

# 基于流量可调重分配的级联失效模型

郑长江, 陶童统, 陈志超

(河海大学土木与交通学院, 南京 210098)

**摘要:**为提高城市道路交通网络可靠性,减少级联失效对网络造成的危害,本文对城市路网级联失效进行研究。首先,构建具有双层网络结构特性的城市道路交通网络模型。其次,根据容量-流量模型以及城市路网特点,建立城市道路交通网络级联失效模型。再次,利用网络效率、网络阻塞程度、网络通行质量、正常节点比 4 个指标对网络可靠性进行评估,分析了不同攻击策略、拥堵失效阈值对道路交通网络可靠性的影响。最后,以上海市某区域道路交通网络为例进行案例仿真分析。仿真结果表明:选择性攻击下网络的可靠性更低;失效阈值越小,网络的可靠性越高,级联失效抗毁性越强。研究结果对提高城市道路交通网络可靠性和增强网络级联失效抗毁性具有重要的现实意义。

**关键词:**交通运输规划与管理;级联失效;网络拥堵;可靠性;复杂网络;仿真

**中图分类号:**U491.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2024)09-2441-10

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221397

## Cascading failure model based on adjustable redistribution of traffic flow

ZHENG Chang-jiang, TAO Tong-tong, CHEN Zhi-chao

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to improve the reliability of urban road network and reduce the damage caused by cascading failure to the network, the cascading failure of urban road network is studied. Firstly, the urban road network model with double layer network structure was built. Secondly, based on the capacity-flow model and the characteristics of urban road network, the cascading failure model of urban road network was established. Thirdly, the reliability of urban road network was evaluated by four indexes: network efficiency, congestion degree, network traffic quality and normal node ratio. The reliability of urban road network under different failure strategies and congestion failure thresholds was analyzed. Finally, the Shanghai regional road network was taken as an example to carry out a case study. The simulation results show that the reliability of the network is lower under selective attack. The smaller the failure threshold, the higher the reliability of the network, and the stronger the cascading failure resistance. The results of this paper have important practical significance to improve the reliability of urban road network and enhance the cascading failure resistance.

**收稿日期:**2022-11-02.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(71801079);江苏省交通运输科技项目(2021G09).

**作者简介:**郑长江(1966-),男,教授,博士.研究方向:交通运输规划与管理.E-mail:zhenghhu@sina.com

**Key words:** transportation planning and management; cascading failure; network congestion; reliability; complex network; simulation

### 0 引言

道路网络作为关键基础设施系统的重要组成部分之一,对经济安全、居民生活质量、社会稳定发挥着重要作用。随着我国城市化进程加快和经济的飞速发展,对交通需求的增长促使城市道路网络布局不断扩大,网络密度和复杂性不断提高,维护好城市道路网络具有重要意义。由于突发事件、灾害天气、恐怖袭击等,交通网络中部分交叉口、路段发生拥堵或瘫痪,交通流量重新分配后导致其他交叉口、路段发生拥堵或瘫痪,由此引发一系列连锁效应,这一现象被称作级联失效。对城市道路网络的级联失效作用机理进行分析,可以对网络抗毁性进行及时评估,提高道路网络抵抗突发情况的能力,减少级联失效带来的损失。因此,对城市道路网络级联失效的研究具有重要的现实意义和理论价值。

自从 Motter 等<sup>[1]</sup>提出经典的容量-负载线性模型(ML 模型)以来,国内外对网络级联失效的研究越来越广泛。种鹏云等<sup>[2]</sup>发现不同袭击次数、节点的度、容量系数和规划方式都会对级联失效带来不同的影响。Zhang 等<sup>[3]</sup>分析了不同的攻击策略、耦合强度、攻击路段数对级联失效的影响作用。刘朝阳等<sup>[4]</sup>采用改进的边权函数来分析节点状态变化,进而产生流量的重分配。李成兵等<sup>[5]</sup>以不同的攻击策略、容量系数、地理距离权重和节点度权重进行仿真,以网络效率作为可靠性测度指标。李锴等<sup>[6]</sup>在不完全信息条件下,提出一种失效节点负荷局部再分配模型,并将网络连通熵作为网络连通性指标。郝羽成等<sup>[7]</sup>认为即使负载大于容量,节点也并非会一定失效,只是运行效率降低并且存在一定的失效风险,并考虑节点的负载冗余能力,即为节点的过载状态。

传统复杂网络抗毁性研究主要基于网络静态连通性,而忽视了网络动态特征,实际网络具有显著的动态性,拓扑结构的改变会影响网络中的交通流、信息流或数据流,从而引发级联失效现象<sup>[8]</sup>。Qian 等<sup>[9]</sup>结合网络动态特征分析了城市道路网络的时延性、可恢复性等特点对级联失效的影响。以往研究大多认为网络节点或边的容

量不变,这一假设在道路网络中与实际不相符。实际上城市道路网络中存在拥堵效应,交通拥堵的传播会引起路网容量发生变化,交叉口或路段容量的变化亦将影响拥堵传播的后果<sup>[10]</sup>。与此同时,网络阻抗会影响路网流量的分配,随着路段流量的增大,路段阻抗也将增大,路段阻抗增加会反过来作用于路段流量的分配<sup>[11]</sup>。

