

中文引用格式:姜正睿,郑晓军,陈旺,等. 基于复杂网络的国家高速公路拓扑特征与脆弱性分析[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(6): 120-127.

英文引用格式:JIANG Zhengrui, ZHENG Xiaojun, CHEN Wang, et al. Analysis of topological characteristics and vulnerability of Chinese national highways based on complex network [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 120-127.

基于复杂网络的国家高速公路拓扑特征 与脆弱性分析*

姜正睿¹, 郑晓军^{**1}副教授, 陈旺², 童小英¹

(1 大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116028; 2 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

中图分类号: X951

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.0575

资助项目: 辽宁省交通科技项目(202149)。

【摘要】 为探究最新国家规划高速公路网络(CAH-NET)性能, 提出P空间(Space-P)下国家高速公路建模方法、节点综合重要度评价指标和基于综合重要度节点失效的网络脆弱性分析方法; 依据2022年发布《国家公路网规划》中的数据, 建立CAH-NET模型, 并分析其静态拓扑特征和多种攻击策略下的网络脆弱性。结果表明: 现阶段, CAH-NET具有典型的小世界、无标度特性, 网络通达性良好; 节点度值、中心性值、综合重要度等排名靠前的大多为东部沿海地区城市或中部枢纽城市; 随机攻击策略对网络的脆弱性影响较小, 完全摧毁CAH-NET, 需要攻击近90%的节点; 蓄意攻击中综合重要度攻击策略使网络连通性下降最为迅速, 当遭受中介中心性攻击策略的节点占比达到30%时, 网络完全崩溃。

【关键词】 复杂网络; 国家高速公路; 拓扑特征; 脆弱性; 小世界; 无标度

Analysis of topological characteristics and vulnerability of Chinese national highways based on complex network

JIANG Zhengrui¹, ZHENG Xiaojun¹, CHEN Wang², TONG Xiaoying¹

(1 School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning 116028, China;

2 China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to investigate the performance of the latest Chinese Planned Controlled Access Highway Network (CAH-NET), A modeling method in Space-P was proposed, a composite importance index for nodes was introduced, and a vulnerability analysis approach based on node failures guided by this index was presented in this study. Based on the data from the 2022 National Highway Network Planning, the CAH-NET model was constructed, and its static topological characteristics as well as network vulnerability under various attack strategies were analyzed. Results show that the current CAH-NET exhibits typical small-world and scale-free properties, with good overall accessibility. The top rankings for node degree, centrality, and composite importance are mostly occupied by cities in the eastern coastal

* 文章编号: 1003-3033(2025)06-0120-08; 收稿日期: 2025-07-16; 修稿日期: 2025-04-27

** 通信作者: 郑晓军(1982—), 男, 山西石楼人, 博士, 副教授, 主要从事智能计算与决策、工业车辆规划调度、复杂网络等方面的研究。
E-mail: zhengxj@djtu.edu.cn.

areas or key central hub cities. The vulnerability of network is slightly affected by random attacks. About 90% of nodes t need to be attacked to completely destroy the CAH-NET. Among intentional attack strategies, the connectivity of network declines most quickly. When the proportion of nodes attacked through the betweenness centrality attack strategy reaches about 30%, the network totally collapses.

Keywords: complex networks; Chinese controlled-access highway network; topological characteristics; vulnerability; small-world; scale-free

0 引言

当前,高速公路网络已逐步成为支撑我国现代化建设的核心骨架和关键基础设施。2022 年发布的《国家公路网规划》^[1]明确了我国高速公路的总体方案与路线布局,为推动路网科学建设与高效运营提供了顶层设计。在此背景下,深入研究我国高速公路网络的结构特性,对于优化其布局、提升运行效率与抗干扰能力,具有重要的现实意义。

在 WATTS 等^[2]提出小世界网络理论后,不少学者运用复杂网络理论分析交通网络结构特征,包括航空^[3-4]、铁路^[5-6]、城市公交^[7]等领域。在高速公路网络的分析中,张欣宇^[8]、郑义彬^[9]、周涛^[10]等分别基于广西、湖北、宁夏的高速公路,建立了相应的网络拓扑模型,分析静态拓扑特征以及小世界和非标度特性。也有部分学者通过关注网络鲁棒性,系统研究了网络整体特征和动态行为。DAI Hongna 等^[11]运用复杂网络理论评估了山东省高速公路网络的结构特性与连接可靠性,并讨论了恶意攻击对网络稳定性的影响。郑乐等^[12]在地铁-公交加权复合网络中,采用多维度网络分析方法识别关键站点,并研究网络鲁棒性。SUGISHITA 等^[13]研究了 1 181 个节点和 4 601 个连边组成的交通网络的脆弱性。综上所述,复杂网络理论虽已广泛用于高速公路网络分析,但现有研究多局限于特定省市或区域,缺少对国家高速公路网络整体的系统性研究;同时,大多关注静态拓扑或脆弱性分析,较少兼顾二者。

