

成渝区域高速公路网络节点抗毁性研究

杨隽豪, 黎青松, 罗凌珊

(西华大学 汽车与交通学院, 四川 成都 610039)

摘要: 基于复杂网络理论构建成渝区域高速公路网络,对高速公路网络静态拓扑指标进行定量分析;利用级联失效理论,分别对网络中节点进行随机攻击和蓄意攻击,研究面对不同攻击情况时成渝区域高速公路网络的抗毁性。结果表明,适当增加节点容忍系数可提升网络抗毁性;成渝区域高速公路网络在随机攻击下抗毁性较高,在蓄意攻击下表现出脆弱性。

关键词: 公路交通;高速公路;复杂网络;拓扑结构;抗毁性

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)01-0021-05

分析高速公路网络的静态拓扑特征,并仿真分析级联失效不同攻击模式下攻击节点对网络造成的危害,有助于评估区域高速公路网络的抗毁性。目前国内学者主要集中于高速公路网络的静态拓扑指标研究,对高速公路网络抗毁性的研究很少。崔杨等将复杂网络理论应用于西部公路网中,以公路可靠性为研究对象,定量分析西部公路网拓扑特征,并对西部地区公路网的可靠性进行了分析。金雷选取公路网抗毁性相关评价指标,对比分析了多种攻击策略对公路网的毁坏程度。邓亚娟等应用对偶拓扑方法构建公路复杂网络,从连通性和可靠性方面分析了线路在公路网中的重要性。曹祥对比研究了随机攻击和选择攻击下区域公路网络可靠性的变化,分析了选择攻击下不同优先攻击策略对网络可靠性的影响。王雪研究了煤炭运输公路网静态特征,用抗毁性测度参数寻找到网络中的关键节点和关键边。在复杂网络理论的基础上,王家琦基于 GIS 技术构建注重实际地理意义的中国城际公路网加权网络模型,指出中国城际公路网整体呈现小世界网络特征,并从节点效率、局域效率和全局效率方面分析了中国城际公路网效率的空间异质性。代洪娜等综合考量高速公路网特性构建考虑路网流量分布的高速公路网络特性模型,采用基尼系数评估了高速公路网络流量分布的不均衡性。翁小雄等构建融入道路基础设施网络与出行网络的高速公路多层复杂网络模型,提出 PageRank-TOPSIS 算法对多层复杂网络的高速公路节点重要性进行了分析。该文以成渝城市群作为研究对象,构建成渝区域高速公路复杂网络拓扑模型,分析网络的静态指标特征,研究级联失效随机攻击和蓄意攻击下网络的抗毁性。

1 模型构建及静态指标分析

1.1 高速公路复杂网络构建

成渝双城经济圈位于长江上游,地处四川盆地,是中国西部地区发展水平最高、发展潜力最大的城镇化区域。近年来随着成渝一体化建设,对交通通行能力的需求越来越高,成渝地区与周边城市之间的交通联系越来越紧密,成渝区域高速公路逐渐形成复杂的交通网络。

为研讨不同攻击方式对成渝区域高速公路网络抗毁性的影响,依据《成渝城市群发展规划》对区域内高速公路城市节点进行选取,涉及四川省和重庆市相关区县。节点以县(区)为单位,考虑到重庆市和成都市下属区县特征,将重庆主城九区及成都市区五区分别合并为单一节点;将四川省其他地级市管辖范围内的区合并为单一节点,如达州市通川区、达川区合并为达州市区。依据上述原则,如图 1 所示,对成渝区域高速公路网络中各节点进行编号,根据高速公路网络特点构建无向拓扑网络。