因此,针对交通拥堵的传播会引起路网容量发生变化这一现象,本文建立了由上层出行网络和下层道路网络组成的双层网络,结合道路网络双层网络结构特性,构建了城市道路网络级联失效模型。考虑了容量随拥挤程度的变化而变化的情形,并利用阻抗函数对节点和边进行加权,从动态角度分析级联失效动力学机理。最后,基于城市道路网络,研究不同攻击策略、拥堵失效阈值对道路网络可靠性的影响,对提升道路网络可靠性和级联失效抗毁性提供了良好的理论依据。

### 1 城市道路网络模型构建

城市道路网络具有双层网络结构特性,上层网络为出行网络  $G_{OD}$ ,下层网络为道路网络  $G_R$ 。上下层网络相互影响,出行网络决定道路网络上的流量分配,道路网络的变化会影响出行路径的选择<sup>[12]</sup>。因此,本文建立由上层出行网络和下层道路网络组成的双层网络(见图 1)。其中,道路网络中节点表示交叉口,边表示路段,出行网络中节点表示交通起讫(OD)点,边表示 OD 需求,即出行需求。其中,将道路网络表示为无向网络

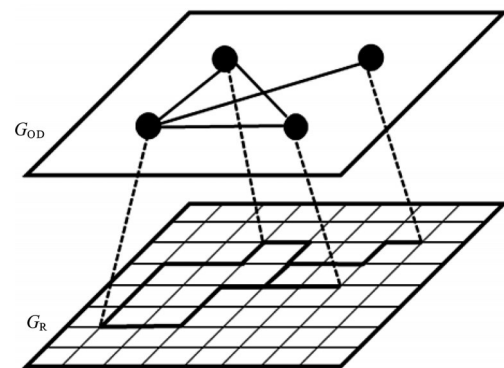


图 1 双层网络模型

Fig. 1 Model of double network

$G_R = \{V, Edge, S, \Gamma\}$ 。  $V = \{v_i, i = 1, 2, \dots, n\}$  为节点集,  $|V| = n$ ;  $Edge = \{e_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n\}$  为边集,  $|Edge| = m$ ;  $S = \{s_i, i = 1, 2, \dots, n\}$  为点权集,  $\Gamma = \{\gamma_{ij}, i = 1, 2, \dots, n\}$  为边权集。

## 2 城市道路交通网络级联失效模型

本文通过对实际路网运行特征的分析,构建城市道路交通网络级联失效模型,并考虑到拥堵情形在网络动态演化过程中的影响作用,对城市道路交通网络级联失效现象进行分析。本节将对城市路网级联失效模型作用机理进行分析和说明。

### 2.1 容量流量模型

#### 2.1.1 初始容量流量

假设节点(边)的初始容量为  $Cv_i(0)$  ( $Ce_{ij}(0)$ ),根据给定的节点(边)初始容量,同时基于ML线性模型分配初始流量  $Lv_i(0)$  ( $Le_{ij}(0)$ )。节点(边)的初始流量和初始容量存在以下线性关系:

$$Cv_i(0) = \begin{cases} (1 + \alpha)Lv_i(0), & Lv_i(0) > Lv_0 \\ (1 + \alpha)Lv_0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1a)$$

$$Ce_{ij}(0) = \begin{cases} (1 + \alpha)Le_{ij}(0), & Le_{ij}(0) > Le_0 \\ (1 + \alpha)Le_0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1b)$$

式中:  $\alpha \geq 0$  为容量参数,表示处理流量的能力水平。本文对  $\alpha$  在级联失效过程中的影响作用不作讨论,令  $\alpha = 0.2$  为一定值。

#### 2.1.2 容量更新方法

假设当节点(边)上出现拥堵情形时,即  $Lv_i(t) > Cv_i(t)$  ( $Le_{ij}(t) > Ce_{ij}(t)$ ),节点(边)的容量将受路段拥堵影响发生改变。节点(边)的容量更新方法如下:

$$Cv_i(t+1) = \begin{cases} Cv_i(0) \frac{Cv_i(t)}{Lv_i(t)}, & Lv_i(t) > Cv_i(t) \\ Cv_i(0), & \text{其他} \end{cases} \quad (2a)$$

$$Ce_{ij}(t+1) = \begin{cases} Ce_{ij}(0) \frac{Ce_{ij}(t)}{Le_{ij}(t)}, & Le_{ij}(t) > Ce_{ij}(t) \\ Ce_{ij}(0), & \text{其他} \end{cases} \quad (2b)$$

### 2.2 交通流量分配

在根据OD流量需求对网络进行配流时,考虑网络节点(边)的阻抗对最优路径选择的影响,

最优路径即通行时间最短路径,将节点(边)的阻抗表示为节点(边)的权值。采用美国联邦公路局的BPR阻抗函数表示节点(边)权值变化:

$$s_i(t) = s_i(0) \left[ 1 + a \left( \frac{Lv_i(t)}{Cv_i(t)} \right)^b \right] \quad (3a)$$

$$\gamma_{ij}(t) = \gamma_{ij}(0) \left[ 1 + a \left( \frac{Le_{ij}(t)}{Ce_{ij}(t)} \right)^b \right] \quad (3b)$$

式中:参数  $a$  和  $b$  通常取值为 0.15 和 4;  $s_i(0)$  ( $\gamma_{ij}(0)$ ) 为节点(边)的初始阻抗,表示自由流时间,此时近似认为节点(边)的阻抗为 0。出现拥堵状况时,节点(边)的阻抗变大,表现为通过该节点(边)的时间延长。该模型通过利用阻抗函数对节点(边)加权的方式反映通行速度、车流量、车辆密度、交通拥堵等因素对道路交通网络带来的影响。交通流量分配步骤具体如下:

Step1 网络初始化,确定网络初始容量  $Cv_i(0)$  ( $Ce_{ij}(0)$ )、初始流量  $Lv_i(0)$  ( $Le_{ij}(0)$ )、初始阻抗  $s_i(0)$  ( $\gamma_{ij}(0)$ )。

Step2 应用Floyd算法计算所有OD间最小阻抗路径。

Step3 将OD流量需求分配到相应最小阻抗路径上。

### 2.3 节点(边)的状态

现有研究大多认为节点和边有“正常”和“失效”两种状态,为了更加切合实际,种鹏云等<sup>[2]</sup>认为,网络节点状态除了“正常”和“失效”,还存在一种处于两者之间的“暂停”状态,当节点负载减少后,“暂停”状态节点会逐渐恢复到“正常”状态。在本文中,节点(边)状态集为  $\{0, 1, 2\}$ , 0 表示失效, 1 表示正常, 2 表示拥堵。假设当节点(边)上负载大于其初始容量时,由于网络具有可恢复性,节点(边)不会立即失效,而是处于拥堵状态。此时的拥堵分为两种情况:一是拥堵从拥堵点开始,逐渐蔓延到邻近路段,由于路网的流通性拥堵又会慢慢消散;二是节点(边)上的拥堵会以一定方式在网络上扩散,当节点(边)拥堵程度达到失效阈值时,节点(边)失效。令失效阈值为  $\delta$  ( $\delta > 1$ ),当  $L(t)/C(t) > \delta$  时,节点(边)失效。阈值大小与交通管理及控制水平有关,失效阈值越小,表明交通管理与控制水平越高;相反,阈值越大,表明交通管理与控制水平越低,路段越容易失效<sup>[13]</sup>。当  $\delta$  无限接近于 1 时,认为这时的交通管

理与控制水平最高,网络一旦发生拥堵,交通管理人员便会立即对拥堵路段进行车流量控制,但在实际城市路网中,由于人员有限,同时考虑管理成本等因素, $\delta$ 无限接近于1只是一种理想状态。节点(边)状态图如图2所示。

节点(边)失效状态存在两种情形:一种是突发事件、灾害天气、恐怖袭击等导致的失效;另一种是拥堵达到节点(边)失效阈值导致的失效。这两种失效状态都具有扩散效应。该模型考虑了城市道路交通网络拥堵传递过程,并将其视为一种特殊的级联失效现象,这种现象在实际交通网络中很常见。本文考虑的交通拥堵是指交通量达到了道路最大通行能力、交通运行对干扰很敏感,并很容易出现塞车现象的拥堵状态。

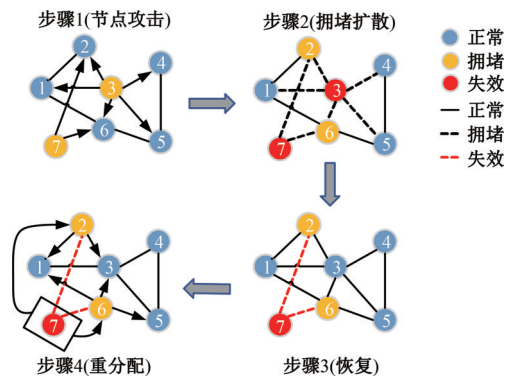


图2 节点(边)状态图

Fig. 2 Diagram of node(edge) state

### 2.4 流量重分配原则

流量重分配方法主要有3种,分别是最近邻重分配、全局重分配和可调重分配。最近邻重分配是在节点失效后其负载由其最近邻节点承载;全局重分配是将失效节点的负载分配给网络中的所有完好节点;可调重分配中负载不仅分配给失效节点的邻居节点,还会将一部分负荷分配到其次近邻或者距离失效节点更远的节点。在研究道路交通网络时,最近邻重分配和全局重分配属于两种极端情形,可调重分配更加符合现实路网的分配方式<sup>[14]</sup>,其中有学者利用地理距离和节点度来表示流量分配时的优先级<sup>[5]</sup>。本文在可调重分配的基础上,引入节点(边)阻抗,在确定最小阻抗路径后,对流量进行重分配。流量重分配方式如图3所示。

本文的流量再分配方式是在利用Floyd算法重新确定最小阻抗路径后,将失效节点和边上流量分配到路径经过的所有节点和边,流量重分配

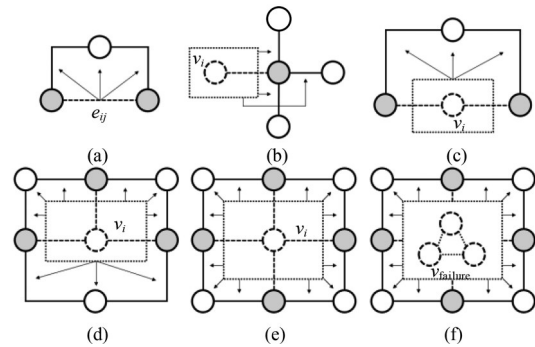


图3 流量重分配示意图

Fig. 3 Diagram of flow redistribution

的范围介于全局分配与最近邻分配之间。如图3(a)所示,当边 $e_{ij}$ 失效时,边上流量转移到两端节点 $v_i$ 和 $v_j$ 之间最小阻抗路径。图3(b)~(f)为节点失效的5种情形,图3(b)~(e)为失效节点拥有不同数量相邻节点的流量分配方式,图3(f)为有多个相连节点同时失效时的流量分配方式。如图3(b)所示,当节点 $v_i$ 失效时,节点 $v_i$ 相连的边同时失效,失效节点和边的全部流量将转移到相邻节点及其边上。图3(c)~(f)中,节点失效后,节点相连的边同时失效,失效节点和边上全部流量转移到相邻节点对之间的最小阻抗路径上。按此分配方式得到网络中其他完好节点和边更新后的流量,重新判断路网流量与容量的关系。若流量大于容量,则触发新一轮的流量重分配;若流量小于容量,则节点(边)在此时间步不失效,直至整个网络中所有节点(边)的流量不超过其本身的容量。实际路网中车辆无法获取网络全局的信息,无法及时获得路段失效信息,交通警察会指挥过往车辆选择合适路径绕行,因此有效的流量分配方式对疏解路网车辆起到更好的指引作用。