鉴于此,笔者以《国家公路网规划》中发布的国家高速公路网为研究对象,构建国家规划高速公路网络 (Chinese Planned Controlled Access Highway Network, CAH-NET) 的拓扑模型。在复杂网络理论框架下,系统分析其静态拓扑特征;并且设计节点失效、随机攻击与蓄意攻击等策略,评估网络在不同扰动下的脆弱性表现。同时,从节点的地理空间属性出发,探讨关键节点在网络结构与功能中的作用。旨在揭示国家高速公路网络的拓扑特征与抗风险能力,为后续路网优化与管理提供理论依据与数据支撑。

1 国家高速公路复杂网络构建

文中选取国家高速公路网路线数据作为实例分析对象。数据来源于 2022 年国家发布的《国家公路网规划》的附件 1^[1]。在构建高速公路网络时,主要有 2 种节点选择策略^[14]:以收费站为节点或以城市为节点。《国家公路网规划》中明确提出的国家高速公路网以城市为主要控制点的要求,文中采用城市作为节点,构建国家规划高速公路复杂网络。

1.1 CAH-NET 的建模方法

在构建 CAH-NET 模型时,综合考虑 L 空间 (Space-L)、R 空间 (Space-R)、P 空间 (Space-P) 3 种拓扑映射方法,如图 1 所示。R 空间方法将整条高速公路简化为单一节点,若两条高速公路经过同一城市,则在节点之间建立连边,无法细致表达高速公路网络细节(图 1a)。L 空间方法仅在线路上相邻节点间建立连边,虽能反映实际空间结构,但在展现区域间综合连通性方面存在局限(图 1b)。相比之下,P 空间方法将同一高速公路上的城市视为完全连通,保留了区域间连通性和城市间关联关系(图 1c)。因此,文中选用 P 空间方法构建 CAH-NET 模型。

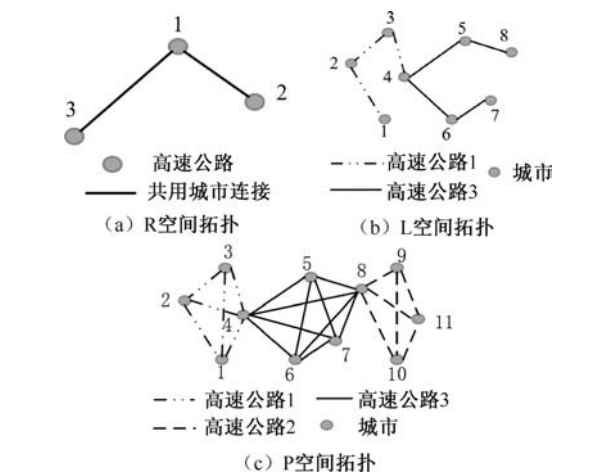


图 1 3 种空间模型的拓扑对比

Fig. 1 Topological comparison of three spatial models

1.2 CAH-NET 模型拓扑结构搭建

文中采用 P 空间建模方法构建我国高速公路拓扑结构,以城市为节点,城市间存在直接高速公路连接时建立边,将我国规划高速公路网络抽象为无向无权图 $G=(V,E)$,其中, V 为城市节点, E 为高速公路连通路。使用 Gephi 软件可视化,最终构建包含 902 个节点和 6 718 条边的国家规划高速公路复杂网络模型,如图 2 所示。



图 2 我国规划高速公路拓扑结构

Fig.2 Schematic of planned controlled access highway topology in China

2 CAH-NET 的拓扑特征分析

2.1 CAH-NET 的小世界特性

小世界网络是由 WATTS 等^[2]于 1998 年提出。其核心特征是即便在规模庞大的网络中,节点数量众多,但任何 2 个节点之间也能通过较短路径相互到达,并表现出较高的局部聚集性。

小世界网络的识别通常依据小世界指数。当网络的聚集系数 C 远高于同规模随机网络的聚集系数 C_r ,即归一化聚集系数 γ 远大于 1,且平均路径长度 L 与随机网络的长度 L_r 接近,即 λ 约等于 1 时,网络可被视为具有小世界特性。计算公式如下:

$$\gamma = \frac{C}{C_r} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{L}{L_r} \quad (2)$$

