

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.10.020

考虑拥堵指数的城市群复杂交通网络 级联失效模型

霍非舟^{1,2}, 梅依云^{1,2}, 吕伟^{1,2}, 董格力^{1,2}

(1. 武汉理工大学 中国应急管理研究中心, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:为减少城市群复杂交通网络发生级联失效现象, 增强城市群复杂交通网络抗毁性, 基于复杂交通网络模型, 定义了节点和连边的初始负载和容量。结合剩余容量和拥堵指数提出了城市群复杂交通网络级联失效模型, 根据级联失效规模探究了不同攻击策略对城市群复杂交通网络抗毁性影响, 对长江中游城市群进行了实例分析。结果表明: 在不发生拥塞时, 网络级联失效规模最小; 随机节点攻击和蓄意节点攻击时, 拥堵指数权重均存在阈值, 随机节点攻击下, 拥堵指数权重到一定阈值时, 交通拥堵对网络级联失效规模影响较小; 蓄意节点攻击下, 拥堵指数权重存在2个阈值 δ_m 和 δ_n , 表明拥堵指数权重到一定程度会使级联失效规模下降; 随机连边攻击和蓄意连边攻击下, 拥堵指数权重小于阈值时复杂网络不发生级联失效, 大于阈值时拥堵指数权重越大复杂网络级联失效规模越大, 但当蓄意攻击数量足够多时, 拥堵指数权重不存在阈值; 节点攻击相比于连边攻击对于复杂交通网络影响更大; 根据提出的模型, 确定了长江中游城市群复杂网络武昌站、武汉汽车站等9个重要站点, 天门南站-仙桃西站、孝感北-孝感汽车站等50个路段网络重要路段的状态, 为城市群复杂交通网络布局和管理提供参考。

关键词:城市交通; 负载分配; 仿真模拟; 城市群复杂网络; 拥堵指数; 级联失效

中图分类号: U491.1⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 10-0162-09

Cascading Failure Model of Complex Transport Network in Urban Agglomeration Considering Congestion Index

HUO Fei-zhou^{1,2}, MEI Yi-yun^{1,2}, LÜ Wei^{1,2}, DONG Ge-li^{1,2}

(1. Center of Emergency Management Research of China, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China;

2. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: In order to reduce the cascading failure of complex transport network and enhance the invulnerability of complex transport networks in urban agglomeration, based on the complex transport network model, the initial loads and capacities of nodes and connecting edges are defined. A cascading failure model of complex transport network in urban agglomeration is proposed by combining residual capacity and congestion index. According to the cascading failure scale, the influences of different attack strategies on invulnerability of complex transport network in urban agglomeration are explored, and an example analysis of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River is conducted. The result shows that (1) The scale of network cascading failure is the smallest when congestion does not occur. (2) When nodes are attacked randomly or deliberately, there is a threshold for the weight of the congestion index. After nodes are attacked randomly and the weight of the congestion index reaches a certain threshold, traffic congestion has

收稿日期: 2021-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51808422, 52072286); 中央高校基本科研业务费项目 (2019IVB005, 2020VI002)

作者简介: 霍非舟 (1987-), 男, 河南周口人, 博士, 副教授. (huofz@whut.edu.cn)

little influence on the scale of network cascading failures. After nodes are attacked deliberately, there are 2 thresholds (δ_m and δ_n) for congestion index weight, indicating that the scale of cascading failures will decrease when the weight of the congestion index reaches a certain level. (3) When edges are attacked randomly or deliberately, cascading failure does not occur in complex network when the congestion index weight is smaller than the threshold, and the larger the congestion index weight the larger the cascading failure scale of complex network when the congestion index weight is larger than the threshold. But when the number of deliberate attacks is enough, there is no threshold for the congestion index weight. (4) Attacking node has greater influence on complex transport network than attacking edge. According to the proposed model, the statuses of 9 important stations such as Wuchang Station and Wuhan Bus Station and 50 important network sections such as Tianmen South Station to Xiantao West Station, Xiaogan North Station to Xiaogan Bus Station in the complex network of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River are determined, which provides a reference for the layout and management of complex traffic networks in urban agglomerations.

Key words: urban traffic; load distribution; simulation; complex network of urban agglomeration; congestion index; cascading failure

0 引言

近年来,随着区域一体化不断发展,城市群中的各城市之间存在一定的亲密度^[1],城市群中某车站或路段失效往往伴随着多站点或多路段的失效,因而提高城市群交通网络的抗毁性对于城市群交通网络应急管理能力的提高有重要意义。

长期以来,网络级联失效思想不断演进丰富。级联失效思想早期多运用于计算机网络和电力网络^[2-4]。在复杂信息网络方面,部分学者对计算机网络中的层级网络、无标度网络中的级联失效进行了鲁棒性分析^[5-6]。Sun 等^[7]构建了多螺旋供应链复杂网络演化模型,并对级联失效进行了鲁棒性分析。目前,学者们针对信息网络中级联失效机制及级联失效网络节点流量恢复策略、负载再分配全局模型、识别网络级联故障中的关键节点进行了大量研究^[8-11]。Xu 等^[12]探究了资源分配对级联故障时无标度网络恢复的影响。梁悼骞等^[13]基于节点容忍负载的能力调整了负载重分配策略。在电力网络系统方面,针对供电系统、核电力厂,对关键级联失效场景下的电网经济进行了改造,建立了电力保护系统^[14-15]。近年来,将级联失效概念应用于复杂交通网络后,针对级联失效后网络恢复问题提出了多种负载分配方法。Ma 等^[16]在双层复杂网络动态流量中引入了交付能力分配策略,新的分配策略与平均分配策略相比能显著提高交通系统抗毁性。王世波等^[17]针对交通拥堵问题提出了非线性负载重分配模型。王国娟等^[18]基于复杂网络设计了公交站点失效

优化方案。王德龙等^[19]基于蓄意攻击研究了机场交通网络的抗毁性。毛剑楠等^[20]考虑城市基础经济、拓扑网络结构以及联系强度,提出了一种新的城市群综合节点重要度识别方法。

