

文章编号:1671-1637(2019)06-0163-08

## 基于密度熵的道路交通事故影响范围分区模型

刘伟<sup>1</sup>, 陈科全<sup>1,2</sup>, 田宗忠<sup>3</sup>, 彭博<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189;  
3. 内华达大学里诺分校 土木与环境工程系, 内华达 里诺 89557)

**摘要:**考虑路径阻抗的动态变化,定义了网络初始荷载;以事故持续时间为变量,采用前景理论确定了网络负载重分配的方式;根据交通流密度熵构建了耗散结构模型,并与负载分配过程相结合确定了各路段的交通流密度熵变化率;构建了基于聚类分析的道路交通事故影响范围分区模型,通过仿真试验探讨了不同初始荷载和事故持续时间对分区的影响。仿真结果表明:在交通量基数为  $800 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$  时,事故持续时间从 20 min 增加到 30 min,直接影响区有向路段由 3 个增加到 6 个,间接影响区有向路段由 5 个增加到 18 个,说明受事故影响路段的熵处于快速上升阶段,路网的级联失效不明显;随着交通量基数增加到  $1\,000 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ,事故持续时间从 20 min 增加到 30 min,直接影响区有向路段由 8 个增加到 19 个,间接影响区有向路段由 16 个增加到 21 个,说明交通量对路网的影响主要集中在直接影响区。可见,不同交通情况下,各有向路段受到事故路段的影响程度明显不同,随着事故持续时间与初始流量的加剧,路网中有向路段的受影响程度均增大,因此,采用交通事故影响范围分区能够精细地描述道路运行状态的动态变化过程。

**关键词:**交通安全;交通事故;聚类分析;事故范围分区;耗散理论;级联失效

**中图分类号:**U491.31 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2019.06.015

## Partition model of road traffic accident influence area based on density entropy

LIU Wei<sup>1</sup>, CHEN Ke-quan<sup>1,2</sup>, TIAN Zong-zhong<sup>3</sup>, PENG Bo<sup>1</sup>

(1. College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, Reno, Reno 89557, Nevada, USA)

**Abstract:** The initial load of network was identified based on the dynamic effect of path impedance. The duration of accident was considered as parameter, and the network load redistribution was introduced based on the prospect theory. The dissipative structure model was established by the entropy of traffic flow density, and the change rate of traffic flow density entropy of each road was determined by combined with the load distribution process. The partition model of traffic accident influence area was established based on cluster analysis. The influence of partition was analyzed by simulation experiment under different initial loads and accident durations. Simulation result shows that when the traffic base is  $800 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$  and the accident duration changes from 20 min to 30 min, the number of directed road sections in direct impact area increases from 3 to 6, and the number of directed road sections in indirect impact area

收稿日期:2019-05-26

基金项目:国家自然科学基金项目(61703064);重庆市社会事业与民生保障科技创新专项项目(cstc2015shms-ztxx30015);城市交通管理集成与优化技术公安部重点实验室开放课题(2017KFKT08)

作者简介:刘伟(1978-),男,重庆人,重庆交通大学教授,工学博士,从事交通组织与信号控制研究。

increases from 5 to 18, indicating that the entropy of road section affected by accident is on an upward trend and the cascading failure of road network is not obvious. When the traffic base rises to  $1\ 000\ \text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$  and the accident duration changes from 20 min to 30 min, the number of directed road sections in direct impact area increases from 8 to 19, and the number of directed road sections in indirect impact area increases from 16 to 21, indicating that the effect is concentrated on the direct impact area. Therefore, the influence degree of each directed road section affected by accident is obviously different under different traffic situations. With the increases of accident duration and initial traffic flow, the influence degree of accident on directed road sections increases. Therefore, the partition of traffic accident influence area can precisely describe the dynamic evolution process of road traffic performance. 3 tabs, 6 figs, 30 refs.