计算结果显示,约 60% 的节点聚集系数接近 1,仅 4% 低于 0.1,平均聚集系数达 0.811,显著高于同规模随机网络的 0.017,说明城市间连接紧密、通达性强。网络平均路径长度为 3.285,与随机网络的 2.8 接近,表明多数城市可通过 2~4 段高速公路实

现互通,具有良好直达性。据此,归一化聚集系数约为 47.71(远大于 1),归一化路径长度约为 1.3(接近 1),表明 CAH-NET 具备典型的小世界特性。

2.2 CAH-NET 的节点度分布与无标度特性

复杂网络中的节点度分布反映了网络拓扑特征及效率,第 i 个节点的度值表示其连接数量。CAH-NET 的节点度值体现了每个城市通过高速公路与其他区域的直接连通性。网络平均度 $\langle k \rangle$ 提供了整个网络连通性的宏观视角。

国家高速路网包含 902 个市或区县,其度值分布如图 3 所示,平均度为 14.896,即每个节点约与 15 个节点相连,占全部城市的 32%,表明 CAH-NET 连通性较好。节点度值从 1 到 117 不等,异质性较大^[15],其中度值较高的城市集中于东部及沿海地区,如广州、北京、深圳、上海、武汉、西安、南京等,是网络中的重要枢纽节点。

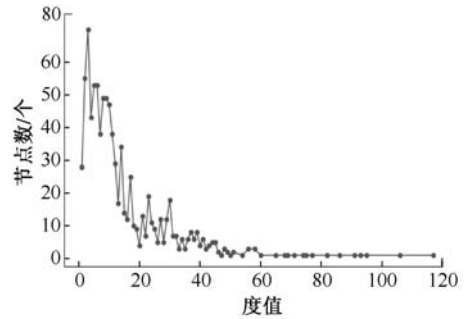


图 3 网络度值分布

Fig.3 Degree distribution of network

进一步分析 CAH-NET 的无标度特性。网络的度分 $P(k)$ 呈现出幂律分布的特点,并且在双对数坐标系中, $\lg[P(k)]$ 与 $\lg(k)$ 之间呈线性关系,如图 4 所示。线性拟合方程式为:

$$\lg[P(k_i)] = -1.24\lg(k) - 0.40 \quad (3)$$

由图 4 可知:在双对数坐标系下,横轴 $x=\lg(k)$ 表示节点度的对数,纵轴 $y=\lg(P(k))$ 表示度分布的对数,数据点近似落在拟合直线 $y=-1.24x-0.40$ 上,这表明度分布 $P(k)$ 遵循 $P(k) \propto k^{-1.24}$ 的幂律分布^[16],属于无标度网络。即个别城市连边很多,大多数城市连边都较少,网络结构呈现出明显的异质性。

3 CAH-NET 的中心性及综合重要度分析

利用复杂网络分析 CAH-NET 的中心性,有助于评估节点的重要性及其在交通系统中的作用。度

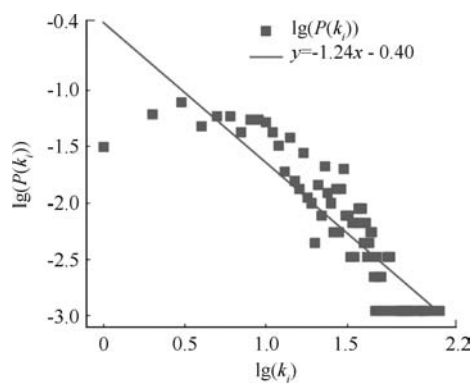


图 4 双对数坐标系下的度分布曲线

Fig. 4 Degree distribution curve in double logarithmic coordinate system

中心性突出交通枢纽的直接联系数量;中介中心性识别关键路段在维持网络连通性中的桥梁作用;接近中心性反映节点到其他节点的平均距离,体现节点的可达性。

3.1 CAH-NET 的度中心性

度中心性用于衡量节点的重要性。CAH-NET 的度中心性可以被定义为 1 个节点连接其他节点的数量。计算公式为:

$$D_c(V_i) = \frac{\deg(v)}{n - 1} \tag{4}$$

式中: $D_c(V_i)$ 为节点 V_i 的度中心性值; $\deg(v)$ 为节点 v 的度数,即直接与 v 相连边的数量; n 为网络中节点的总数; $n-1$ 为除自身节点外,网络中可能的最大连接数。

经过计算,度中心性在网络中分布是极其不均匀的,见表 1,由表 1 可知:度中心性大小与其所在城市的地理位置、经济水平等因素息息相关,大多以一线城市、沿海港口、内陆枢纽城市为主。