综上所述,目前对于级联失效的研究大多是针对计算机信息网络和电力系统网络,近几年许多学者将级联失效概念引入城市群复杂交通网络,进而对复杂交通网络级联失效模型有了一定研究成果。但是,现有的复杂交通网络级联失效模型没有考虑道路堵塞对级联失效负载分配的影响,所以本研究拟构建城市群复杂交通网络,考虑拥堵指数,建立城市群复杂交通网络级联失效模型,从而增强城市群复杂交通网络抗毁性,为城市群复杂交通网络布局提供参考,保障城市群复杂交通系统的正常运行。

1 城市群复杂交通网络模型

1.1 建立城市群复杂交通网络

基于城市交通网络已有的研究成果^[21-23],为建立城市群复杂交通网络,将多个独立交通网络进行叠加,如图 1 所示,具体方法如下:

(1) 将汽车站作为节点,若汽车站之间有高速公路直接相连,则 2 个汽车站相邻,2 个节点之间有 1 条连边。

(2) 将火车站作为节点,若有铁路直接连接 2 个火车站,则 2 个火车站相连,2 个点之间有 1 条连边。

(3) 合并城市里的所有汽车站,由于城市中所所有长途客运站的汽车要到达其他相同站点途径同一

条高速公路,所以每个城市只取最大的1个汽车客运站作为汽车站点。

(4) 连接同一城市的汽车站和火车站点,若2个点之间有多条线路相连,则合并为1条。

在构建城市群复杂交通网络时不考虑道路的方向性,城市群交通网络为无向网络 $G=(V, E)$, 式中 $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4, \dots, v_n\}$, v_n 为编号为 n 的节点; n 为节点总数; $E=\{e_1, e_2, e_3, e_4, \dots, e_m\}$, e_m 为编号为 m 的连边; m 为网络中连边的总数; 邻接矩阵 $A=\{a_{ij}\}_{N \times N}$, 其中 N 为节点总数, a_{ij} 表示为:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & i \text{ 与 } j \text{ 不直接相连且 } i \neq j \\ 1 & i \text{ 与 } j \text{ 直接相连且 } i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases}$$

式中, i 和 j 为节点; 节点 i 的度 k_i 为与 i 相连连边数, 记为:

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

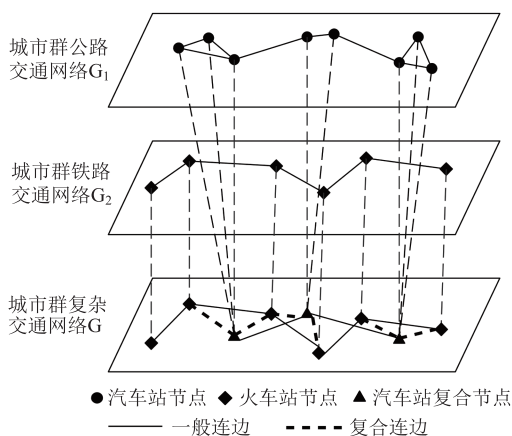


图1 城市群复杂交通网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of complex traffic network of urban agglomeration

1.2 攻击策略

边介数指网络中经过该边的最短路径数与总最短路径数的比值^[24]。具体攻击策略有以下4种。

(1) 随机节点攻击: 随机攻击定量节点。

(2) 蓄意节点攻击: 按照节点度从大到小对节点依次进行攻击。

(3) 随机连边攻击: 随机攻击定量连边。

(4) 蓄意连边攻击: 按照边介数从大到小对连边依次进行攻击。

假设节点失效的情况下不考虑连边状态,即在考虑节点失效时,连边无初始负载无容量限制;假设连边失效情况下则不考虑节点状态,即在连边失效的情况下节点无初始负载无容量限制。

2 考虑拥堵指数的复杂交通网络级联失效模型

在构建考虑拥堵指数的城市群复杂交通网络级联失效模型时,假设节点和连边被攻击后在试验期间没有恢复能力。

2.1 相关变量定义

2.1.1 初始负载

初始负载包括节点初始负载和连边初始负载。

(1) 节点初始负载

参考已有研究^[25],重新定义节点的初始负载:

$$L_i^0 = \alpha \left(\frac{k_i}{\langle k \rangle} \right)^\tau \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (2)$$

式中, L_i^0 为节点 i 初始负载; $\langle k \rangle$ 为网络平均度; α 和 τ 为初始负载可调参数, $\alpha > 0$, $\tau > 0$; N 为网络总节点数。

(2) 连边初始负载

结合网络平均度和连边节点度定义城市群复杂交通网络连边 e_{ij} 的初始负载 $L_{e_{ij}}^0$:

$$L_{e_{ij}}^0 = \alpha \left(\frac{k_i + k_j}{\langle k \rangle} \right)^\tau \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (3)$$

式中 k_j 为节点 j 的度。

2.1.2 容量

(1) 节点容量

节点容纳负载的能力与初始负载密切相关,所以定义节点容量:

$$C_i = (1 + \beta) L_i^0, \quad (4)$$

式中, C_i 为节点 i 的容量; β 为网络负载容忍系数,且 $\beta > 0$ 。

(2) 连边容量

考虑连边容量正比于初始负载,定义连边容量:

$$C_{e_{ij}} = (1 + \beta) L_{e_{ij}}^0, \quad (5)$$

式中 $C_{e_{ij}}$ 为连边 e_{ij} 的容量。

2.1.3 拥堵指数

随着交通网络的发展,日出行量越来越高,交通拥塞影响着人们出行路径的选择。针对交通拥塞的衡量,采用拥堵指数衡量交通拥堵状态,具体定义为实际通过路段时间与路段无其他车辆时通过道路时间的比值,表达式为:

$$F_{e_{ij}} = \frac{T_a}{T_f}, \quad (6)$$

式中, $F_{e_{ij}}$ 为连边 e_{ij} 的拥堵指数; T_a 为实际行驶时间; T_f 为路段畅通时行驶时间。若节点 v_i 和 v_j 不相连,或 v_i 和 v_j 之间连边失效,则 $F_{e_{ij}} = +\infty$ 。