### 2.5 级联失效可靠性评估指标

本文从网络整体的连通程度和路网通行质量两个方面评估级联失效对城市道路交通网络可靠性的影响,选取网络效率、网络阻塞程度、网络通行质量、正常节点比4个指标对可靠性进行测量。

#### (1) 网络效率 E

网络效率表示网络整体的连通程度,可以有效衡量级联失效给网络带来的破坏性影响,网络效率越高,表明网络的级联失效可靠性越高。一般而言,网络效率与节点对之间最短路径长度的倒数有关,本文用节点对之间最小阻抗代替最短路径长度。

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (4)$$

式中:  $d_{ij}$  为节点  $v_i$  和节点  $v_j$  间最小阻抗;  $n$  为节点数。

(2) 网络阻塞程度  $J$

本文采用阻塞程度指标<sup>[15]</sup>来评估路网通行质量。现有研究大多只考虑了边权,没有考虑交叉口延误和通行能力影响<sup>[16]</sup>,这与实际不符,在城市实际路网中,交叉口拥堵是引发路网级联拥堵的主要原因之一。基于此,本研究采用改进的阻塞程度  $J$  作为道路交通网络级联失效量化指标,使其将节点和边的拥堵情况同时考虑在内。

$$J(t) = \frac{\sum_i L v_i(t) s_i(t) + \sum_{i,j} L e_{ij}(t) \gamma_{ij}(t)}{\sum_i L v_i(0) s_i(0) + \sum_{i,j} L e_{ij}(0) \gamma_{ij}(0)} \quad (5)$$

(3) 网络通行质量  $Q$

网络通行质量是指 OD 单位流量从起点出发到达讫点的平均行驶时间,该指标可以反映道路网络的服务质量水平。 $Q$  越大,表明平均行驶时间越长,网络服务质量水平越低。

$$Q(t) = \frac{\sum L_{OD}(t) T_{OD}(t)}{\sum L_{OD}(t)} \quad (6)$$

式中:  $Q(t)$  为  $t$  时刻的网络通行质量;  $L_{OD}(t)$  为  $t$  时刻 OD 单位流量;  $T_{OD}(t)$  为  $t$  时刻 OD 单位流量的通行时间。

(4) 正常节点比  $P$

正常节点比是指交通网络中处于正常状态的节点占总节点数的比值。正常节点比表示正常节点规模,反映级联失效对网络的影响。当  $P$  越小时,表明级联失效对网络的破坏性越强,网络抗毁性越低。

$$P(t) = \frac{n_i(t)}{n} \quad (7)$$

式中:  $P(t)$  为  $t$  时刻的正常节点比;  $n_i(t)$  为  $t$  时刻处于正常状态的节点个数;  $n$  为网络节点总数。

2.6 级联失效算法及仿真流程

算法流程如图 4 所示。根据城市道路交通网络级联失效模型,确定级联失效算法如下:

Step1 网络初始化。确定城市道路交通网络结构,设置节点和边的初始容量  $C v_i(0)$  ( $C e_{ij}(0)$ ),按照式(1)赋予网络初始流量  $L v_i(0)$  ( $L e_{ij}(0)$ ),赋予节点初始阻抗  $s_i(0)$ 、边的初始阻抗  $\gamma_{ij}(0)$ 。

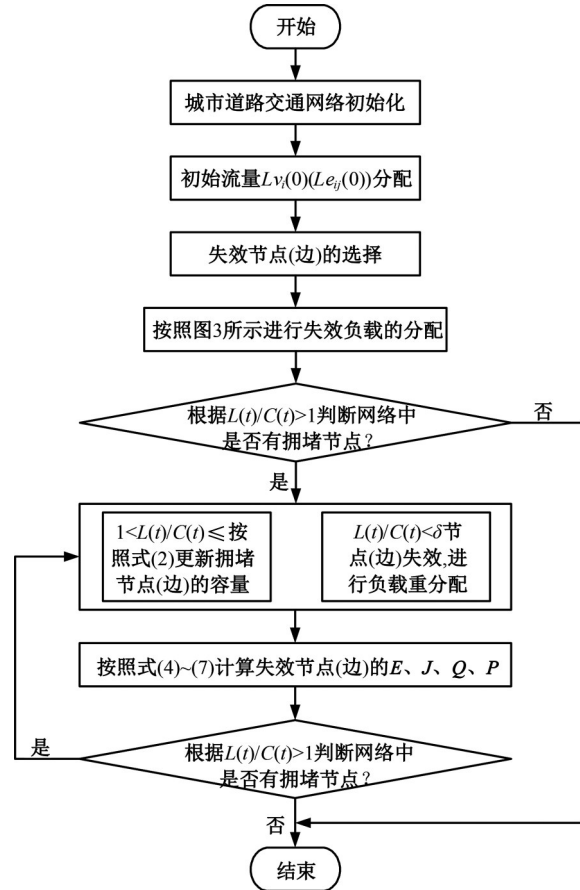


图 4 级联失效算法流程

Fig. 4 Flow chart of cascade failure algorithm

Step2 初始流量分配。应用 Floyd 算法计算所有 OD 间最小阻抗路径,采用 UE(用户均衡)准则对 O、D 间的 OD 流量进行分配,更新节点(边)流量。