表 1 CAH-NET 节点度中心性较大的 20 个城市

Table 1 Top 20 cities with higher degree centrality in CAH-NET

节点	中心性	节点	中心性
广州	0.130	重庆	0.079
北京	0.118	连云港	0.077
深圳	0.105	贵阳	0.075
武汉	0.103	兰州	0.072
上海	0.101	杭州	0.067
西安	0.095	福州	0.064
成都	0.091	长沙	0.064
银川	0.085	承德	0.064
南京	0.082	济南	0.062
昆明	0.082	洛阳	0.062

3.2 CAH-NET 的介数中心性

中介中心性是用于识别网络中扮演“桥梁”作用的节点或路径的重要指标,其计算公式为:

$$B_c(V_i) = \sum_{j \neq i \neq z} \frac{\sigma_{jz}(i)}{\sigma_{jz}} \tag{5}$$

式中: $B_c(V_i)$ 为节点 V_i 的中介中心性值; σ_{jz} 为从第 j 个节点到第 z 个节点的最短路径条数; $\sigma_{jz}(i)$ 为第 j 个节点到第 z 个节点的所有最短路径中,经过第 i 个节点的路径数量。

中介中心性排名前 20 的节点见表 2,可以看出,大多数节点在 CAH-NET 中的重要性相对较低,较高的节点主要集中在我国的中东部和沿海地区,这些节点的共同特点是它们对区域内和区域间的交通流动具有促进作用。

表 2 CAH-NET 节点中介中心性较大的 20 个城市

Table 2 Top 20 cities with higher betweenness centrality in CAH-NET

节点	中心性	节点	中心性
北京	0.094	长春	0.031
成都	0.057	兰州	0.028
广州	0.052	昆明	0.027
武汉	0.042	榆林	0.026
西安	0.041	上海	0.026
深圳	0.038	张家口	0.025
银川	0.037	洛阳	0.024
西宁	0.036	杭州	0.021
南京	0.032	沈阳	0.021
大理	0.031	重庆	0.020

3.3 CAH-NET 的接近中心性

在高速公路网络中,接近中心性能够反映各节点对整体网络可达性的贡献程度,计算公式如下:

$$Cl_c(V_i) = \frac{n - 1}{\sum_{j=1}^n d(i,j)} \tag{6}$$

式中: $Cl_c(V_i)$ 为节点 V_i 的接近中心性值; $d(i,j)$ 为第 i 个节点到第 j 个节点的最短路径长度。

计算结果表明:CAH-NET 的接近中心性值大多分布在 0.3~0.4 之间,整体连通性和效率较好。低接近中心性节点通常位于小城市或边境口岸地区,与国家网络其他部分的连接较弱,效率较差。接近中心性排名前 10 和后 10 的节点见表 3。因此,优化低中心性节点的基础建设及经济投资,对于增强其在国家高速路网中的连通性和战略性至关重要。

表 3 CAH-NET 排名前 10 和后 10 的城市

Table 3 Top 10 and bottom 10 cities

节点	中心性	节点	中心性
北京	0.437	抚松	0.001
广州	0.414	长白	0.001
上海	0.409	白山	0.001
西安	0.408	临江	0.001
深圳	0.407	松江	0.001
武汉	0.405	长白山	0.001
连云港	0.400	阿图什	0.001
银川	0.399	伊尔克什坦	0.001
南京	0.394	曲水	0.001
昆明	0.393	乃东	0.001

3.4 CAH-NET 的节点综合重要度分析

文中采用度数、介数、邻接节点平均度和网页排名 (PageRank) 4 类指标,多维度分析节点重要性。度数反映节点的局部连接密度;介数从全局角度揭示节点作为网络桥梁的频率;邻接节点平均度表示节点所在网络区域的整体活跃度;PageRank 则基于网络宏观结构,评估节点的相对重要性。分别对节点重要性进行了不同权重下的排序,包括综合加权平均排序、度数权重最高时的排序、PageRank 权重最高时的排序以及介数权重最高时的排序。4 种不同权重下前 15 个节点的对比雷达图如图 5—图 8 所示。

由图 5—图 8 可知:尽管各参数的权重有所不同,但排名前 20 的节点(城市)之间的差异并不显著。同时,每个节点的各个指标分布并不均匀,没有 1 个节点在所有指标上均占优势,这表明即使排名靠前的节点也各有所长。综合重要度较高的节点主要为沿海城市和中部地区的枢纽城市,这些节点在 CAH-NET 中发挥着重要作用。因此,采用综合重要性的方法来评估节点的重要性,针对这些关键节点的维护和优化策略,对于提升整个网络的稳定性以及应对突发事件的能力至关重要。