**Key words:** traffic safety; traffic accident; cluster analysis; accident range partition; dissipative theory; cascading failure

**Author resume:** LIU Wei(1978-), male, professor, PhD, neway@cqjtu.edu.cn.

## 0 引 言

随着城市快速发展,交通需求迅速增加,道路交通事故也愈发频繁。交通事故在造成严重的财产损失和生命安全的同时,对周边区域的交通运行也带来了负面的影响,导致路段无法消散交通流,车辆排队引发其他相关道路的交通拥堵,甚至交通中断,从而诱发一系列连锁反应。为了降低交通事故对城市交通系统的影响,首先需要明确交通事故对周边路网的影响范围,以及影响范围内各条道路与事故道路的关联关系,这对及时采取有效的交通诱导措施,防止拥堵流进一步扩散有重要的理论和实际意义。

分析国内外学者对交通事故影响范围的研究可以发现,宏观基本图<sup>[1-5]</sup>和三相理论<sup>[6-10]</sup>为拥堵交通流的演变提供了研究基础。Tian 等利用元胞自动机仿真再现了拥堵流下交通运行状态转变过程<sup>[11]</sup>,并在其基础上引入了安全速度和 Logistic 函数,能够较好地再现交通流在时空中的传播模式<sup>[12]</sup>;以速度图为基础,Chung 等基于环形线圈数据构建了二进制整数模型(Binary Integer Programming, BIP),以延误为指标研究了交通事故的影响范围<sup>[13]</sup>,并从时空的角度优化了 BIP 模型,研究结果能够估计事故造成的最大拥堵距离和持续时间<sup>[14]</sup>;Wang 等认为事故影响范围的关键在于影响范围的形状与交通流的波动是否保持一致,为此提出了带有约束的 BIP 模型,可用来估计交通事故的影响范围,相比于 Chung 等的研究在计算时间和约束条件均有一定程度的优化<sup>[15]</sup>。

上述研究成果均以高速公路作为研究背景,然而针对城市道路而言,交通事故影响范围更容易受

到路网拓扑结构的影响,Marshall 等分析了美国加利福尼亚州 24 个城市 11 年间碰撞的地理数据,研究结果发现路网结构对交通安全有重要的影响<sup>[16]</sup>;Zhang 等通过分析加利福尼亚州的数据,研究了路网结构特征对人和自行车的安全性<sup>[17]</sup>;复杂网络理论为交通流的演变研究提供了理论基础,Sun 等以复杂网络理论为基础,研究了事件作用下路网中节点与路段相对于事件地点的关联关系,并构建了 4 个网络特征指标,分别从时间和空间上进行了探讨<sup>[18]</sup>;以实际路网为例,为了缓解坦桑尼亚达累斯萨拉姆市由于事故造成的交通拥堵,Mfinanga 等以排队理论为基础,结合交通事故历史资料,绘制了事故情况下的排队情况图,该方法在没有现代检测器情况下,也能提供精度较高的事故影响范围<sup>[19]</sup>;Hojati 等以行程时间可靠性为评判标准,研究了澳大利亚东部昆士兰州路网的历史数据,建立了事故对行程时间可靠性影响的 Tobit 模型,以此分析交通事故的影响范围<sup>[20]</sup>;Kaddoura 等针对柏林路网,对真实的交通事故进行仿真,以路网中驾驶人的出行时间为指标,研究结果表明交通事故会在其影响范围内导致出行时间增加 5~7 min<sup>[21]</sup>;刘伟等以重庆市渝中区的路网为研究背景,探讨了事故影响下出行者的路径选择,并结合前景理论分析了不同事故持续时间下路网的崩溃情况<sup>[22]</sup>;马壮林等从时间和空间的角度,研究了道路结构、交通运行环境与交通事故之间的关系,从而分析了交通事故起数的时空分布特征<sup>[23]</sup>;金书鑫等采用交通流理论和路阻模型从点、线、面 3 个层面定量的确定了事故范围,并以此设置了交通诱导点<sup>[24]</sup>;肖恢翠等对元胞自动机进行改进,以事故影响长度为评价标准,给出了北京