2.2 负载重分配模型

负载重分配发生在城市群复杂交通网络节点或连边失效和级联失效之后, 原本在节点和连边的负载被迫分配到相邻节点和连边。相邻连边表示除连边本身之外与连边端点直接相连的所有连边。节点和连边负载重分配对复杂交通网络的抗毁性有很大影响。

图 2 为复杂交通网络级联失效负载分配示意图。攻击节点 k 从而导致节点 k 丧失全部功能, 节点 k 的全部负载将按比例分别向 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 分配, 节点被分配负载较多, 则节点与 k 连线较粗, 节点被分配负载较少, 则节点与 k 连线较细。当节点 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 接受来自 k 的负载后可能会由于过载发生进一步失效, 此时发生失效的节点可以视为“暂停节点”, 即可恢复正常的节点, 例如节点 A_1 和 A_3 。对节点 A_1 和 A_3 的负载进行分配, 将超过容量的负载分配到相连节点, 循环往复, 直到所有节点恢复, 级联失效过程结束。当连边 e_{ij} 的所有负载向相邻连边 $e_{iA_5}, e_{iA_8}, e_{iA_7}, e_{iA_6}$ 分配, 连边接受负载后可能处于过载状态, 例如连边 e_{jA_6} 。此时发生失效的连边称为“暂停连边”, 即通过重分配多余负载可恢复正常。将连边 e_{jA_6} 过载的负载分配到相邻连边, 直至网络恢复正常, 级联失效过程结束。基于负载重分配时交通拥堵也是影响负载分配的一个重要因素, 所以结合剩余容量和网络拥堵指数建立负载重分配模型。在 t 时刻, 节点 i 被攻击, 若节点 j 与 i 相连, 则节点 j 接收负载比例表示为:

$$\omega_{i \rightarrow j} = \frac{(C_j - L_j)^\sigma \times F_j^{-\delta}}{\sum_{m \in \Gamma} (C_m - L_m)^\sigma \times F_m^{-\delta}}, \quad (7)$$

式中, $\omega_{i \rightarrow j}$ 为节点 i 负载由 $i \rightarrow j$ 的比例; Γ 为与节点 i 相连所有节点集合; C_j 和 L_j 分别为节点 j 的容量和负载; C_m 和 L_m 分别为节点 m 的容量和负载; F_j 为 $i \rightarrow j$ 的拥堵指数; F_m 为 $i \rightarrow m$ 的拥堵指数; σ 为剩余容量权重; δ 为拥堵指数权重; $\sigma > 0, \delta > 0$ 且 $\sigma + \delta = 1$ 。所以, 节点 j 增加的负载 ΔL_j 为:

$$\Delta L_j = L_i \times \omega_{i \rightarrow j} = L_i \times \frac{(C_j - L_j)^\sigma \times F_j^{-\delta}}{\sum_{m \in \Gamma} (C_m - L_m)^\sigma \times F_m^{-\delta}}, \quad (8)$$

式中 L_i 为节点 i 的负载。

更新节点 j 的负载:

$$L_j(t+1) = L_j(t) + \Delta L_j = L_j(t) + L_i \times \frac{(C_j - L_j)^\sigma \times F_j^{-\delta}}{\sum_{m \in \Gamma} (C_m - L_m)^\sigma \times F_m^{-\delta}}, \quad (9)$$

式中, $L_j(t+1)$ 为被分配负载后节点 j 的负载; $L_j(t)$

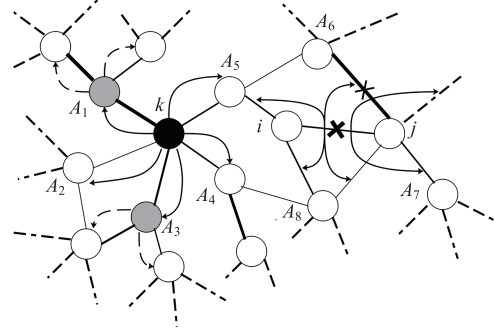


图 2 级联失效负载分配示意图

Fig. 2 Schematic diagram of load distribution after cascading failure

为被分配负载前节点 j 的负载, 第 1 轮负载重分配时 $L_j(t) = L_j^0$ 。

判断 $L_j(t+1) < C_j$ 是否成立, 若成立, 则 j 不发生失效, 若不成立, 则发生进一步级联失效。节点 j 根据式 (7) 向相邻节点分配负载。相邻节点 j_1 增加的负载为:

$$\Delta L_{j_1} = (L_j(t+1) - C_j) \times \omega_{j \rightarrow j_1}, \quad (10)$$

式中, $\omega_{j \rightarrow j_1}$ 为节点 j 负载由 $j \rightarrow j_1$ 的比例, 可根据式 (7) 可得。按照式 (9) 更新节点 j_1 的负载, 重复操作直到节点恢复正常。

假设连边 e_{ij} 在 t 时刻发生失效, 那么, 相邻连边的负载分配比例为:

$$\omega_{e_{ij} \rightarrow e_1} = \frac{(C_{e_1} - L_{e_1})^\sigma \times F_{e_1}^{-\delta}}{\sum_{e_k \in \Lambda} (C_{e_k} - L_{e_k})^\sigma \times F_{e_k}^{-\delta}}, \quad (11)$$

式中, $\omega_{e_{ij} \rightarrow e_1}$ 为相邻连边 e_1 分配到的负载比例; Λ 为与连边 e_{ij} 的相邻连边集合; e_1 为与失效连边 e_{ij} 相连的其中 1 个相邻连边; C_{e_1} 和 L_{e_1} 分别为节点 j 的容量和负载; F_{e_1} 和 $e_{ij} \rightarrow e_1$ 分别为节点 m 的容量和负载; F_{e_1} 为 $e_{ij} \rightarrow e_1$ 的拥堵指数; F_{e_k} 为 $e_{ij} \rightarrow e_k$ 的拥堵指数。