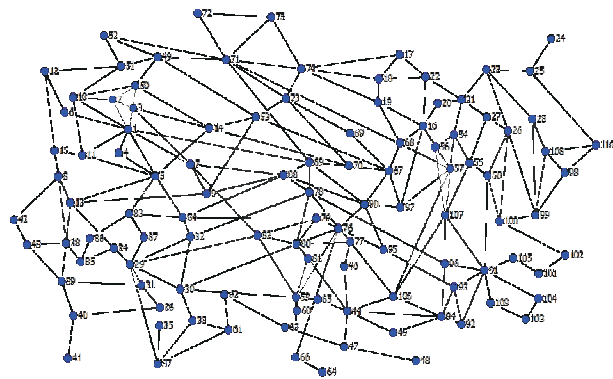


图 1 成渝区域高速公路网络拓扑图

1.2 复杂网络静态指标分析

运用 MATLAB 计算静态网络特征指标, 计算结果见表 1。

表 1 成渝区域高速公路网络静态特征指标

静态特征指标	计算结果	静态特征指标	计算结果
节点数	110	平均节点介数	0.036
边数	214	平均路径长度	4.87
平均度	3.81	网络效率	0.264 1
平均聚类系数	0.186		

1.2.1 度与度分布

在成渝区域高速公路网络中, 城市节点 v_i 所连边的数量称为该节点的度 k_i , 反映该节点同其他城市节点高速公路的连通状态, 其表达式见式(1)。其值越大, 说明该城市同周边城市高速公路连通越密切。

$$k_i = \sum_j a_{ij} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为城市节点 v_i 与 v_j 的连边数量。

度分布状况即成渝区域高速公路网络中度为 k 的节点占网络中总节点数的比例用 $P(k)$ 表示(见图 2)。由图 2 可知: 度值为 4 的节点数量最多, 网络平均度为 3.81, 表明每座城市平均与 3 座城市有高速公路相连, 整个网络的相连程度较好; 网络节点最大度为 9, 其所在节点为成都市区, 表明成都市区同 9 个周边节点有高速公路相连, 成都市的高速公路连通性最好。成都作为中心节点, 在成渝一体化高速公路网规划建设中的重要地位。

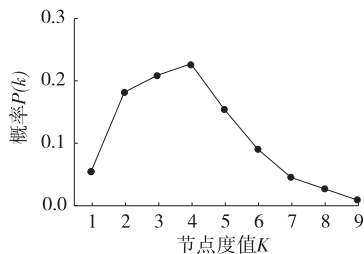


图 2 成渝区域高速公路网络的节点度及度分布

1.2.2 节点聚类系数

成渝高速公路网络节点聚类系数 C_i 为城市节点 v_i 的 k_i 个邻居城市节点之间实际连边数 E_i 和最大理论连边数之比, 表示为:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (2)$$

高速公路网络中所有节点聚类系数的平均值称为网络聚类系数。经计算, 序号为 4、45、72 的节点聚类系数最大值为 1, 说明以上节点处于与周边城市节点均有高速公路连通的状态; 网络中 38 个节点

的聚类系数为零, 占网络总节点数的 34.5%, 说明这些节点连接紧密性差; 成渝区域高速公路网络的网络聚类系数 $C=0.188$, 表现出较小的连通性(见图 3)。

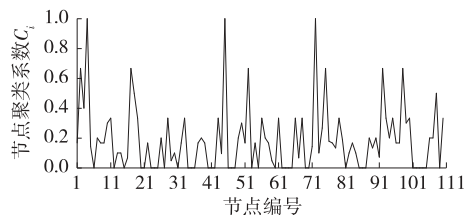


图 3 成渝区域高速公路网络节点聚类系数分布

1.2.3 节点介数

高速公路网络的节点介数为经过城市节点 v_i 的网络最短路径数量比例, 从全局角度体现该节点对整个高速公路网络的重要程度, 表示为:

$$B_i = \sum_{i \neq j} \frac{n_{ij}(i)}{n_{ij}} \quad (3)$$

式中: n_{ij} 为 v_i 和 v_j 间最短路径数量; $n_{ij}(i)$ 为 v_i 与 v_j 间且经过 v_i 的最短路径数量。

经 MATLAB 计算, 得成渝区域高速公路网络平均节点介数为 0.036, 整体较低。

1.3 高速公路网络级联失效模型

当高速公路网络中某些节点或路段发生故障时, 会根据相应规则影响与其相邻的节点或路段, 最终导致高速公路网络中一部分节点或整个网络失效, 这就是高速公路网络的级联失效现象。常见的级联失效模型有负载容量模型(ML 模型)、沙堆模型及 CASCADE 模型, 这里采用负载容量模型。