Step3 失效节点(边)的选择。在  $t$  时刻从网络中选取一个节点(边)  $v_i(e_{ij})$  作为失效节点(边),其上的负载为  $L v_i(t)$  ( $L e_{ij}(t)$ )。

Step4 失效负载的分配。在  $t+1$  时刻,依据可调重分配原则,引入节点(边)阻抗,在确定最小阻抗路径后,对流量进行重分配。流量重分配方式如图 3 所示。

Step5 失效的传播。统计网络中拥堵的节点和边,即流量大于其容量的节点(边)。若网络中没有拥堵节点(边),直接进入下一步。若存在拥堵节点(边),当节点(边)拥堵程度在失效阈值  $\delta$  内时,节点(边)不会立即失效,而是处于拥堵状态,并按照式(2)更新拥堵节点(边)的容量;当节点(边)拥堵程度达到失效阈值,即  $L(t)/C(t) > \delta$  时,节点(边)失效,并将失效节点(边)的负载进行重分配。

Step6 失效后果的评估。根据式(3)阻抗函数更新节点(边)的阻抗。按照式(4)~(7)计算网络效率 $E$ 、网络阻塞程度 $J$ 、网络通行质量 $Q$ 和正常节点比 $P$ 。

Step7 重复 Step2~Step6,直至将 OD 流量需求全部分配到路网中,算法结束。

级联失效仿真考虑节点(边)拥堵失效情形,当节点(边)拥堵程度达到失效阈值时,节点(边)拥堵失效。根据上述算法,在完成 Step1 网络初始化之后,按照一定策略选择网络节点(边)失效,然后进行 OD 流量分配,运行算法,当出现节点(边)拥堵失效时,移除失效节点(边),并按照流量重分配原则对流量再分配,直至剩余节点(边)流量基本稳定,没有出现新的拥堵失效节点(边),则认为失效过程结束。

### 3 案例仿真

#### 3.1 城市道路交通网络模型构建

本文以上海市某区域道路为对象,构建城市道路交通网络,对路网中节点、边的初始容量、初始流量、初始阻抗按级别进行初始化设定。该道路交通网络包含 67 个节点、114 条边,网络拓扑结构如图 5 所示。城市道路交通网络的构建方式如下:

(1)选取某一城市区域,设置网络边界,利用百度地图 JavaScript API 提取区域路网,对部分单车道、次干路、支路进行合并和简化,将路段抽象成边,交叉路口抽象成节点,绘制网络拓扑结构图。

(2)根据实际道路情况,按照通行能力、通行速度等因素,对节点、边进行分级,分级如图 5 所示。

(3)利用 GIS 技术获取路网中各节点之间的地理距离,按照几何长度<sup>[17]</sup>、道路级别设置节点

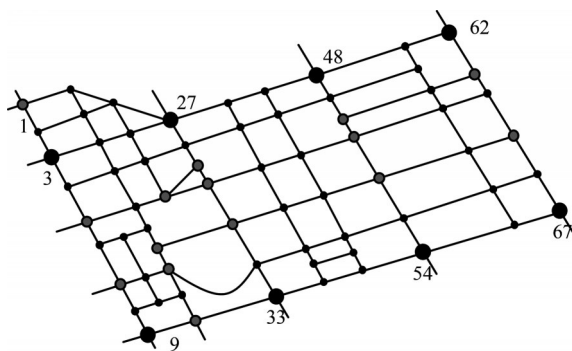


图 5 城市道路交通网络模型

Fig. 5 Model of urban road network

和边的初始容量  $Cv_i(0)$  ( $Ce_{ij}(0)$ )、初始阻抗  $s_i(0)$  ( $\gamma_{ij}(0)$ ),利用容量负荷 ML 模型,根据节点和边的初始容量,初始化节点和边的初始流量  $Lv_i(0)$  ( $Le_{ij}(0)$ ),不同规模等级节点(边)初始化参数如表 1~表 3 所示。

表 1 路段规模等级初始化参数表

Table 1 Initialization parameters of roads under different levels

路段规模等级	初始流量/ [pcu·(h·km) <sup>-1</sup> ]	初始容量/ [pcu·(h·km) <sup>-1</sup> ]	自由行驶速度/(km·h <sup>-1</sup> )
I	5 000	6 000	60
II	3 333	4 000	60
III	1 667	2 000	40
IV	833	1 000	30

表 2 交叉口规模等级初始化参数表

Table 2 Initialization parameters of intersections under different levels

交叉口规模等级	初始流量/ /(pcu·h <sup>-1</sup> )	初始容量/ /(pcu·h <sup>-1</sup> )	直径距离/ /m	初始阻抗/ /s
I	250	300	50	15
II	117	140	35	10
III	42	50	25	5