4 CAH-NET 的脆弱性分析

CAH-NET 的脆弱性源于多种因素,包括人为错误、自然灾害。人为错误如超速、超载或危险品泄漏,可能引发事故,危及安全并中断交通流;自然灾害如泥石流、山体滑坡和暴雨,可能破坏基础设施,如道路断裂或桥梁坍塌,进而阻断交通。因此,分析高速公路网络的脆弱性,识别关键弱点、评估各类风险因素的影响,并制定应对策略以降低潜在风险,显得尤为重要。

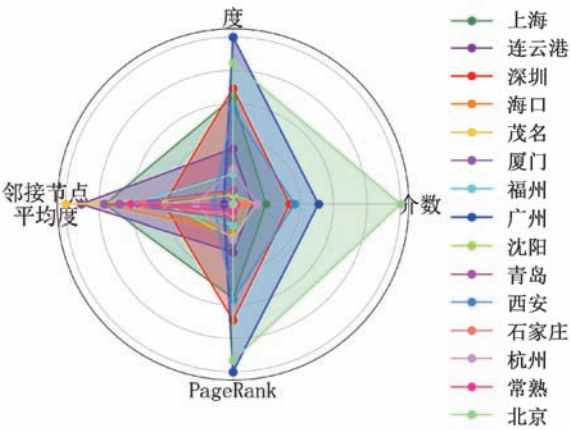


图 5 平均权重排序雷达图

Fig. 5 Radar chart of average weight ranking

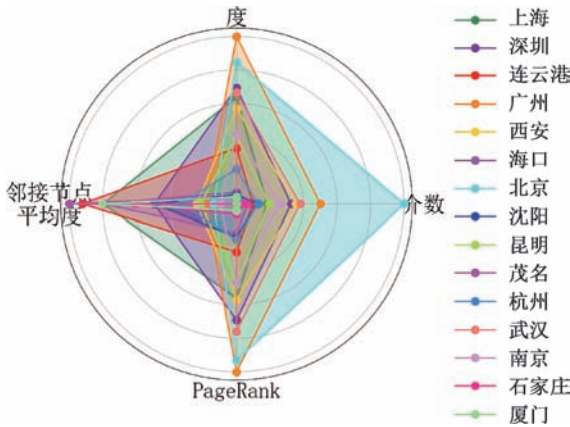


图 6 介数权重最大时排序雷达图

Fig. 6 Rankings with maximized betweenness weight

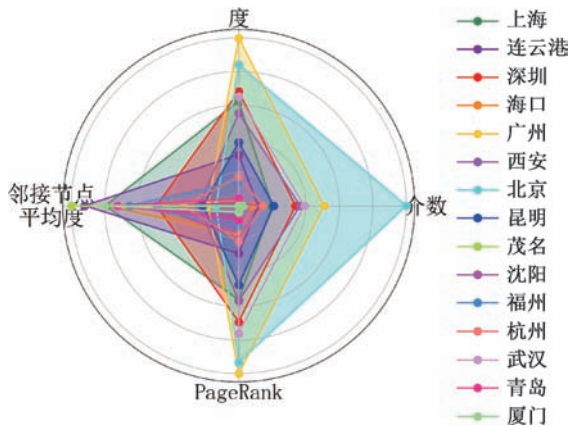


图 7 网页排名权重最大时排序雷达图

Fig. 7 Rankings with maximized PageRank weight

4.1 CAH-NET 的脆弱性衡量指标

1) 网络运行效率。采纳网络效率 $E(g)$ 作为量化指标。网络效率是通过网络中所有节点对之间的平均倒数最短路径长度来衡量的,可表示为:

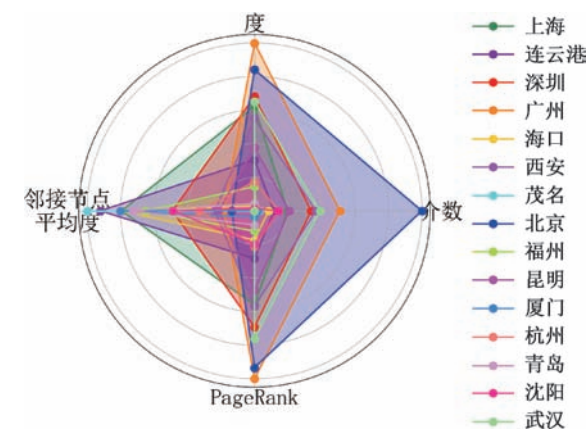


图 8 度数权重最大时排序雷达图

Fig. 8 Radar chart of rankings with maximized degree weight

$$E(g) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d(i,j)} \tag{7}$$

在分析 CAH-NET 的脆弱性时,利用网络效率来定量评估网络对于随机攻击或者蓄意攻击的敏感度,识别网络中那些对整体效率影响最大的节点。

2) 最大连通子图。网络中能够通过路径相互到达的最大节点集合,其中的任意节点对均通过路径相互连通,且该集合在网络结构受到部分节点或连接移除的情况下依然保持连通性。称为最大连通子图 G ,可表示为:

$$G = \frac{n'}{n} \tag{8}$$

式中 n' 为最大连通子图中的节点数。

G 反映了 CAH-NET 在关键节点或路段失效后,能够保持的最大连通性规模。最大连通子图越大,路网越稳定,对攻击和干扰的抵抗能力越强;相反,则路网的脆弱性增加。

4.2 CAH-NET 的单个节点失效分析

单个节点失效时,网络效率的下降反映该节点的重要性,若效率显著降低,则表明该节点是潜在的脆弱点,失效可能导致交通拥堵和延误。本节通过删除各节点,分析其对网络效率的影响,并计算失效时的效率值。

结果显示,当删除抚松、松江、白山、阿图什、曲水、长白(口岸)、临江(口岸)等节点时,CAH-NET 的全局效率最高,为 0.300;而删除大理、扬州、长春、北京、成都节点时,网络全局效率较低,分别为 0.292、0.294、0.295、0.296 和 0.297。

抚松、松江、白山、阿图什、曲水、长白(口岸)、临江(口岸)等城市地理位置偏远,主要位于边疆地

区,且非关键交通枢纽,节点度值均为 1,对网络全局效率的贡献较小;相比而言,大理、扬州、长春、北京、成都等城市是重要的区域交通枢纽,承担着重要的经济连接和跨区域联通功能,一旦失效,可能会影响全国范围内的交通连通性和效率。因此,这些节点的保护与优化策略是高速公路规划和管理的重点。

采用 $(E-E_i)/E$ 和 $(G-G_i)/G$ 分析关键节点失效对 CAH-NET 性能的影响,得到影响网络效率和网络结构前 10 的节点,见表 4,结果显示,大理、扬州、溧阳等节点失效时,高速路网效率下降超过 1.5%,最大连通子图减少超过 1%。从宏观角度看,单个节点失效导致的整体性能衰减较小,CAH-NET 具备较高的交通流动性和系统韧性,即使关键节点失效,也能有效分担和重新分配交通流,保持系统稳定。

表 4 关键节点失效对网络性能的影响
Table 4 Influence of key node failure on network performance

节点	$(E-E_i):E/\%$	节点	$(G-G_i):G/\%$
大理	2.18	大理	1.77
扬州	1.70	扬州	1.07
溧阳	1.63	溧阳	1.05
海口	1.33	海口	0.71
松原	1.24	松原	0.71
长春	1.20	渭南	0.71
北京	1.09	长春	0.60
成都	0.89	伊通	0.60
渭南	0.88	鸡西	0.60
昆明	0.87	绍兴	0.60

4.3 随意攻击下的脆弱性分析

CAH-NET 的随机攻击试验是网络脆弱性分析的重要组成部分。为了确保试验结果的科学性,采取重复试验的策略,开展 10 次随机攻击试验,取其平均值作为结果,如图 9、图 10 所示。

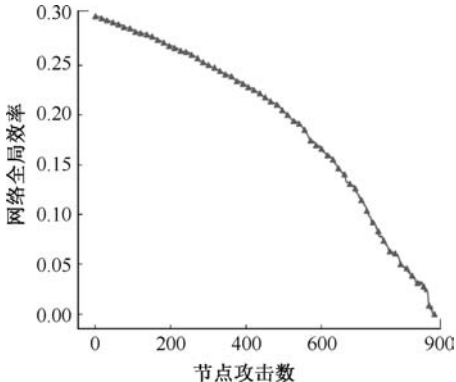


图 9 随机攻击下网络的效率

Fig. 9 Network efficiency under random attacks

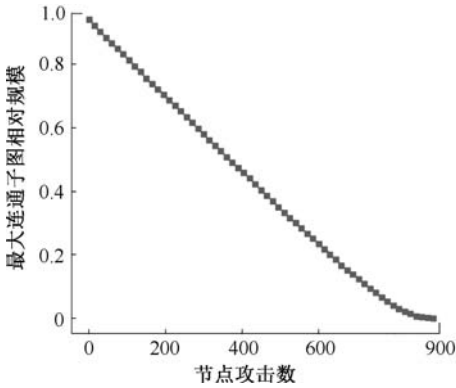


图 10 随机攻击下网络的最大连通子图

Fig. 10 Largest connected subgraph under random attacks

由图 9 可知:随着 CAH-NET 中节点随机移除,网络全局效率逐渐下降。这表明随着节点失效,网络的整体连通性不断减弱。由图 10 可知:CAH-NET 最大连通子图相对规模的变化。最初,最大连通子图占整个网络的较大比例,但随着节点的随机移除,其相对规模逐渐降低,这反映了网络连通性的逐渐减弱。

