。这表明了单条边攻击下, 网络的整体结构变化不大, 但是仍然会对网络的运行效率产生一定的影响。

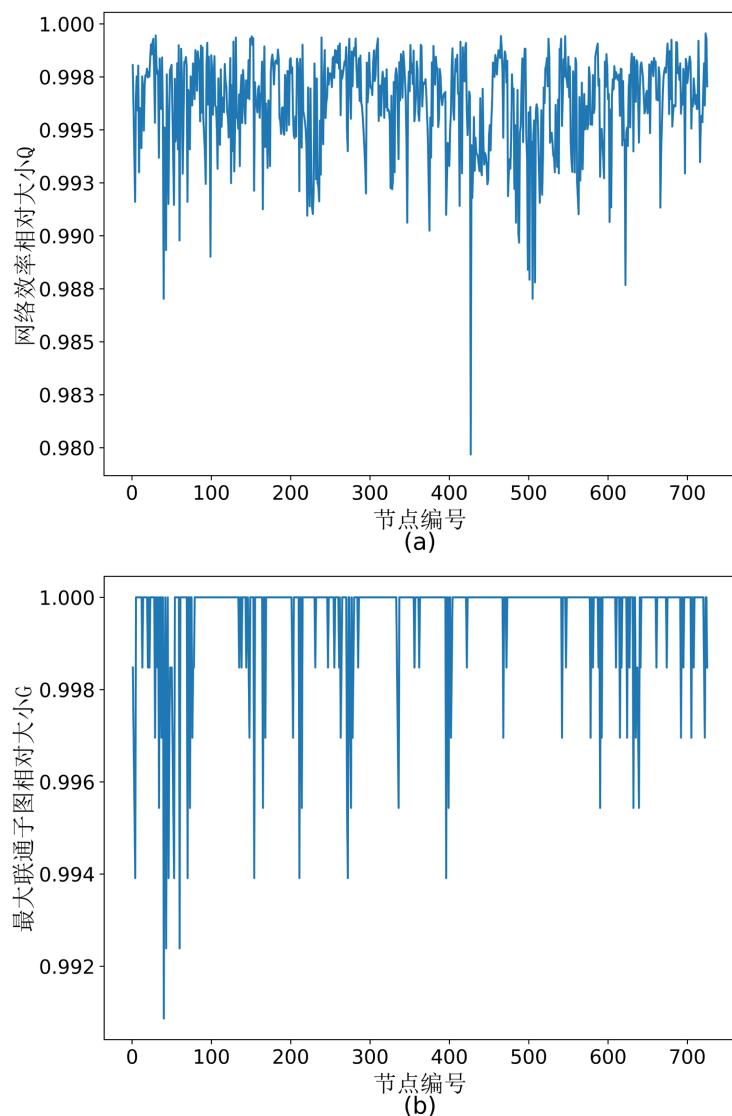


Figure 8. Changes in network performance under single edge attack strategy
图 8. 单条边攻击策略下网络性能变化情况

Table 3. Top 12 impact of single edge attack strategy on network performance

表 3. 单条边攻击策略下对网络性能影响前 12 位

序号	边	$\frac{(E - E_i)}{E}$	边	$\frac{(G - G_i)}{G}$
1	徂徕北枢纽 - 角峪收费站	0.02032	鄄城南收费站 - 菏泽北收费站	0.00913
2	德州收费站 - 德州南收费站	0.01297	济广枢纽 - 郓城收费站	0.00761
3	鄄城南收费站 - 菏泽北收费站	0.01297	大杨家立交 - 古现收费站	0.00761
4	威海收费站 - 文登北收费站	0.01232	槐荫枢纽 - 天桥收费站	0.00609
5	平原南收费站 - 盐城收费站	0.01220	成武枢纽 - 成武北收费站	0.00609
6	京台鲁冀 - 德州北枢纽	0.01207	王官屯枢纽 - 嘉祥收费站	0.00609
7	利津北收费站 - 盐窝收费站	0.01161	河头店收费站 - 沈海枢纽	0.00609

续表

8	日照立交 - 日照收费站	0.01099	沾化北收费站 - 沾化思源湖枢纽	0.00609
9	济广枢纽 - 郓城收费站	0.01067	莱山收费站 - 轶格庄收费站	0.00609
10	青云收费站 - 临沭西收费站	0.01033	无棣收费站 - 沙洼枢纽	0.00609
11	大杨家立交 - 古现收费站	0.01022	商河收费站 - 临邑收费站	0.00609
12	青云收费站 - 临沭收费站	0.00985	垦利北收费站 - 垦利收费站	0.00457

同样采用 $\frac{(E - E_i)}{E}$ 和 $\frac{(G - G_i)}{G}$ 分析单条边失效对高速路网性能的影响, 得到影响网络效率和网络结构前 12 的节点, 见表 3。可以看出, 单条边的删除最多能使网络效率下降 2.0%, 最大联通子图下降 0.9%。特别是鄄城南收费站 - 菏泽北收费站路段, 其失效后网络效率下降 1.3%, 最大连通子图下降 0.9%。