1.3.1 初始负载

采用节点介数对成渝区域高速公路网络中节点进行初始负载定义, 定义方式如下:

$$L_i = B_i \quad (4)$$

1.3.2 节点容量

较大的节点容量可避免高速公路网络级联失效现象发生。考虑到高速公路网络的节点及路段容量并不能无限制增加, 负载容量线性模型在实际情况中存在应用缺陷, 在现实网络中, 容量较小的节点拥有较大比例的剩余容量比例, 可认为负载与容量之间并不是单纯的线性关系, 采用负载容量非线性模型进行构建, 表达式如下:

$$C_i = L_i + \alpha L_i^\beta \quad (5)$$

式中: α 为网络城市节点的容忍系数, 用于描述节点对于高速公路负载的额外接受能力, 即节点承受额外增加负载的能力, 其值越大, 网络应对级联失效的

能力越强,网络的抗毁性越强, $\alpha > 0$; β 为容量参数, $\beta > 0$ 。

1.3.3 负载重分配策略

成渝区域高速公路网络中节点 v_i 受到攻击被破坏后,其上负载流量将被分配至其他节点。根据与被破坏节点相邻节点剩余可承受负载量比例进行负载重分配。失效节点 v_i 分配至相邻节点 v_j 的负载量比例 R 为:

$$R = \frac{C_j - L_j}{\sum (C_k - L_k)} \quad (6)$$

按照比例 R 进行负载重分配,同节点 v_i 连接的节点 v_j 重分配之后的负载为:

$$\Delta L = R \cdot L_i \quad (7)$$

对相邻节点当前实时负载量与节点容量进行判断,若 $\Delta L + L_j > C_j$,则该相邻节点 v_j 成为新的失效节点,产生新一轮负载重分配,继而引发网络其他节点级联失效;若 $\Delta L + L_j < C_j$,则不会产生新的负载重分配问题。仿真流程见图 4。

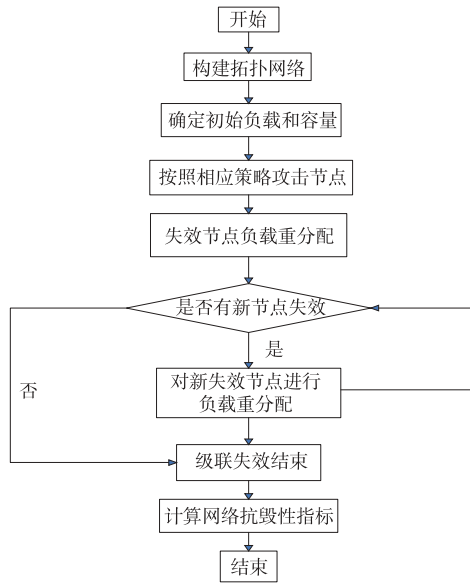


图 4 级联失效仿真流程

1.4 网络抗毁性评价指标

高速公路网络的抗毁性是指当高速公路网遭到突发事件袭击时,网络节点能维持正常功能的能力。网络中节点遭受攻击被破坏时,高速公路网中的车辆正常抵达节点的能力发生变化,从而影响网络的抗毁性。以最大连通子图相对大小和网络效率作为衡量成渝区域高速公路网络抗毁性的指标。