市局部路网中快速路发生事故后的影响范围<sup>[25]</sup>。

目前,大部分研究主要采用理论模型或仿真方法,研究交通事故发生后交通流的演变规律,得到交通事故的影响范围,但仍需进一步考虑以下问题:确定交通事故影响范围时,明确影响范围内各路段受到事故路段的影响程度,这对采取合理诱导措施有重要的现实意义;事故造成路段通行中断后,强相关道路也会在一段时间后逐渐失去通行能力,产生一系列的连锁反应,同时也会影响拥堵扩散范围。对此,本文在考虑交通事故影响的持续时间和强度的基础上,结合路网拓扑结构以及交通需求,研究了路网的级联失效过程,分析了路段发生事故后路网随时间变化的崩溃过程;以路段为单位,构建了路网的耗散模型;采用路段交通流密度耗散值为参数,基于聚类分析构建了交通事故影响范围内的分区模型,为交通事故发生后实施交通诱导提供理论基础。

## 1 交通事故下城市路网级联失效分析

### 1.1 初始荷载定义

实际路网中的初始荷载为交通量,定义方式不同于电力网络以及信息网络,需要考虑初始交通需求以及路网拓扑结构之间的相互影响<sup>[26]</sup>。本文以阻抗函数作为定义初始荷载的依据,令  $D=(r,s)$  为起点  $r$ 、终点  $s$  的 OD 对,则  $t$  时刻  $D$  内第  $k$  条路径的路径阻抗  $C_D^k(t)$  为

$$C_D^k(t) = \sum_a t_a[x_a(t)] \delta_D^{a,k} \quad (1)$$

式中:  $\delta_D^{a,k}$  为决策变量,若路段  $a$  在  $D$  内第  $k$  条路径上,则  $\delta_D^{a,k}$  为 1,否则为 0;  $x_a(t)$  为  $t$  时刻路段  $a$  的交通荷载;  $t_a[x_a(t)]$  为路段  $a$  在  $t$  时刻下以  $x_a(t)$  为自变量的路段阻抗函数。

$t_a[x_a(t)]$  可由美国道路局(Bureau of Public Road, BPR)开发的 BPR 函数标定,即

$$t_a[x_a(t)] = t_a(0) \left\{ 1 + \alpha \left[ \frac{x_a(t)}{Q_a} \right]^\beta \right\} \quad (2)$$

式中:  $t_a(0)$  为路段  $a$  的零流阻抗;  $Q_a$  为单位时间内路段  $a$  的实际可通过车辆数;  $\alpha$ 、 $\beta$  均为阻滞系数,通常分别取 0.15 和 4。

路网在设计过程中,每条路段均有最大流量负载能力,采用  $Q_a$  表示路段  $a$  的容量。由式(1)、(2)可进一步得到  $r$ 、 $s$  间的初始交通需求  $U(r,s)$  在路径阻抗  $C_D^k(t)$  下第  $k$  条路径的流量分配概率  $P_D^k(t)$ ,即

$$P_D^k(t) = \frac{\exp[-C_D^k(t)]}{\sum_k \exp[-C_D^k(t)]} \quad (3)$$

将所有 OD 对间的初始需求划分为  $Z$  份,每加载一份流量后,重新更新式(3),直到流量全部加载,此时可得到路网初始荷载  $x_a(0)$ 。

### 1.2 基于阻抗的负载分配方式

为了便于级联失效模型的构建,假定交通事故使一条道路某个方向的交通全部阻断,失去通行功能。该假定条件是交通事故类型给路网带来最严重的状态,事故引起部分车道中断的交通状态对路网失效影响较小,因此,以事故对交通影响的极限状态进行建模。