连边 e_1 增加的负载 ΔL_{e_1} 为:

$$\Delta L_{e_1} = L_{e_{ij}} \times \omega_{e_{ij} \rightarrow e_1} = L_{e_{ij}} \times \frac{(C_{e_1} - L_{e_1})^\sigma \times F_{e_1}^{-\delta}}{\sum_{e_k \in \Lambda} (C_{e_k} - L_{e_k})^\sigma \times F_{e_k}^{-\delta}}, \quad (12)$$

式中 $L_{e_{ij}}$ 为边 e_{ij} 的负载。

更新连边 e_1 的负载:

$$L_{e_1}(t+1) = L_{e_1}(t) + \Delta L_{e_1} = L_{e_1}(t) + L_{e_{ij}} \times \frac{(C_{e_1} - L_{e_1})^\sigma \times F_{e_1}^{-\delta}}{\sum_{e_k \in \Lambda} (C_{e_k} - L_{e_k})^\sigma \times F_{e_k}^{-\delta}}, \quad (13)$$

式中, $L_{e_1}(t+1)$ 为网络负载重分配后的连边 e_1 的负载; $L_{e_1}(t)$ 为负载重分配前的连边 e_1 的负载, 第 1 轮负载重分配时 $L_{e_1}(t) = L_{e_1}^0$ 。

若 $L_{e_1}(t+1) > C_{e_1}$, 则网络发生进一步失效, 参考式 (11), e_1 的邻边 e_2 增加的负载为:

$$\Delta L_{e_2} = (L_{e_1}(t+1) - C_{e_1}) \times \omega_{e_1 \rightarrow e_2}, \quad (14)$$

式中 $\omega_{e_1 \rightarrow e_2}$ 为 e_1 负载由 $e_1 \rightarrow e_2$ 的比例。

按照式 (13) 更新连边 e_2 的负载, 重复操作直到连边恢复正常。

2.3 级联失效抗毁性评估指标

为衡量节点或连边失效对城市群复杂交通网络的影响, 采用级联失效规模来对网络进行抗毁性评估。表达式为:

$$CFN_1 = \frac{N'}{N(N-1)}, \quad (15)$$

$$CFN_2 = \frac{M'}{M(M-1)}, \quad (16)$$

式中, CFN_1 和 CFN_2 分别为节点和连边级联失效规模; N' 为节点失效导致其他节点失效的数目; M' 为连边失效导致其他连边失效的数目; M 为连边总数。

2.4 城市群复杂交通网络级联失效模型

图 3 为城市群复杂交通网络级联失效仿真流程图。具体步骤如下。

Step 1: 构建城市群复杂交通网络。将各城市里的火车站、汽车站视作复杂网络节点, 2 个节点间若能直接到达则连接 2 个节点, 构建邻接矩阵 A 。

Step 2: 按式 (2)~(3) 对节点和连边负载进行初始化得到 L_i^0 和 $L_{e_i}^0$, 按式 (4)~(5) 确定节点和连边的容量 C_i 和 $C_{e_{ij}}$ 。

Step 3: 确定攻击策略。攻击节点 v_i 或连边 e_{ij} , 令攻击的节点或连边失效。

Step 4: 对失效节点或连边进行负载重分配。将失效节点或连边的负载按式 (7)~(9) 分配给相邻节点, 或按式 (11)~(13) 分配给相邻连边, 更新复杂网络节点负载或连边负载, 判断 L_j 是否大于容量 C_j , 若是, 则进行 Step 5, 否则转跳至 Step 7。

Step 5: 级联失效节点或连边负载重分配。将级联失效节点或连边过载部分的负载按式 (10) 或式 (14) 分配到相连节点或连边。

Step 6: 更新负载, 判断是否有新节点处于“暂停状态”。节点或连边是否存在 $L_j > C_j$ 或 $L_{e_{ij}} > C_{e_{ij}}$ 的情况, 若存在, 则返回 Step 5, 否则进行 Step 7。

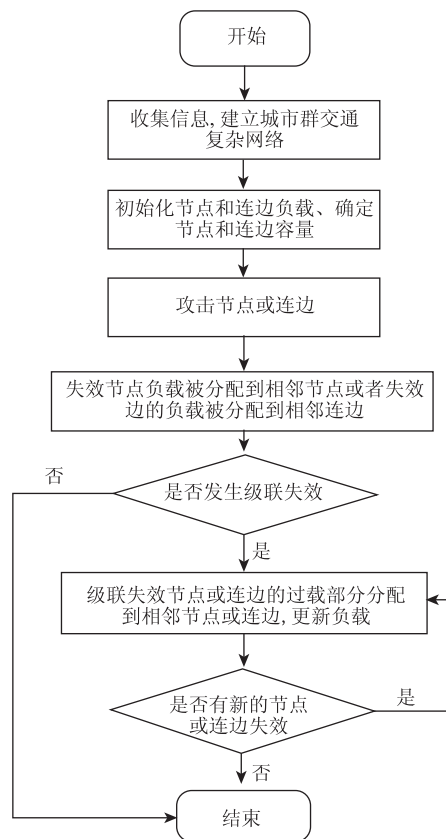


图 3 城市群复杂交通网络级联失效仿真流程图

Fig. 3 Flowchart of simulating cascading failure of complex traffic network of urban agglomeration

Step 7: 级联失效过程结束。计算级联失效规模变化。

3 实例研究

以长江中游城市群交通网络为对象, 根据 1.1 节建立长江中游城市群复杂交通网络, 得到如图 4 所示的网络拓扑图, 节点数 $N = 108$, 连边数 $M = 336$ 。

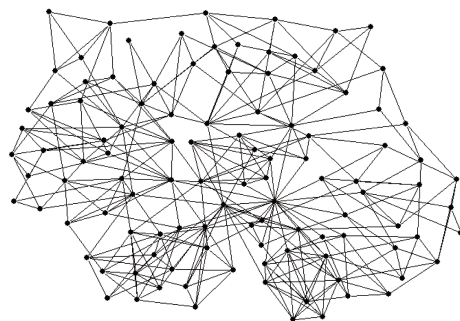


图 4 长江中游城市群复杂交通网络拓扑图

Fig. 4 Topology map of complex traffic network of city agglomeration of middle reaches of Yangtze River