(1) 网络效率 E 代表网络整体效率, E 越大,说明网络的连通性越好,网络的抗毁性越强。其表

达式如下:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (8)$$

式中: E 为节点 i 和 j 之间路径长度;若节点 i 与 j 之间无高速公路连接,则 $d_{ij} = \infty$; N 为总节点数。

(2) 最大连通子图相对大小 G 是指级联失效过程结束后网络中最大连通子图中节点数 n 与总节点数之比,可从级联失效结果方面衡量网络的抗毁性。 G 降低,表明在受到攻击后,成渝区域高速公路网络拓扑结构发生变化; G 越小,遭到攻击后网络破坏程度越大,网络的抗毁性越差。其表达式如下:

$$G = \frac{n}{N} \quad (9)$$

2 抗毁性仿真分析

根据上述方法构建成渝区域高速公路网络,使用 MATLAB 对高速公路网络进行随机攻击和蓄意攻击节点级联失效仿真分析。

2.1 随机攻击

运用 MATLAB 模拟仿真 10 次随机攻击策略下网络级联失效过程,仿真中保持容量参数 $\beta = 1.2$ 不变,分别取容忍系数 $\alpha = 0.3, 0.8, 1.3, 1.8, 2.3$,对最大连通子图相对大小进行仿真分析,研究不同容量系数下网络抗毁性差异,仿真结果见图 5。

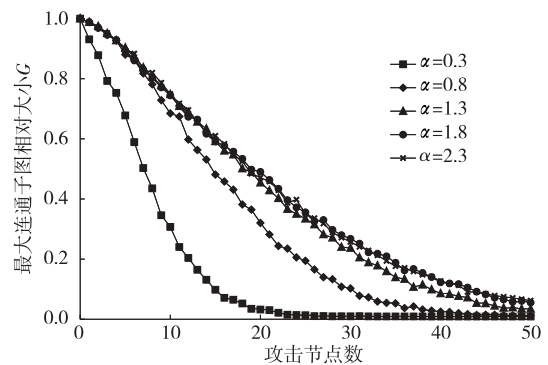


图 5 不同容忍系数 α 下最大连通子图相对大小对比

由图 5 可知:从随机攻击起始到结束,网络最大连通子图相对大小 G 一直处于下降状态,说明在攻击过程中,随着节点被破坏移除,网络逐渐崩溃。在遭受攻击时,容忍系数 α 取值不同, G 下降情况存在较大差异。 $\alpha = 0.3$ 时,在级联失效初期 G 快速下降,说明攻击网络中少量节点,网络就会被分成多个子图,网络的连通性会受到巨大破坏;被攻击节点数量达到 10 个时, G 下降 70% 左右;在攻击网络 20 个节点后, G 仅为 2.7%,网络中只剩下极少部分节

点存活,正常功能受到打击,直接影响网络抗毁性。 $\alpha=1.3、1.8、2.3$ 时, G 无明显迅速下降现象,曲线表现较平缓。总体来看,随着 α 的增大, G 下降变得缓慢,网络中节点所能承载的最大容量增大,节点被破坏后级联失效现象的发生更缓慢,增大 α 的取值可在一定程度上增加高速公路网络的抗毁性。

2.2 蓄意攻击

分别采用基于介数优先攻击、基于节点重要度优先攻击及基于度优先攻击的蓄意攻击策略与随机攻击节点方式对成渝区域高速公路网络效率的变化进行对比分析。先在网络中分别对3种蓄意攻击策略所需网络静态特征指标进行测度并排序,取前20位节点进行仿真。3种蓄意攻击策略首次攻击节点分别为78、91、1,代表城市为内江市资中县、重庆主城区和成都市区。不同策略下网络效率见图6。