表 3 部分路网参数表

Table 3 Part of the road network parameters

路段	规模等级	距离长度/ /km	初始流量/ /(pcu·h <sup>-1</sup> )	初始容量/ /(pcu·h <sup>-1</sup> )	初始阻抗/ 抗/s
1-2	I	0.19	950	1 140	11.4
1-13	II	0.23	767	920	13.8
2-14	IV	0.22	183	220	26.4
6-10	III	0.10	167	200	9.0
13-23	II	0.27	900	1 080	16.2
14-23	III	0.21	350	420	18.9
15-16	III	0.22	367	440	19.8
16-17	IV	0.26	217	260	31.2
19-31	II	0.56	1 867	2 240	33.6
22-33	I	0.56	2 800	3 360	33.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

#### 3.2 仿真结果分析

选取(1,67)和(9,62)两条 OD 路径,分别增加 2 000 pcu/h 的 OD 需求,采用 UE 分配方式将 OD 流量分配到路网  $G_R$  中,迭代次数  $t=100$ 。利用 Matlab R2018b 进行仿真模拟随机性攻击条件下和选择性攻击条件下的级联失效过程,得到级联失效可靠性评估指标,并在选择性攻击条件下改变失效阈值  $\delta$ ,分析失效阈值大小对网络可靠

性的影响。

为分析不同攻击策略下城市道路交通网络可靠性,令失效阈值  $\delta = 1.2$ ,改变攻击策略,分别进行可靠性仿真,仿真结果如图 6~9 图所示。网络攻击方式按攻击对象不同可分为攻击节点和攻击边。攻击节点使得节点失效,节点相连所有的边失效;攻击边时,边相连的节点度减小,部分节点间的路径发生改变。为方便起见,使仿真结果更加直观,网络攻击采用攻击节点的方式。节点攻击有两种不同策略,分别为随机性攻击和选择性攻击。随机性攻击时不考虑节点在道路交通网络中的重要性,选取多次攻击结果的平均值作为最终仿真结果。选择性攻击时选择移除重要性高的节点,并以节点度、节点强度及介数中心性来反映节点在网络中的重要性,找出交通网络中的关键节点。评价结果如表 4 所示,节点数和介数中心性均有多个节点数值并列最大,如节点 11、节点 31 等,节点 33 是节点强度最大的节点。

表 4 节点重要度排序

Table 4 Ranking of node importance

节点 排序	节点度		节点强度		介数中心性	
	节点编号	数值	节点编号	数值	节点编号	数值
1	11	4	33	5 850	11	4 072
2	14	4	27	5 517	31	4 072
3	15	4	31	5 467	35	4 072
4	27	4	22	5 033	52	4 072
5	31	4	54	4 400	59	4 072
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

由图 6 可以看出,选择性攻击条件下的网络效率更低,网络可靠性更低。随着迭代次数的增大,OD 流量增多,网络效率变化呈现先下降较平缓、后下降较快速趋势,可以看出网络效率变化存在阈值,在  $t = 60$  后网络效率急剧下降,在  $t = 95$  左右变化趋于稳定。攻击策略不同,网络效率最终稳定水平也不同,选择性攻击下网络效率最终稳定水平更低。

由图 7 可以看出,  $t = 30$  前两种攻击策略下阻塞程度上升较为缓慢,此时网络自身的可靠性对道路拥堵引发的级联失效具有一定抵抗能力。在  $t = 30$  之后选择性攻击下阻塞程度陡然上升,与选择性攻击不同,随机性攻击对网络阻塞程度的影响更小,部分节点的拥堵失效产生的级联效应较小,这部分节点的失效对网络带来的拥堵压力较小,不会带来网络大规模拥堵现象。当攻击重要性高的节点时,节点失效会给网络带来严重的级联效应,网络会发生大规模的拥堵现象,阻塞程度呈指数式上涨,并因此导致更多的节点拥堵失效,直至网络整体瘫痪。

由图 8 可以看出,随机性攻击下网络通行质量更高,相同起讫点下行驶所需时间更短,表明随机性攻击下道路交通网络服务质量水平比选择性攻击下要高。同时可以看出,网络通行质量具有阶段性分布特点,当某条最小阻抗路径因流量过大导致拥堵失效时,更新最小阻抗路径后网络通行质量会发生跳跃性变化。

由图 9 可以看出,相同迭代次数时随机性攻击下正常节点比普遍比选择性攻击下的要高,反映出随机性攻击下网络的可靠性更高,级联失效对网络造成的破坏比选择性攻击下更小。综上,重要性高的节点失效对网络的整体破坏性更强,影响范围更广,选择性攻击下网络的可靠性更低,级联失效抗毁性更弱。因此,在城市道路交通网