4.4.2. 随机攻击边下网络的脆弱性

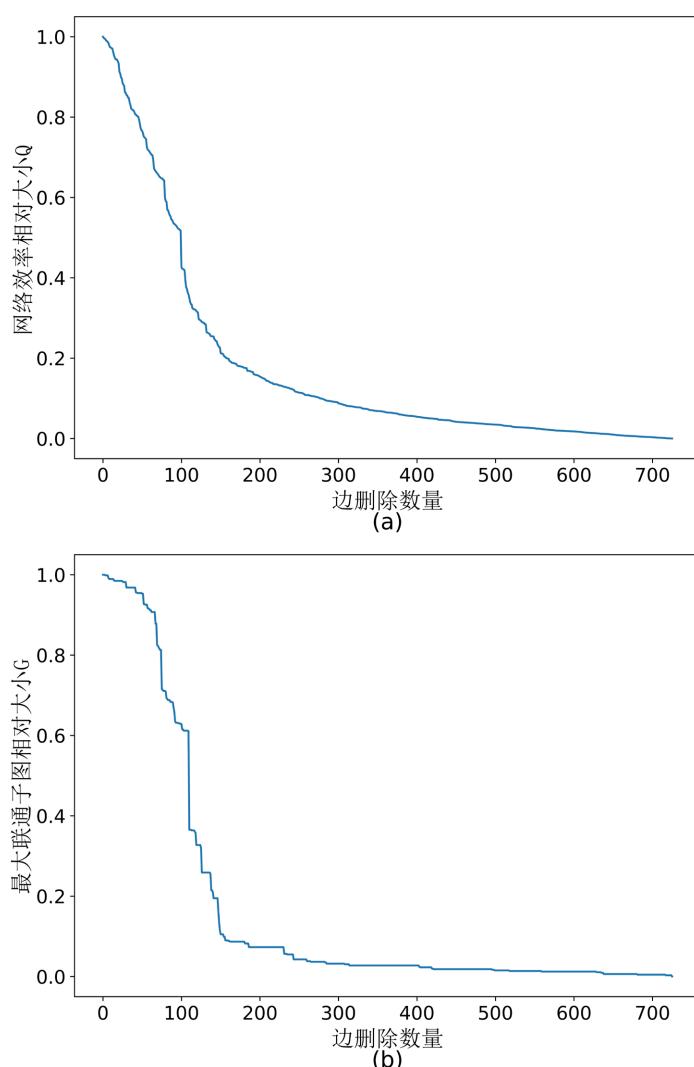


Figure 9. Changes in network performance under random attack edge strategy
图 9. 随机攻击边策略下网络性能变化情况

同样取多次实验的均值作为实验结果, 攻击的最终结果见图 9, 随着边删除数量的增加, 网络效率与最大联通子图会逐渐降低。相比基于点的攻击策略, 基于边的攻击策略下, 网络效率和最大连通子图变化较较缓, 反映出高速公路对于随机边攻击表现出一定的抗毁性。

4.4.3. 蓄意攻击边下网络的脆弱性

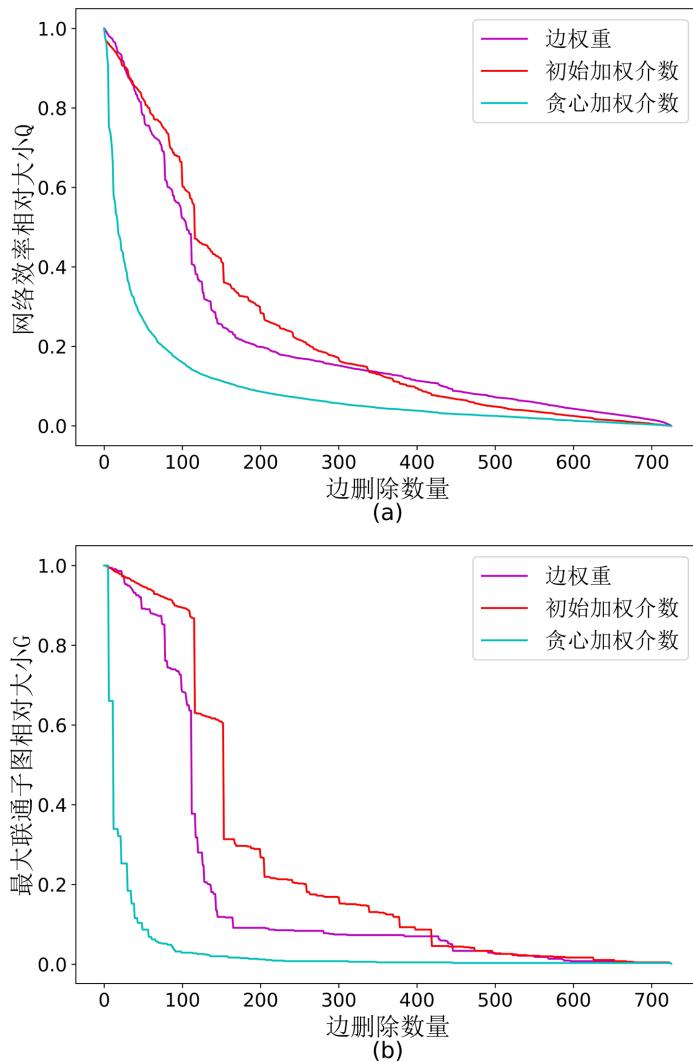


Figure 10. Changes in network performance under deliberate attack edge strategy
图 10. 蓄意攻击边策略下网络性能变化情况