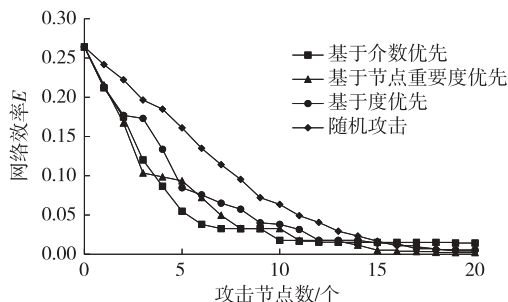


图6 不同攻击策略下网络效率变化对比

由图6可知:网络效率 E 随攻击节点数增加呈现持续下降态势,相比随机攻击,蓄意攻击下网络抗毁性较差,且不同蓄意攻击策略下网络抗毁能力存在差异。1) 基于介数优先攻击策略引起的成渝区域高速公路网络效率下降更快,网络级联失效过程传播更迅速,破坏节点数为5个即破坏网络中4.5%的节点时,总体网络效率下降至0.054,降幅为79.2%,网络接近崩溃。这是因为在该网络中高介数节点作为更重要的高速公路城市枢纽节点,其上节点负载较大,若连续攻击高介数城市节点,其上负载通过负载重分配过程流入周边节点,迅速引起级联过程。说明高介数节点对于维持网络效率稳定性起着重要作用,攻击高介数节点可使网络抗毁性迅速降低。攻击节点数为6~10个时,网络效率持续降低,但降低速度趋于平缓;攻击节点超过10个后,网络效率变化不明显,网络已被破坏,分割为多个连通子图。2) 节点重要度优先攻击策略下网络效率呈现阶段性下降趋势,攻击前3个高重要度节点时,该策略引起的网络效率下降率稍高于基于介数优先

攻击策略;攻击节点数为4~10个时,该策略引起的网络抗毁性优于介数优先攻击策略;之后继续攻击节点,网络效率进一步下降,网络接近崩溃。3) 基于度优先攻击策略时网络效率下降更缓慢,网络抗毁能力较强。这是由于高度值节点虽连通多个节点,但每个相邻节点容量及负载不一定会引起新一轮级联失效过程。

经过对蓄意攻击下3种攻击方式的仿真,寻找成渝区域高速公路网络的关键节点为1、44、78、79、91,分别对应成都市、泸州市、内江市资中县、内江市威远县及重庆主城区,其中成都市及重庆市为成渝区域高速公路网络中2个核心城市,泸州和内江为联系成渝区高速公路网络的重要枢纽城市。在不同优先攻击策略中,破坏上述节点后,整体网络效率迅速下降,网络被分裂成多个子图,网络结构也相应发生改变,网络的抗毁性变差。应加强这些关键地区高速公路网的建设。

3 改善网络抗毁性的对策

根据上述分析,在成渝区域高速公路网络建设和维护过程中,应做好对网络关键节点的运营维护,增加网络中节点对负载的额外承受能力,减弱级联失效对网络的破坏。可采取增大容忍系数 α 的方法对关键节点进行保护。在原有基础上增大容忍系数 α ,仿真结果见图7。对比图7与图6,在级联失效初期,增大 α 后,3种攻击策略造成的网络效率下降情况相较于未增大 α 时得到不同程度减缓,网络的抗毁性得到增强。

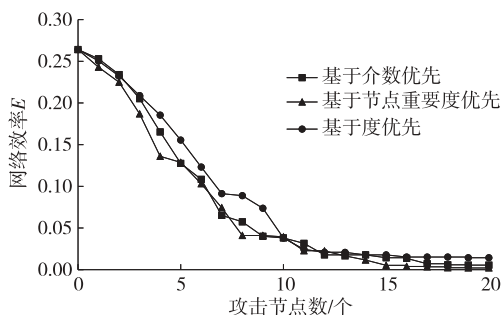


图7 增大容忍系数 α 时网络效率变化对比

4 结论

采用复杂网络理论对成渝区域高速公路网络多种静态指标进行分析,基于级联失效理论,采用随机攻击及蓄意攻击两种方式对成渝区域高速公路网络抗毁性进行实证研究,结论如下:

(1) 在遭受攻击时,增大网络中城市节点容忍系数 α 可有效增强网络抗毁性。

(2) 在蓄意攻击中不同攻击节点策略导致的网络崩溃情况各不相同,其中在攻击少量节点时,基于介数优先攻击策略相较于其他两种攻击策略网络效率会迅速降低,表现出较差的抗毁性。