路网中路段  $b$  发生持续时间为  $T$  的交通事故,随后的交通运行会受到一定的影响,导致路网中其他完好路段进行一次负载的更新,在事故持续时间较短的情况下,大部分出行者不愿意改变出行路径,而在原路径等待<sup>[27]</sup>,刘伟等提出了基于前景理论的级联失效负载重新分配方式,该负载重新分配方式考虑了驾驶人在面对事故后的驾驶行为,其模型为<sup>[22]</sup>

$$F_D^k(t) = \begin{cases} -\lambda[-C_D^k(t) + Q_D - Q_{\bar{D}}]^\xi & b \notin k \\ -\lambda T^\eta & b \in k \end{cases} \quad (4)$$

$$W[P_D^k(t)] = \left\{ \frac{[P_D^k(t)]^\eta}{[P_D^k(t)]^\eta + [1 - (P_D^k(t))^\eta]^\eta} \right\}^{1/\eta} \quad (5)$$

$$\sigma_D^k(t) = \frac{\exp\{-F_D^k(t)W[P_D^k(t)]\}}{\sum_k \exp\{-F_D^k(t)W[P_D^k(t)]\}} \quad (6)$$

式中:  $F_D^k(t)$  为  $t$  时刻驾驶人面对事故时,选择路径  $k$  的主观效用损失值;  $Q_D$  为  $D$  内所有可行路径的行程时间平均值;  $Q_{\bar{D}}$  为事故路段  $b$  的上游节点  $m$  为起点,  $s$  为终点的 OD 对  $\bar{D}=\{m,s\}$  内所有可行路径的行程时间平均值;  $\xi$ 、 $\lambda$  分别为损失延误系数和出行者对损失避免大于对相同收益的偏好系数,根据文献[28]的研究分别取 0.88、2.25;  $W[P_D^k(t)]$  为  $t$  时刻驾驶人面对损失时选择  $D$  内路径  $k$  的主观选择概率;  $\eta$  为面对损失时的参数,取 0.69;  $\sigma_D^k(t)$  为  $t$  时刻  $\bar{D}$  内出行者选择路径  $k$  的概率。

在负载重新分配过程中,若存在时刻  $t$ ,使得路段  $a$  有  $x_a(t) \geq Q_a$ ,则路网将会发生连锁反应,以路段  $a$  为失效边,重复式(4)~(6),直至事故影响消除。

## 2 交通事故影响范围分区模型

### 2.1 路段耗散结构模型

城市路网是一个典型耗散结构系统<sup>[29]</sup>。在没有外界干扰下,路段内的车辆总数能在一定时间



内保持平衡,采用熵变原理描述,即

$$ds = ds_1 + ds_2 \quad (7)$$

式中: $s$  为路段总熵; $s_1$  为路段流入熵; $s_2$  为路段流出熵。

当  $ds > 0$  时,表示系统总熵增加,有序性降低;当  $ds = 0$  时,表示系统总熵不变,有序性不变; $ds < 0$  时,表示系统总熵降低,有序性提高。根据耗散结构理论,采用熵变判断开放系统有序度的变化。

在开放系统中,关键变量对运行状态起决定性作用,影响其他变量的变化率。对交通系统而言,路段交通流密度能够有效地反映路段上的车辆数、拥挤程度以及路段使用程度,因此,采用交通流密度作为关键变量,根据路网级联失效过程,以式(5)为基础,当多余负载加载到路段上时,单一路段的交通流密度熵的变化率测量模型为

$$\frac{d[x_a(t)/M_a]}{dt} = \frac{d[\sigma_D^k(t)x_b(0)]}{M_a dt} \quad (8)$$

式中: $M_a$  为路段  $a$  的长度; $x_b(0)$  为失效路段  $b$  的初始荷载。

$\epsilon_a$  为路段  $a$  的决策变量, $\epsilon_a = 1$  表示路段  $a$  在事故持续时间  $T$  内,存在某一时刻  $t$ ,  $t < T$  时,有  $x_a(t) = Q_a$ ,则路段交通流密度熵的增加量达到了极限值,路段相继失效; $\epsilon_a = 0$  表示路段  $a$  在  $T$  时刻  $x_a(T) < Q_a$ ,路段  $a$  仍有富余容量。以单一路段交通流密度熵的变化率为基础,结合级联失效过程,可以明确在事故持续时间  $T$  内,路段密度熵在状态转化过程中的变化率  $V_a$  为

$$V_a = \begin{cases} \frac{T}{t} & \epsilon_a = 1 \\ \frac{x_a(T) - x_a(0)}{Q_a - x_a(0)} & \epsilon_a = 0 \end{cases} \quad (9)$$