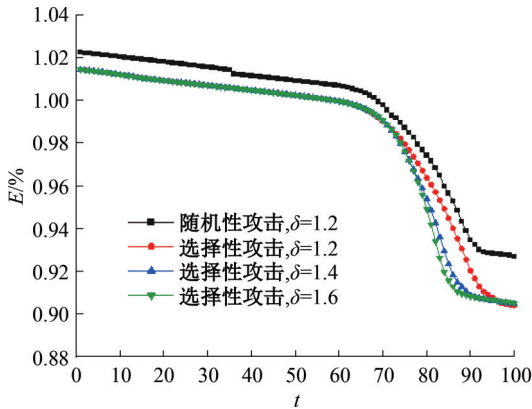


图 6 不同失效条件下网络效率  
Fig. 6 Network efficiency under different failure conditions

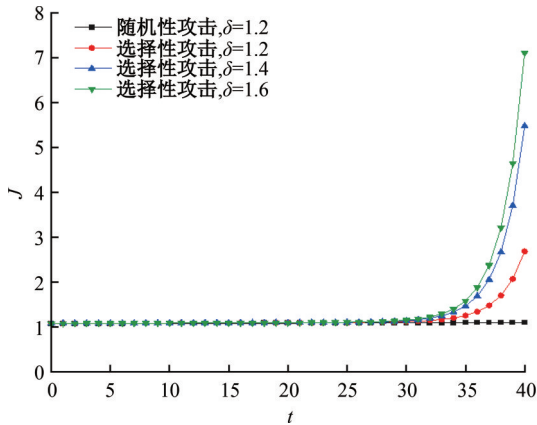


图 7 不同失效条件下阻塞程度  
Fig. 7 Congestion degree under different failure conditions

络实际管理过程中,应加强对重要路段的管理和保护,防止因重要路段的失效引发大规模的拥堵甚至瘫痪。

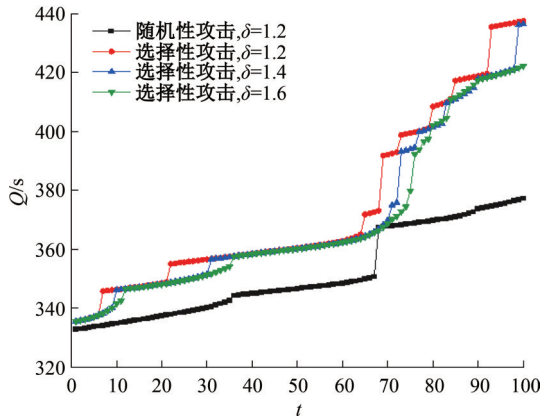


图8 不同失效条件下网络通行质量

Fig. 8 Network traffic quality under different failure conditions

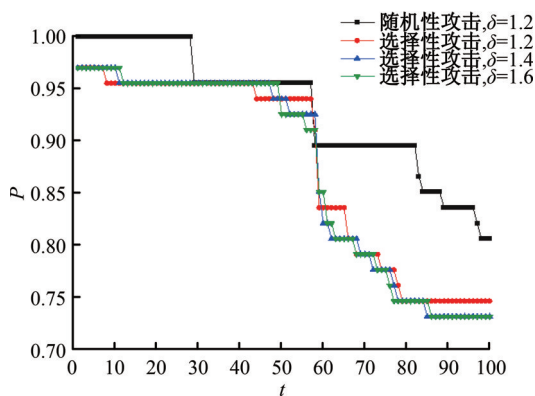


图9 不同失效条件下正常节点比

Fig. 9 Normal node ratio under different failure conditions

为分析级联失效过程中,失效阈值对城市道路网络可靠性的影响,在选择性攻击情况下,令失效阈值 $\delta$ 分别为1.2、1.4、1.6,分别进行可靠性仿真,仿真结果如图6~图9所示。由上文可知,失效阈值越小,表明交通管理与控制水平越高,分析失效阈值对网络可靠性的影响,即是分析交通管理与控制水平对网络可靠性的影响。

由图6可知,不同失效阈值条件下,网络效率下降的总体趋势基本相同,只有在经过 $t=60$ 这一拐点后,网络效率才会呈现明显差异,此时失效阈值越大,交通管理与控制水平越低,网络效率越低。在选择性攻击情况下,失效阈值的大小对网络效率的作用有限,只有在网络效率下降到某一阈值后,失效阈值的大小对网络效率带来的影响才会有明显差异。

由图7可以看出,失效阈值越高,交通管理与控制水平越低,阻塞程度的增长趋势越快。对网络的管理与控制可以在一定程度上减缓级联效应,提高网络的可靠性,管理控制水平越高,对级联失效的抗毁性越强。

由图8可以看出,在网络通行质量发生跳跃性变化时,失效阈值越小,网络通行质量变化得越早,表现为车流量更早选择新的路线。这与实际情况相符,当道路交通发生拥堵时,交通警察越早进行交通管控,后续车流越早改变行驶路线;与之相反,当拥堵路段得不到及时管控时,后续车流仍会继续涌向拥堵路段,进而造成道路拥堵情况加重。图8同时反映出,网络通行质量下降,即OD行驶所需时间越长,不一定代表网络可靠性降低,相反,网络通行质量下降有时也意味着交通管理者对网络的管理与控制更及时,管理水平更高。

由图9可以看出,失效阈值越小,前半段仿真过程中正常节点比下降得更快,后半段仿真过程正常节点比更高。当失效阈值越小时,交通管理与控制水平越高,在初期会因为管控行为导致更多路段进入拥堵失效状态,但随着级联失效过程的持续,交通管理与控制水平高带来的积极作用逐渐显现出来,提升了网络的可靠性和抗毁性,有效抑制级联效应对网络造成的破坏程度。因此,在面对城市道路交通网络级联失效时,加强交通管理与控制水平,使失效阈值更低,更早采取应急措施,可以有效缓解级联效应给网络带来的负面影响,提高网络的可靠性和级联失效抗毁性。

## 4 结束语

城市道路交通具有车流量大、路况复杂的特点,突发事件的发生很容易造成网络大规模拥堵,甚至瘫痪。本文结合道路网络双层网络结构特性,首先构建了城市道路交通网络级联失效模型,确立了交通流量分配方式,以及流量重分配方式,并考虑了拥堵导致容量变化的情形;其次,利用上海市某区域道路交通网络进行实证仿真,仿真模拟随机性攻击条件下和选择性攻击条件下的级联失效过程,以及选择性攻击条件下不同失效阈值的级联失效过程;最后,利用网络可靠性评估指标分析攻击策略、失效阈值对网络可靠性的影响。