2 项指标均未出现急剧下降或突变,只有当移除节点数量超过 800 个时,曲线才趋于平缓,表明此时 CAH-NET 结构已被大幅破坏。这说明即使节点随机移除,网络不会迅速分裂成多个孤立子网,其他路径仍能维持整体传输能力。同时,瓦解 CAH-NET 需要攻击近 90% 的节点,表明该网络具有较强的抗毁性和鲁棒性。

4.4 蓄意攻击下的脆弱性分析

蓄意攻击指的是按重要性顺序逐一删除网络中的关键节点。每移除 1 个节点,与之相连的边也随之移除。随后,重新计算最大连通子图,直到网络的所有节点都被移除。分别以中介中心性、节点度数、节点效率和节点综合重要度 4 种不同评价指标分析 CAH-NET 的脆弱性,蓄意攻击下的最大连通子图相对规模如图 11 所示,由图 11 可知:蓄意攻击下 CAH-NET 最大连通子图的变化,表明网络在面对不同节点移除策略时展现出显著的韧性差异。在基于节点度数的攻击策略中,优先移除度数最大的节点。在高速公路网中,这些节点通常是关键枢纽城市。分析结果显示,当移除约 10% 的节点时,最大连通子图的连通性急剧下降至 20% 以下,表明这些关键节点的失效对网络连通性有着极大的影响。在基于综合重要度的攻击策略中,节点按照多项重要性指标进行排序并依次移除,这些节点通常是具有多重重

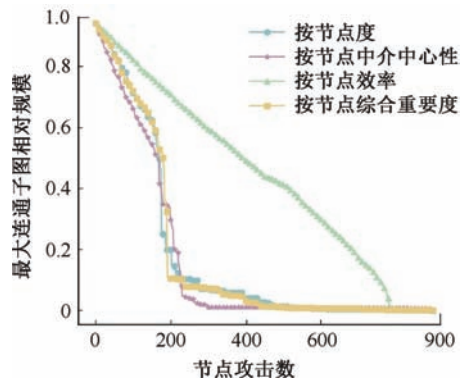


图 11 4 种蓄意攻击的最大连通子图变化对比

Fig. 11 Comparison of the largest connected subgraph changes under four types of attacks

要属性的枢纽城市。此策略下,最大连通子图的规模下降速度较度数攻击更为迅速。基于中介中心性的攻击策略则优先移除那些在网络中起“桥梁”作用的节点,这些节点连接着网络中不同区域,是交通流和信息流的关键中介。移除这些节点后,最大连通子图的破坏最为严重,当移除约 30% 的节点时,连通子图完全崩溃。现实中,这些节点通常是区域性枢纽,尽管其度数可能不及全国性枢纽,但对区域性交通流畅至关重要。一旦这些节点因自然灾害等因素失效,将严重破坏区域连通性,影响多个城市和地区的交通流动。在基于效率的攻击策略中,节点按其在维持网络效率中的重要性排序。移除这些节点对最大连通子图的影响表现为相对缓慢的线性下降,表明在该策略下,CAH-NET 具有较强的局部冗余性和一定的抵抗能力。

综上所述,对 CAH-NET 拓扑特征的分析表明:在最大连通子图相对规模下降速率的排序中,基于节点度数和综合重要度的攻击对网络破坏最为迅速,其次是基于中介中心性的攻击,最后是基于效率的攻击。而在最大连通子图最早崩溃的排序中,基于中介中心性的攻击最为严重,其次是综合重要度、度数和效率攻击策略。因此,高度重要的节点,如综合得分和中介中心性较高的城市枢纽,其失效对整个交通网络的影响最大。为提升网络韧性与可靠性,交通规划和维护应优先保障这些关键节点的通畅和稳定。

5 结 论

1) CAH-NET 的拓扑特征表现具有明显的小世界与无标度特性,平均路径长度较短(3.285)、聚集系数较大(0.811),表现出较高的连接效率和良好

的通达性。

2) 北京、上海、深圳、广州、西安、武汉等节点对CAH-NET的高效通行起着重要作用。排名靠前的节点基本上为交通密度大的新一线城市,且多分布在我国中东部及沿海地区。