## 2.2 基于聚类分析的影响范围分区模型

路段发生持续时间为  $T$  的事故后,各路段的密度熵变化率表明受影响的严重程度,现状研究中忽略了路段而突出路网的时空影响范围,为了区分这种影响,将路段  $a$  的变化率转化为二维坐标  $w_a = (t_a, V_a)$ ,  $t_a$  为路段  $a$  的时间决策变量,若存在时刻  $t$  使得  $\epsilon_a = 1$ ,则  $t_a = t$ ,否则  $t_a = T$ ,路网中任意 2 个节点之间的欧氏距离  $d(w_a, w_c)$  可表示为

$$d(w_a, w_c) = \sqrt{|t_a - t_c|^2 + |V_a - V_c|^2} \quad (10)$$

根据每 2 个路段之间的欧氏距离,可构建对称距离矩阵  $D_{a_n \times a_n}$ ,即

$$D_{a_n \times a_n} = \begin{bmatrix} d(w_1, w_1) & \cdots & d(w_1, w_n) \\ \vdots & & \vdots \\ d(w_n, w_1) & \cdots & d(w_n, w_n) \end{bmatrix} \quad (11)$$

以对称距离矩阵为研究对象,对路段进行空间划分,首先最小元素中的路段  $a_i$  划分到空间  $R_1$  中,然后从距离矩阵中去除,以此循环,得到下一个空间  $R_2$ ,当对称距离矩阵为空集时,即可得到所有分区集合以及分区  $u$  内的路段编号  $H_u$ ,即

$$H_u = \{a_i \mid a_i \in R_u\} \quad (12)$$

式中: $R_u$  为分区  $u$  的路段空间集合。

## 3 实例分析

### 3.1 路网基础属性

以重庆市渝中半岛部分路网为算例,路网中的路段均为双向通行,路段数量为 52 个,考虑路段的方向性后,有向路段为 104 个,仿真中有向路段指一个路段的某个方向,节点数为 32 个。在后续研究中为了模拟不同的交通运行环境,将初始交通需求设置为变量,6 组交通需求的起终点与需求分别为: $(r_1, s_4)$  的需求为  $3K$ ;  $(r_2, s_5)$  的需求为  $3K$ ;  $(r_5, s_5)$  的需求为  $2K$ ;  $(r_4, s_1)$  的需求为  $2K$ ;  $(r_3, s_7)$  的需求为  $K$ ;  $(r_3, s_8)$  的需求为  $K$ 。其中, $K$  为交通量基数,分别取 800、1 000 pcu · h<sup>-1</sup> 进行测试,实际路网结构见图 1。

路网中与起终点相连接路段的实际通行能力为 3 600 pcu · h<sup>-1</sup>,其他路段的实际通行能力均为 2 500 pcu · h<sup>-1</sup>,根据式(3),不同  $K$  下路网初始荷载  $x_a(0)$  见图 2。为了便于表示路段的方向性,定义图 2 中横坐标有向路段编号为 1、2 时,分别表示路段  $a_1$  的 2 个方向,有向路段编号为 3、4 时,分别表示路段  $a_2$  的 2 个方向,以此类推;路段方向由相邻节点下角标的大小确定,横坐标 1 为节点  $N_1$  到  $N_2$ ,节点上角标为  $a_1^+$ ,横坐标 2 为节点  $N_2$  到  $N_1$ ,节点上角标为  $a_1^-$ ,根据此规则,可明确横坐标含义。由图 2 可以看出:路网中  $a_{14}^+$ ,  $a_{16}^-$ ,  $a_{18}^-$ ,  $a_{25}^+$  的初始荷载较大,并对初始需求增加后的弹性较好。