(3) 随机攻击下成渝区域高速公路网络具有较强的抗毁性,而在蓄意攻击策略下表现出脆弱性。

(4) 对成渝区域高速公路网络中关键节点予以保护可增强网络抗毁性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 金雷.基于复杂网络的地域公路交通网抗毁性分析[D].长沙:国防科学技术大学,2008.
- [3] 邓亚娟,杨云峰,马荣国.基于复杂网络理论的公路网结构特征[J].中国公路学报,2010,23(1):98—104.
- [4] 曹祥.基于复杂网络理论的区域公路交通网络可靠性研究[D].南京:南京信息工程大学,2011.
- [5] 王雪.基于复杂网络理论的区域煤炭运输公路网的可靠性研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [6] 王家琦.中国城际公路网效率的空间异质性及其组织机制[D].武汉:湖北大学,2017.
- [7] 代洪娜,姚恩建,刘莎莎,等.基于基尼系数的高速公路网流量不均衡性研究[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(1):205—211.
- [8] 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.
- [9] MOTTER Adilson E, LAI Ying-Cheng. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2002, 66(6 Pt 2):065102.
- [10] CRUCITTI Paolo, LATORA Vito, MARCHIORI Massimo. Model for cascading failures in complex networks[J]. Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2004, 69(4 Pt 2):045104.
- [11] PER Bak, TANG Chao, KURT Wiesenfeld. Self-organized criticality: an explanation of the $1/f$ noise[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(4):381—384.
- [12] DOBSON I, CARRERAS B A, NEWMAN D E A. A probabilistic loading-dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts[J]. Probability in the Engineering and Informational Sciences, 2005, 19(1):15—32.
- [13] DOU Bing-Lin, WANG Xue-Guang, ZHANG Shi-Yong. Robustness of networks against cascading failures[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389(11):2310—2317.
- [14] 吴晓平,王甲生,秦艳琳,等.非线性负载容量模型的小世界网络级联抗毁性研究[J].通信学报,2014,35(6):1—7.

收稿日期:2021—05—18

(上接第20页)

- 及稳定性分析[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(6):45—51+84.
- [8] BANDO M, HASEBE K, NAKAYAMA A, et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation[J]. Physical Review E: Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 1995, 51(2):1035—1042.
- [9] JAMES C. Next generation simulation (NGSIM) vehicle trajectories and supporting data[EB/OL]. [2020—11—12]. <https://catalog.data.gov/dataset/next-generation-simulation-ngsim-vehicle-trajectories-and-supporting-data>.
- [10] JIANG N, YU B, CAO F, et al. An extended visual angle car-following model considering the vehicle types in the adjacent lane[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2021, 566:125665.
- [11] HOSSAIN M A, KABIR K, TANIMOTO J. Improved car-following model considering modified backward op-

timal velocity and velocity difference with backward-looking effect[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2021, 9(2):242—259.

- [12] 卫妮娜,俞礼军,李少龙.基于安全参数的双车道元胞自动机交通流模型及两种交通规则下的模拟分析[J].公路与汽运,2017(1):40—43+56.
- [13] 曾俊延,彭金栓,韩东鑫,等.变道辅助系统弯道目标车辆位置识别方法[J].公路与汽运,2018(2):1—4.
- [14] 唐夕茹,陈艳艳.基于改进型元胞自动机模型的双车道道路交通特征分析[J].北京工业大学学报,2014,40(1):1—10.
- [15] 余森彬.基于三相交通流理论的双车道交通流临界特征研究[D].兰州:兰州交通大学,2016.
- [16] 叶品,钟诚文,李兵强.基于快慢车辆主动换道特性的双车道元胞自动机模型研究[J].交通与计算机,2007,25(1):86—89.

收稿日期:2021—06—21