在对于边的蓄意攻击策略中, 设计了 3 种攻击方式对高速路网脆弱性进行分析, 对于边的蓄意攻击下网络效率和最大连通子图的相对大小见图 10。不难看出, 以网络效率为测度时, 基于贪心边介数攻击策略下, 当攻击边数量达到 70 条时, 网络效率变为原始网络效率的 20%, 而基于边权重与初始加权介数的攻击策略想要达到这样的攻击效果, 则需要分别攻击 190、270 条边。以最大连通子图为测度时, 基于贪心边介数的攻击策略能够时网络的最大连通子图迅速下降, 而基于边权重与初始加权介数的攻击策略相比之下对网络的影响缓慢, 整体上基于边权重的攻击策略要优于基于初始加权介数的攻击策略, 使网络表现出更强的脆弱性。

总体来看，基于边的攻击策略中，贪心边介数攻击策略是对高速网络破坏最强的攻击方式。

5. 结语

本文在传统复杂网络构建的基础上，综合考虑了交通流量等因素对路网的影响，构建了行程时间加权的高速公路网络，建立加权网络下的相关节点重要度指标，并模拟了网络在不同攻击方式下脆弱性变化，主要结论如下：

- 1) 行程时间作为权重能更精确地评估高速公路网络的运行效率，相较于传统重要度指标，行程时间加权的指标能更有效地避免重复，精准评估各节点和路段的重要性。
- 2) 对节点的蓄意攻击下，通过比较基于加权度、加权介数和加权 PageRank 值的初始攻击策略和贪心攻击策略，发现贪心加权介数的攻击策略表现最好，主要体现在其对最大连通子图产生更大破坏的同时也能兼顾对网络效率的冲击，相反，初始加权介数的攻击策略表现最差。
- 3) 对于蓄意边攻击，基于贪心加权介数的策略显示出最强的破坏性，超过了基于边权重和初始加权介数的策略。

然而，本文的研究仍存在一定的局限性。例如，仅考虑了收费站点和互通式立交作为网络节点，而未将其他交通枢纽(如服务区、加油站等)纳入考虑。此外，交通流量数据可能因多种因素(如天气、节假日等)而有所波动，未来研究可以考虑更加丰富的数据来源和更精细的分析方法。

参考文献

- [1] Mukherjee, S. (2012) Statistical Analysis of the Road Network of India. *Pramana*, **79**, 483-491. <https://doi.org/10.1007/s12043-012-0336-z>
- [2] Zhang, X., Miller-Hooks, E. and Denny, K. (2015) Assessing the Role of Network Topology in Transportation Network Resilience. *Journal of Transport Geography*, **46**, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.05.006>
- [3] Dimitrov, S.D. and Ceder, A. (2016) A Method of Examining the Structure and Topological Properties of Public-Transport Networks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **451**, 373-387. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.01.060>
- [4] Lopez, F.A., Paez, A., Carrasco, J.A., et al. (2017) Vulnerability of Nodes under Controlled Network Topology and Flow Autocorrelation Conditions. *Journal of Transport Geography*, **59**, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.02.002>
- [5] 杨峰, 翟亮, 乔庆华, 等. 一种城市道路空间结构特性分析方法[J]. 测绘科学, 2019, 44(3): 127-134.
- [6] 王希良, 李季瑶, 廉梦珂, 等. 基于复杂网络模型的地铁系统脆弱性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(8): 47-50.
- [7] 张欣, 孙代源. 基于复杂网络的全球集装箱海运网络脆弱性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 1-7.
- [8] 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.
- [9] 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[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(5): 78-88.
- [10] 杜佳昕, 张丰, 杜震洪, 等. 基于加权流量介数中心性的路网脆弱性分析——以无锡市为例[J]. 浙江大学学报(理学版), 2020, 47(2): 223-230+243.
- [11] 李博, 李治政, 刘慧甜. 基于复杂网络的陕西省高速公路网络脆弱性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(8): 86-95+124.
- [12] 汪军, 夏永跃, 王运明, 李卫东. 基于重新计算介数的地铁-公交复合网络关键车站识别算法[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(7): 132-137.
- [13] 陈东光. 韧性理念在道路交通规划中的应用研究[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(2): 68-70.