3.1 拥堵指数权重对城市群交通网络级联失效影响

3.1.1 随机节点攻击下级联失效仿真

令 $\alpha = 4$, $\tau = 1.6$, $\beta = 0.1$, 在攻击不同节点数下, 调整 δ 进行随机节点攻击下级联失效仿真, 每个试验进行 50 次后取平均值, 结果如图 5 所示。

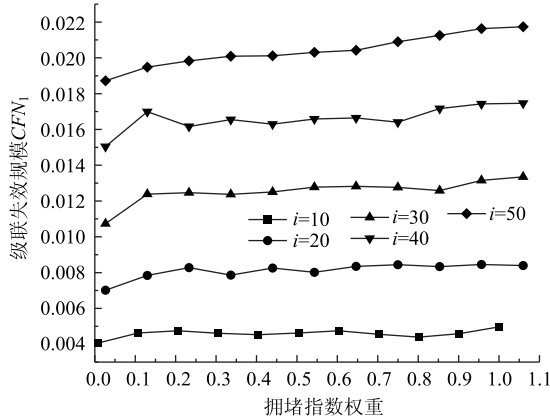


图 5 随机节点攻击下拥堵指数权重对级联失效规模影响

Fig. 5 Influence of congestion coefficient weight on cascading failure scale when attacking nodes randomly

由图 5 可得, 随着失效节点数 i 的增加, 级联失效规模也明显增大。在不发生道路拥堵的情况下, 即 $\sigma = 1$, $\beta = 0$ 时, 网络级联失效规模达到最小值, 在只考虑道路拥堵的情况下, 即 $\sigma = 1$, $\delta = 1$ 时, 网络级联失效规模达到最大值, 这表明交通拥堵会导致交通网络进一步失效。当 $\delta < 0.1$ 时, 随着 δ 的增加, 级联失效规模明显增大; 当 $\delta > 0.1$ 时, 随着 δ 的增加, 级联失效规模变化较小。因此在随机节点失效的情况下, 交通拥堵会扩大网络级联失效影响, 当拥堵指数权重到一定阈值, 交通拥堵对网络级联失效规模影响较小。

3.1.2 蓄意节点攻击下级联失效仿真

为研究在考虑拥堵指数情况下, 城市群复杂交通网络节点在蓄意攻击下级联失效规模变化, 令 $\alpha = 4$, $\tau = 1.6$, $\beta = 0.1$ 。仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可得, 级联失效规模随着失效节点数 i 增加而增加, $\sigma = 1$, $\delta = 0$ 时, 网络级联失效规模最小; $\sigma = 0$, $\delta = 1$ 时, 网络级联失效规模最大。当 $\delta < 0.1$ 时, 随着 δ 增加, 级联失效规模急剧上升; 当 $0.1 < \delta < 0.3$ 时, 随着 δ 的增加, 级联失效规模呈下降趋势; $\delta > 0.3$ 时, 级联失效规模缓慢增加, 说明在蓄意节点失效情况下, 拥堵指数权重存在 2 个阈值 δ_m 和 δ_n ($\delta_m < \delta_n$)。当 $\delta = \delta_m$ 时, 级联失效规模从随着 δ 上升转为随着 δ 下降; 当 $\delta = \delta_n$ 时, 在考虑拥堵时,

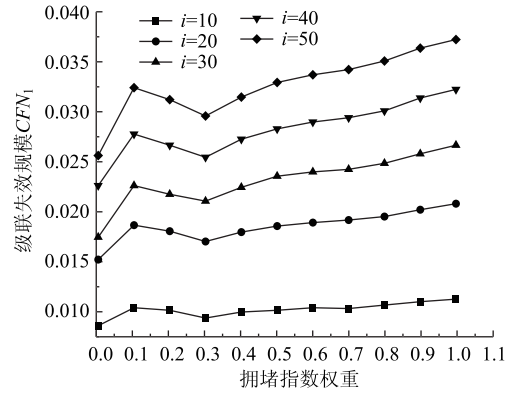


图 6 蓄意节点攻击下拥堵指数权重对级联失效规模影响

Fig. 6 Influence of congestion coefficient weight on cascading failure scale when attacking nodes deliberately

级联失效规模从下降转为随着 δ 上升。这表明拥堵指数权重到一定程度会使级联失效规模下降。同时与随机节点失效相比, 蓄意节点失效造成的后果更严重, 对网络影响范围更广泛。

3.1.3 随机连边攻击下级联失效仿真

令 $\alpha = 4$, $\tau = 1.6$, $\beta = 0.1$, 探究在随机连边攻击下, 拥堵指数权重和级联失效规模的关系, 每组试验进行 50 次后对级联失效规模求均值, 得到如图 7 所示结果。

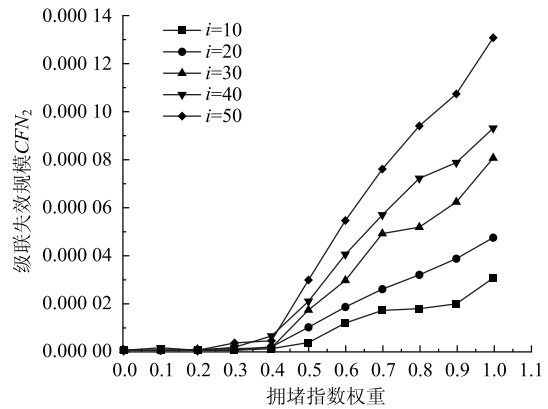


图 7 随机连边攻击下拥堵指数权重对级联失效规模影响

Fig. 7 Influence of congestion coefficient weight on cascading failure scale when attacking edges randomly

从图 7 可以看出, 当 $\delta < 0.2$ 时, CFN_2 为 0, 复杂网络不发生级联失效, 失效连边数和 δ 对级联失效规模没有影响; 当 $\delta > 0.2$ 时, 随着 δ 的增大, 级联失效规模不断上升, 直至 $\delta = 1$, 级联失效规模达到最大值。这表明在随机连边失效情况下, 当 δ 小于 0.2 时, 拥堵对 CFN_2 无影响; 当 $\delta > 0.4$ 时, i 越大, CFN_2 越大, 且当 δ 增大时, 级联失效规模变化较快, 说明拥堵指数权重达到一定程度后, 随着拥