### 3.2 负载分配模型可靠性验证

负载分配作为本文多个模型中的前提条件,需要保证其可靠性,模型才具备可行性,因此,在设定的路网结构上,选取  $a_{18}^-$  作为事故发生点,交通需求环境则选取  $K = 800$  pcu · h<sup>-1</sup> 进行试验。试验对象选取 20 名年龄为 20~30 岁的驾驶人,出行起点为  $r_5$ ,终点为  $s_2$ ,事故类型不变,事故时间从 1 min 累加至 20 min,设置 20 组试验,每组试验开始前分别告知驾驶人其他路段的交通量以及受事故路段影响的交通量,根据是否改变路径可得到不同情况下出行者改变路径的概率。对照组为本文负载分配模型

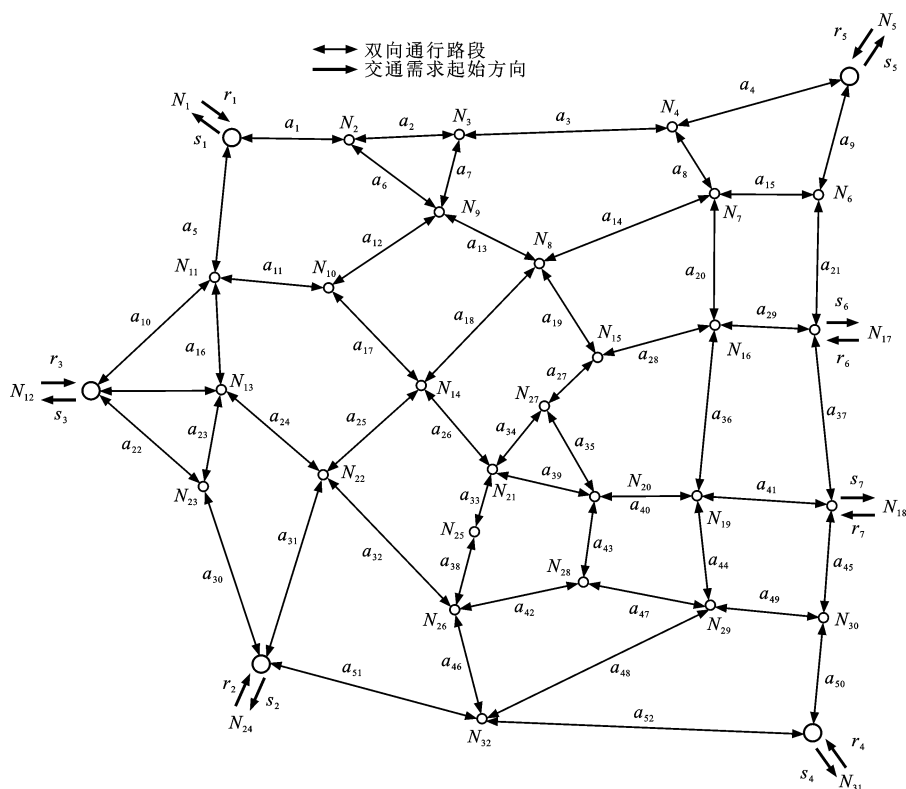
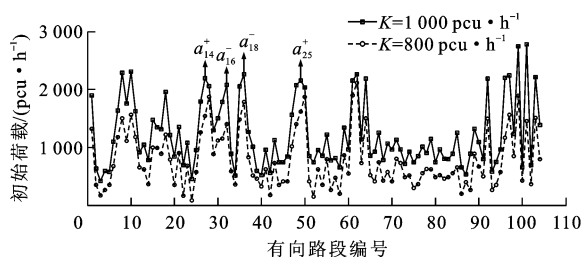


图 1 实际路网结构

Fig. 1 Structure of real road network

图 2 不同  $K$  下各有向路段初始荷载Fig. 2 Initial loads of each directed road section under different values of  $K$ 

计算得到的路径改变概率,对比见图 3,可以看出:模型计算结果与实测值相差较小,决定系数为 0.981,验证了模型的可行性,同时与文献[27]、[30]所得到的关于事故下驾驶人的出行特性相吻合。