3) 随机攻击模式下,CAH-NET呈现出较强的抗

毁性;然而在对重要节点的蓄意攻击中,基于中介中心性和综合重要度的攻击对网络脆弱性影响更显著。

4) 未来需考虑省份及城市内部的关系,以及通行方向和对应的车流量、路段通行能力等;在网络脆弱性分析中,需考虑节点或者线路失效的不同程度产生的影响。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.《国家公路网规划》[EB/OL]. (2022-07-12). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202207/t20220712_1330358.html.
- [2] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [3] 俞桂杰, 彭语冰, 褚衍昌. 复杂网络理论及其在航空网络中的应用[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 3(1): 79-84.
- [4] YU Guijie, PENG Yubing, CHU Yanchang. Complex networks theory and its application in air networks[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2006, 3(1): 79-84.
- [5] 徐开俊, 肖成坤, 杨泳, 等. 基于复杂网络理论的中国城市航空网络有向加权分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 21(36): 15 669-15 673.
- [6] XU Kaijun, XIAO Chengkun, YANG Yong, et al. Directed weighted analysis of Chinese urban aviation network based on complex network theory[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(36): 15 669-15 673.
- [7] 马亮, 胡宸瀚, 陈光伟. 铁路快速货运复杂网络拓扑特征与鲁棒性分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 178-185.
- [8] MA Liang, HU Chenhan, CHEN Guangwei. Analysis on topological characteristics and robustness of complex network of railway express freight transportation[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6): 178-185.
- [9] 胡宸瀚, 马亮, 王健. 铁路运输复杂网络的拓扑特征与动力学研究综述[J]. 铁路计算机应用, 2021, 30(2): 10-17.
- [10] HU Chenhan, MA Liang, WANG Jian. Review of research on topological features and dynamics of complex railway transportation network[J]. Railway Computer Application, 2021, 30(2): 10-17.
- [11] 袁乐平, 谷泽坤, 李东琪. 复杂网络城市空中交通生态下eVTOL运行风险演化分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 192-199.
- [12] YUAN Leping, GU Zekun, LI Dongqi. Risk evolution analysis of eVTOL operation in UAM ecosystem based on complex networks[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 192-199.
- [13] 张欣宇, 刘邱琪, 张晶晶, 等. 基于复杂网络的高速公路网络空间特性分析[J]. 公路, 2023, 68(6): 316-323.
- [14] 郑义彬, 蔡航鹏, 赖伟伟, 等. 基于复杂网络的湖北省高速公路网特性分析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2021, 40(5): 31-37.
- [15] ZHENG Yibin, CAI Hangpeng, LAI Weiwei, et al. Characteristics analysis of Hubei expressway network based on complex network[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2021, 40(5): 31-37.
- [16] 周涛, 徐延军. 基于复杂网络理论的宁夏高速公路路网特征[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2022, 45(2): 50-57.
- [17] ZHOU Tao, XU Yanjun. Research on the characteristics of Ningxia expressway network with complex network theory[J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2022, 45(2): 50-57.
- [18] DAI Hongna, YAO Enjian, LU Nan, et al. Freeway network connective reliability analysis based complex network approach[J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 372-381.
- [19] 郑乐, 高良鹏, 陈学武, 等. 地铁-公交加权复合网络关键站点识别及鲁棒性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(5): 120-129.
- [20] ZHENG Yue, GAO Liangpeng, CHEN Xuewu, et al. Critical stations identification and robustness analysis of weighted Metro-bus composite network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(5): 120-129.
- [21] SUGISHITA K, ASAKURA Y. Citation network analysis of vulnerability studies in the fields of transportation and complex networks[J]. Transportation Research Procedia, 2020, 47: 369-376.
- [22] 刘浩广, 王海威, 曾慧平, 等. 高速公路网络演化模型的复杂性及连通性[J]. 山东大学学报:工学版, 2016, 46(4): 47-53.
- [23] LIU Haoguang, WANG Haiwei, ZENG Huiping, et al. The complicated characteristics and connecting performance of the highway network evolution model[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2016, 46(4): 47-53.
- [24] LIAO Fuxuan, HAYASHI Y. Emergence of robust and efficient networks in a family of attachment models[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2022, 599: DOI: 10.1016/j.physa.2022.127427.
- [25] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.

作者简介: 姜正睿 (1998—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 研究方向为AGV车辆路径规划、复杂网络。E-mail: jiangzr0520@163.com。