堵指数权重的增加,级联失效规模也不断增加。对比图4,级联失效规模比随机节点攻击下要小,这是由于连边的相邻连边个数多于节点相连边个数,在负载分配时接受分配的连边越多,越不容易发生级联失效。

3.1.4 蓄意连边攻击情况下级联失效仿真

为研究在连边蓄意攻击情况下,拥堵指数权重和级联失效规模的关系,令 $\alpha=4$, $\tau=1.6$, $\beta=0.1$,结果如图8所示。

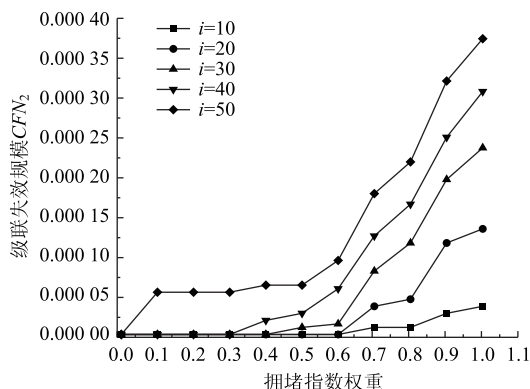


图8 蓄意连边攻击下拥堵指数权重对级联失效规模影响

Fig. 8 Influence of congestion coefficient weight on cascading failure scale when attacking edges deliberately

由图8可得,蓄意连边失效比随机连边失效产生的后果更严重,这是因为蓄意失效的连边是介数较大的边,所以需要分配的负载就更多,导致连边更容易发生级联失效。拥堵指数权重 δ 存在阈值 δ_c ,当 $\delta < \delta_c$,网络不发生级联失效, i 越大 δ_c 越小,例如当 $i=10$ 时, $\delta_c=0.6$,当 $i=40$ 时, $\delta_c=0.3$,但 $i=50$ 时,不存在阈值 δ_c ,这是由于失效连边数足够大时,复杂交通网络越易发生级联失效, δ 越大, CFN_2 越大。 $\delta=0$ 时 CFN_2 达到最大值, i 越大级联失效规模越大。

对比图5~图8可知,节点失效比连边失效对交通网络的级联失效影响更大,因此,对于大型城市群交通网络,要注意维护重要节点的正常运行,在交通拥堵情况下,调整拥堵指数权重,使得剩余容量和拥堵指数保持相对平衡可以减少级联失效规模。

3.2 节点和连边重要性评估

为研究长江中游城市群交通网络节点和连边的重要性,令 $\alpha=4$, $\tau=1.6$, $\beta=0.1$, $\sigma=0.5$, $\delta=0.5$,假设每个节点或者连边单独失效,研究城市群交通网络级联失效过程,得到如图9和图10所示结果。

从图9和图10可得长江中游城市群复杂交通网

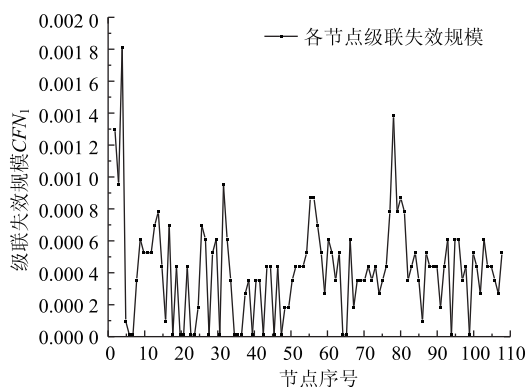


图9 节点单独失效对级联失效规模影响

Fig. 9 Influence of single node failure on cascading failure scale

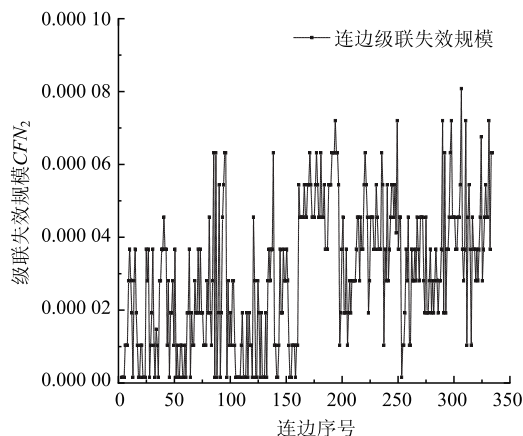


图10 连边单独失效对级联失效规模影响

Fig. 10 Influence of single edge failure on cascading failure scale

络中的重要节点和连边。并且可得交通网络节点级联失效规模平均值为 $4.094\ 39 \times 10^{-4}$,交通网络连边级联失效规模平均值为 $2.851\ 65 \times 10^{-5}$,所以,节点失效相比于连边失效对于网络级联失效影响更大。取最易发生级联失效前5个节点和最易发生级联失效前5条路段,如表1所示。

由表1可看出,在对长江中游城市群复杂交通网络日常维护和管理时,要特别注意武昌站、武汉汽车站、武汉站、汉口站、咸宁汽车站、长沙站、长沙南站、九江汽车站等9个站点的状态,保证复杂交通网络系统正常运行。天门南站—仙桃西站、孝感北—孝感汽车站、咸宁汽车站—南昌站、仙桃汽车站—天门汽车站、潜江汽车站—潜江站、天门汽车站—孝感汽车站、武昌站—襄州站、襄阳站—襄州站、黄石北—黄石客运站、大冶北站—黄石站等50个路段需要重点关注和管理,防止这些路段失效导致交通网络发生严重的级联失效。

表 1 长江中游城市群重要站点和路段

Tab. 1 Major stations and roads of city agglomerations in middle reaches of Yangtze River