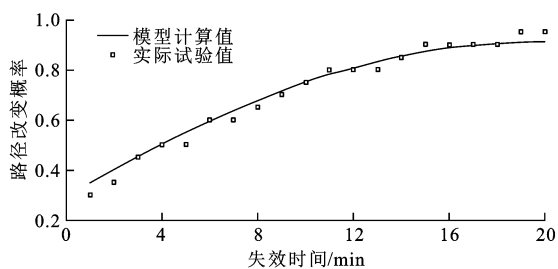


图 3 路径改变概率

Fig. 3 Probabilities of path change

### 3.3 仿真模拟分析

以  $a_{18}^-$  作为事故发生点进行仿真,路段  $a_{18}^-$  在不同需求环境下,发生一定持续时间事故后,路网中其他有向路段的交通流密度熵变化率  $V_a$  见图 4,可以看出:路网中各有向路段  $V_a$  受初始荷载影响严重,在  $K=800 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$  时,仅有事故路段的下游路段  $a_{15}^-$  相继失去了运输功能,与事故路段关联性较少

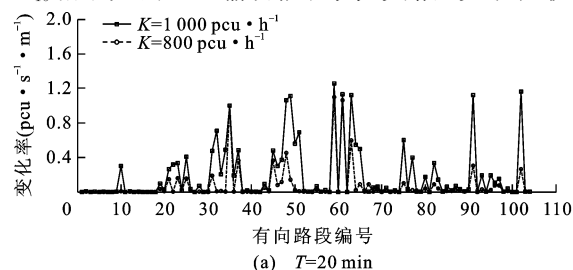
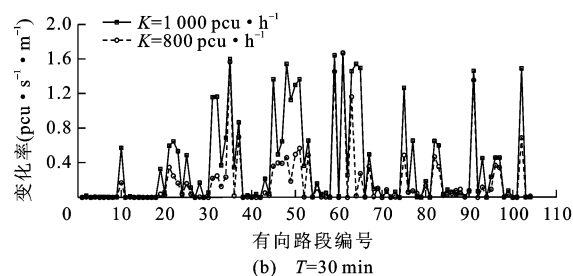
(a)  $T=20 \text{ min}$ (b)  $T=30 \text{ min}$ 

图 4 各路段交通流密度熵变化率

Fig. 4 Traffic flow density entropy rates of each directed road section

的有向路段较多;随着初始荷载的增加,发生连锁反应的有向路段增加明显,路段 $a_{24}^-$ 、 $a_{25}^+$ 、 $a_{30}^+$ 、 $a_{31}^+$ 、 $a_{32}^+$ 、 $a_{46}^+$ 、 $a_{51}^-$ 均较快的瘫痪,原始不受影响的 $a_5^-$ 等有向路段也受一定影响;随着时间的增加,影响范围内的有向路段不仅受到事故路段的影响,也会受到相继失效路段的影响, $V_a$ 增加速度变快,这给交通事故管理提供了确切的方向,尽可能的避免相继失效导致的连锁反应,尽快的对最快失效路段进行分流等措施,减小拥堵扩散范围。

对 $K=1\,000\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 进行聚类分析,不同分区个数下的误差平方和(Sum of Square Error, SSE)见图5,可以看出:如果不对事故影响范围进行分区,即分区数为1个, $T$ 为20、30 min时SSE最大分别达到了40.17与42.61,说明以整体范围作为影响范围来评估交通事故会造成较大的误差;当分区数增加到3个时,SSE有较大的改善;当分区数超过3个时,继续增加分区数对SSE的改善程度贡献较小。本文以分区数为3做具体分析,其中 $H_1$ 为未受影响区, $H_2$ 为间接影响区, $H_3$ 为直接影响区。图6表示了2种事故持续时间下,不同分区所包括的道路编号和数量,可以看出:随着 $T$ 的增加,直接影响区和间接影响区内的有向路段数量增幅明显,