随机性攻击时不考虑节点(边)在道路交通网络中的重要性,选取多次攻击结果的平均值作为

最终仿真结果;选择性攻击按照节点度、节点强度及介数中心性的大小依次选择移除重要性高的节点。仿真结果表明:随机性攻击对网络带来的拥堵压力较小,选择性攻击时网络会发生大规模的拥堵现象,造成的道路拥堵情况更严重,对网络的破坏性更强,重要性高的节点失效时网络可靠性更低,网络抗毁性较弱;失效阈值越小,交通管理与控制水平越高,网络的可靠性越高;加强对网络拥堵的管理与控制水平,可以有效缓解网络拥堵状况,减小级联失效的破坏范围,提高网络可靠性和级联失效抗毁性。

#### 参考文献:

- [1] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(6): 65102.
- [2] 种鹏云,帅斌. 连环恐怖袭击下危险品运输网络级联失效建模[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(4): 245-251.  
Chong Peng-yun Y, Shuai Bin. Model of cascading failure in hazardous materials transportation network under series of terrorist attacks[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2014, 34(4): 245-251.
- [3] Zhang Y N, Lu Y R, Lu G Q, et al. Analysis of road traffic network cascade failures with coupled map lattice method[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015(4): 1-8.
- [4] 刘朝阳,吕永波,刘步实,等. 城市轨道交通网络级联失效抗毁性研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(5): 86-91.  
Liu Zhao-yang, Lyu Yong-bo, Liu Bu-shi, et al. Cascading failure resistance of urban rail transit network[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(5): 86-91.
- [5] 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): 139-145.  
Li Cheng-bing, Hao Yu-cheng, Gao Wei, et al. Modelling of cascading failure and reliability simulation of urban agglomeration traffic network[J]. *Highway Traffic Technology*, 2018, 35(5): 139-145.
- [6] 李锴,何永锋,吴纬,等. 面向级联失效的复杂层次网络可靠性[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2018, 46(9): 50-56.  
Li Kai, He Yong-feng, Wu Wei, et al. Reliability of complex hierarchical network for cascading failure[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(9): 50-56.
- [7] 郝羽成,李成兵,魏磊. 考虑节点过载的复杂网络级联失效模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(10): 131-136.  
Hao Yu-cheng, Li Cheng-bing, Wei Lei. Cascading failure model of complex networks considering overloaded nodes[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(10): 131-136.
- [8] 谢丰,程苏琦,陈冬青,等. 基于级联失效的复杂网络抗毁性[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2011, 51(10): 24-29.  
Xie Feng, Cheng Su-qi, Chen Dong-qing, et al. Cascade-based attack vulnerability in complex networks[J]. *Tsinghua University (Sci & Tech)*, 2011, 51(10): 24-29.
- [9] Qian Y S, Wang B B, Xue Y, et al. A simulation of the cascading failure of a complex network model by considering the characteristics of road traffic conditions [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 80(1): 413-420.
- [10] 王正武,王杰,黄中祥. 考虑级联失效影响的城市道路网络容量研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(3): 129-135.  
Wang Zheng-wu, Wang Jie, Huang Zhong-xiang. Study on capacity of urban road network considering cascading failure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(3): 129-135.
- [11] 周振宇. 路网级联失效预防及修复策略研究[D]. 长沙:长沙理工大学交通运输工程学院, 2015.  
Zhou Zhen-yu. Strategies to prevent and repair the road network cascade failure[D]. Changsha: School of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, 2015.
- [12] 王正武,况爱武,王贺杰. 考虑级联失效的交通网络节点重要度测算[J]. *公路交通科技*, 2012, 29(5): 100-105, 124.  
Wang Zheng-wu, Kuang Ai-wu, Wang He-jie. Calculation of traffic network node importance of cascading failure[J]. *Highway Traffic Technology*, 2012, 29(5): 100-105, 124.
- [13] 王正武,王杰,黄中祥. 控制城市道路交通网络级联失效的关闭策略[J]. *系统工程*, 2016, 34(2): 107-112.  
Wang Zheng-wu, Wang Jie, Huang Zhong-xiang. Closing strategies to control cascading failure in urban road traffic networks[J]. *System Engineering*, 2016, 34(2): 107-112.
- [14] 段东立,武小悦. 基于可调负载重分配的无标度网

- 络连锁效应分析[J]. 物理学报, 2014, 63(3): 47-57.
- Duan Dong-li, Wu Xiao-yue. Cascading failure of scale-free networks based on a tunable load redistribution model[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(3): 47-57.
- [15] Li B L, Li F, Wang R Y. Modeling capacity of road network based on level of service of network[C]// 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, China, 2008: 626-630.
- [16] 高明霞, 贺国光. 考虑交叉口延误与通行能力的疏散路线与出发时间优化研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2010, 34(5): 179-183.
- Gao Ming-xia, He Guo-guang. Optimizing evacuation routes and departure schedules in view of delay and capacity of intersections[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2010, 34(5): 179-183.
- [17] 李彦瑾, 罗霞, 王莹. 考虑多节点拥堵的城市道路网级联失效仿真[J]. 工业工程, 2018, 21(4): 4-10.
- Li Yan-jin, Luo Xia, Wang Ying. A cascading failure simulation of urban road network considering multi-node congestion[J]. Industrial Engineering Journal, 2018, 21(4): 4-10.