序号	重要站点名称	重要路段名称
1	武昌站	天门南站—仙桃西站
2	南昌西站	孝感北—孝感汽车站、咸宁汽车站—南昌站、仙桃汽车站—天门汽车站、潜江汽车站—潜江站、天门汽车站—孝感汽车站、武昌站—襄州站
3	武汉站	襄阳站—襄州站
4	汉口站、咸宁汽车站	黄石北—黄石客运站、大冶北站—黄石站、阳新站—黄石北站、阳新站—大冶北站、华容东站—鄂州汽车站、孝感站—孝感东站、孝感东站—汉口站、孝感东站—花园站、孝感北站—云梦站、孝感北站—应城站、孝感北站—云梦东站、孝感站—花园站、应城站—天门站、云梦东站—孝感汽车站、武昌站—潜江站、仙桃汽车站—潜江汽车站、襄阳站—襄阳汽车站、襄州站—襄阳站
5	长沙站、长沙南站、九江汽车站	大冶北—阳新站、花湖站—阳新站、黄冈汽车站—花湖站、黄冈西站—黄冈汽车站、汉口站—孝感站、武昌站—孝感站、孝感站—孝感北站、孝感站—云梦东站、孝感东站—金银潭站、孝感东站—云梦东站、孝感北站—孝感站、孝感东站—孝感北站、孝感北站—花园站、应城站—孝感汽车站、应城站—荆门站、孝感东站—孝感汽车站、孝感汽车站—天门汽车站、咸宁汽车站—黄石汽车站、咸宁东站—咸宁汽车站、咸宁汽车站—咸宁南站、咸宁汽车站—岳阳汽车站、武昌站—天门南站、天门南站—天门汽车站、襄阳东站—襄阳汽车站

4 结论

基于城市群交通复杂网络, 提出了考虑拥堵指数和剩余容量的级联失效负载重分配模型, 构建了城市群复杂交通网络级联失效模型。分析了拥堵指数权重与城市群交通网络级联失效规模的关系, 并对复杂网络中的节点和连边重要性进行评估, 确定了长江中游城市群重要站点和路段。主要结论如下:

(1) 失效节点越多, 级联失效规模越大。交通拥堵会导致复杂网络发生进一步的级联失效, 在不发生拥堵时, 即所有路段均畅通情况下, 网络级联失效规模最小。

(2) 随机节点失效下, 交通拥堵到一定程度, 交通拥堵对复杂网络级联失效影响较小; 蓄意节点失效下, 存在 1 个最佳的拥堵指数权重, 使得复杂网络级联失效规模较小。

(3) 随机和蓄意连边失效下, 拥堵指数权重存在阈值, 拥堵指数权重小于阈值时复杂网络不发生级联失效, 大于阈值时拥堵指数权重越大复杂网络级联失效越严重。但蓄意连边失效比随机连边失效造成的后果更严重, 因此要保护边介数较大的连边, 并且控制复杂交通网络拥堵指数权重不超过其阈值。

(4) 确定长江中游城市群 9 个重要站点和 50 个重要路段, 并且节点失效相较于连边失效对于复杂交通网络影响更大。

本研究不仅可为长江中游城市群交通网络规划提供参考, 促进长江中游城市群交通运输系统发展, 提高交通网络管理水平, 并且提出的级联失效模型

可准确地判定关键站点和路段。后续研究工作将考虑根据乘客目的地的差异性构建复杂交通网络级联失效模型, 进一步研究、优化复杂交通网络级联失效模型。

参考文献:

References:

[1] 陈晓明, 李引珍, 沈强, 等. 基于双层复杂网络的城市交通网络协同优化方法 [J]. 计算机应用, 2019, 39 (10): 3079-3087.
CHEN Xiao-ming, LI Yin-zhen, SHEN Qiang, et al. Urban Traffic Networks Collaborative Optimization Method Based on Two-layered Complex Networks [J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39 (10): 3079-3087.

[2] 王建伟, 荣莉莉. 基于负荷局域择优重新分配原则的复杂网络上的相继故障 [J]. 物理学报, 2009, 58 (6): 3714-3721.
WANG Jian-wei, RONG Li-li. Cascading Failures on Complex Networks Based on the Local Preferential Redistribution Rule of the Load [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58 (6): 3714-3721.

[3] 李涛, 裴文江, 王少平. 无标度复杂网络负载传输优化策略 [J]. 物理学报, 2009, 58 (9): 5903-5910.
LI Tao, PEI Wen-jiang, WANG Shao-ping. Optimal Traffic Routing Strategy on Scale-free Complex Networks [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58 (9): 5903-5910.

[4] WANG J W, RONG L L. Cascade-based Attack Vulnerability on the US Power Grid [J]. Safety Science, 2009, 47 (10): 1332-1336.

[5] BEN-HAIM Y. Cascading Failures in Hierarchical Networks with Unity of Command: An Info-gap Analysis

- [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 41: 101291.
- [6] DUI H, MENG X, XIAO H, et al. Analysis of the Cascading Failure for Scale-free Networks Based on a Multi-strategy Evolutionary Game [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 199: 106919.
- [7] SUN J, TANG J, FU W, et al. Construction of a Multi-echelon Supply Chain Complex Network Evolution Model and Robustness Analysis of Cascading Failure [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 144: 106457.
- [8] WANG B, ZHANG Z, QI X, et al. Identify Critical Nodes in Network Cascading Failure Based on Data Analysis [J]. Journal of Network and Systems Management, 2020, 28 (1): 21-34.
- [9] SHEN Y, SONG G, XU H, et al. Model of Node Traffic Recovery Behavior and Cascading Congestion Analysis in Networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 545: 123422.
- [10] 刘凤增, 肖兵, 陈施思, 等. 负载作用下相依网络择优恢复方法研究 [J]. 电子与信息学报, 2020, 42 (7): 1694-1701.
- LIU Feng-zeng, XIAO Bing, CHEN Shi-si, et al. A Preferential Recovery Method of Interdependent Networks under Load [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2020, 42 (7): 1694-1701.
- [11] 王哲, 李建华, 康东. 基于极大连通子图边界的复杂网络恢复研究 [J]. 系统仿真学报, 2020, 32 (12): 1-10.
- WANG Zhe, LI Jian-hua, KANG Dong. Research on Recovering of Complex Networks Based on Boundary Nodes of Giant Connected Component [J]. Journal of System Simulation, 2020, 32 (12): 1-10.
- [12] XU S, XIA Y, OUYANG M. Effect of Resource Allocation to the Recovery of Scale-free Networks during Cascading Failures [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 540 (4): 123157.
- [13] 梁倬骞, 付丹龙, 邓原. 级联过程中基于动态信息的负载重分配策略 [J]. 计算机工程与科学. 2017, 39 (9): 1638-1644.
- LIANG Zhuo-qian, FU Dan-long, DENG Yuan. A Load Redistribution Strategy Based on Dynamic Information in Cascading Process [J]. Computer Engineering and Science, 2017, 39 (9): 1638-1644.
- [14] CHOI E, SONG J. Cost-effective Retrofits of Power Grids Based on Critical Cascading Failure Scenarios Identified by Multi-group Non-dominated Sorting Genetic Algorithm [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020, 49: 101640.
- [15] MOUSTAFA M A M M, CHANG C. Preventing Cascading Failure of Electric Power Protection Systems in Nuclear Power Plant [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2021, 53 (1): 121-130.
- [16] MA J, HAN W, GUO Q, et al. Traffic Dynamics on Two-layer Complex Networks with Limited Delivering Capacity [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2016, 456: 281-287.
- [17] 王世波, 赵金楼, 郑继兴. 基于复杂网络的城市交通堵塞载荷再分配控制 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (5): 98-103.
- WANG Shi-bo, ZHAO Jin-lou, ZHENG Ji-xing. Urban Traffic Congestion Load Redistribution Control Based on Complex Network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (5): 98-103.
- [18] 王国娟, 吕文红, 高歌, 等. 基于复杂网络的失效公交站点绕行方案研究 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (11): 107-111.
- WANG Guo-juan, LÜ Wen-hong, GAO Ge, et al. Study on Detour Scheme for Failure of Transit Station Based on Complex Network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (11): 107-111.
- [19] 王德龙, 王超峰. 基于蓄意攻击下的民用机场网络级联失效抗毁性分析 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18 (3): 172-178.
- WANG De-long, WANG Chao-feng. Analysis of Cascading Failure and Resistance of Network in Civil Airports Based on Deliberate Attacks [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2020, 18 (3): 172-178.
- [20] 毛剑楠, 刘澜. 城市群客运网络节点重要度识别方法 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (5): 130-137.
- MAO Jian-nan, LIU Lan. Identification Method of Node Importance in Urban Agglomeration Passenger Transport Network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (5): 130-137.
- [21] 李成兵, 魏磊, 高巍, 等. 城市群复合交通网络级联抗毁性 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (6): 95-104.
- LI Cheng-bing, WEI Lei, GAO Wei, et al. Invulnerability of Urban Agglomeration Compound Traffic Network against Cascading Failure [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (6): 95-104.
- [22] 李成兵, 郝羽成, 高巍, 等. 城市群交通网络级联失效建模与可靠性仿真 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (5): 135-141.

- ZHANG Li, YANG Xu, KE Li-li. The Evolutionary Game Simulation on Technology Innovation between Government and Small and Medium-sized Enterprises [J]. Science and Technology Management Research, 2017, 37 (12): 15-23.
- [16] 李柏洲, 王雪, 苏屹, 等. 我国战略性新兴产业间供应链企业协同创新演化博弈研究 [J]. 中国管理科学, 2021, 29 (8): 1-12.
- LI Bai-zhou, WANG Xue, SU Yi, et al. Evolutionary Game Research on Collaborative Innovation of Supply Chain Enterprises from Different Strategic Emerging Industries in China [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29 (8): 1-12.
- [17] 朱立龙, 孙淑慧. 消费者反馈机制下食品质量安全监管三方演化博弈及仿真分析 [J]. 重庆大学学报 (社会科学版), 2019, 25 (3): 94-107.
- ZHU Li-long, SUN Shu-hui. Tripartite Evolution Game and Simulation Analysis of Food Quality and Safety Supervision under Consumer Feedback Mechanism [J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2019, 25 (3): 94-107.
- [18] 唐红涛, 郭凯歌. 电子商务市场监管三方演化博弈及仿真分析 [J]. 商学研究, 2020, 27 (2): 34-45, 78.
- TANG Hong-tao, GUO Kai-ge. Three-party Evolutionary Game and Simulation Analysis of E-commerce Market Supervision [J]. Commercial Science Research, 2020, 27 (2): 34-45, 78.
- [19] 杨扬, 徐新扬. 基于博弈理论的甩挂运输企业联盟条件与合作演化研究 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (5): 140-148.
- YANG Yang, XU Xin-yang. Study on Conditions and Cooperative Evolution of Alliance of Trailer Pick-up Transport Enterprises Based on Game Theory [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (5): 140-148.

(上接第 170 页)

- LI Cheng-bing, HAO Yu-cheng, GAO Wei, et al. Cascade Failure Modeling and Reliability Simulation of Urban Agglomeration Transportation Network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (5): 135-141.
- [23] 李成兵, 张帅, 杨志成, 等. 蓄意攻击下城市群客运交通网络级联抗毁性仿真 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19 (2): 14-21.
- LI Cheng-bing, ZHANG Shuai, YANG Zhi-cheng, et al. Invulnerability Simulation in Urban Agglomeration Passenger Traffic Network under Targeted Attacks [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19 (2): 14-21.
- [24] 安静思. 基于用户影响力和潜在因子的协同过滤推荐方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- AN Jing-si. Recommended Collaborative Filtering Method Based on User Influence and Potential Factors [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [25] 刘浩然, 王星淇, 邓玉静, 等. 基于级联失效的有向无标度网络节点重要度评价模型 [J]. 电信科学, 2020, 36 (2): 43-51.
- LIU Hao-ran, WANG Xing-qi, DENG Yu-jing, et al. Evaluation Model of Node Importance in Directed Scale-free Network Based on Cascade Failure [J]. Telecommunications Science, 2020, 36 (2): 43-51.