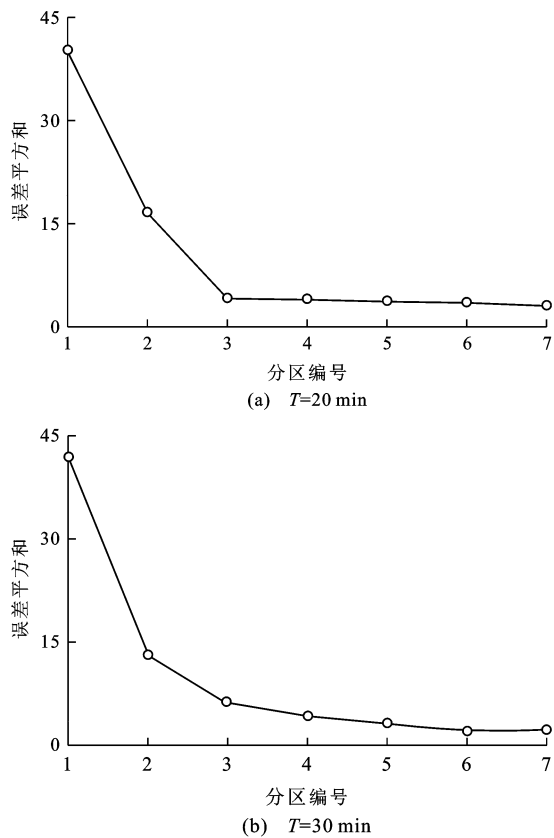


图5 两种事故持续时间下的误差平方和  
Fig. 5 SSEs of two durations of accident

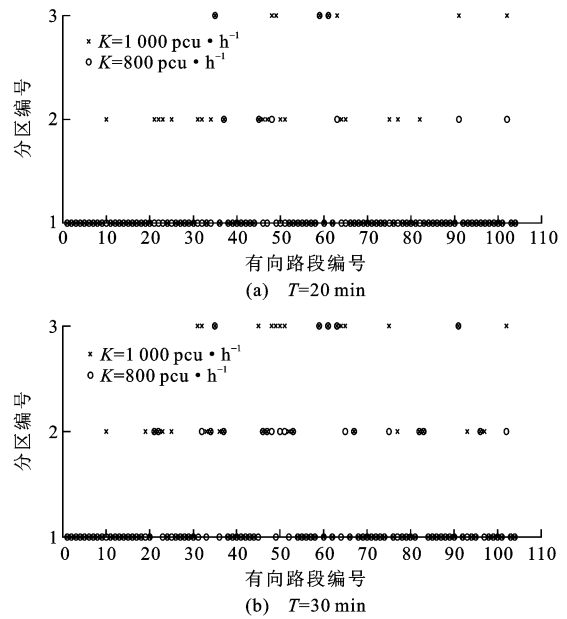


图6 事故影响范围分区  
Fig. 6 Partition of accident influence area

增加比例分别为127.27%和85.71%。直接、间接影响区有向路段数量分别见表1、2,可以看出: $T$ 为20 min时, $K$ 增加 $200\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ ,16个有向路段从未受影响变为间接影响,直接影响区的路段数量仅增加5个; $K$ 为 $800\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, $T$ 增加10 min后,路段数量变化主要集中在间接影响区,其中有向路段增加13个,直接失效的有向路段增加3个,说明在 $K$ 较小时,相继失效的情况较小,大部分有向路段的熵处于上升阶段,但并没达到极限值;随着 $K$ 增加到 $1\,000\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ , $T$ 增加10 min,直接影响区的有向路段数量增加11个,间接影响区的有向路段增加5个; $T$ 为30 min时, $K$ 增加 $200\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 对失效路段影响严重,有向路段增加数量为13个,对于间接影响区的影响较小增加数量仅为3个,大部分路段均处于瘫痪状态。

表 1 直接影响区有向路段数量		
Tab. 1 Numbers of directed road sections for direct impact area		
$T/\text{min}$	$K/(\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1})$	
	800	1 000
20	3	8
30	6	19

表 2 间接影响区有向路段数量		
Tab. 2 Numbers of directed road sections for indirect impact area		
$T/\text{min}$	$K/(\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1})$	
	800	1 000
20	5	16
30	18	21

以  $K=1\,000\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $T=30\text{ min}$  为例,分区内具体有向路段见表3,可以看出:采用分区后,能够明确不同分区内的具体路段方向,分区编号3中的路段受到直接影响,分区编号2中的路段则是间接受到影响,因此,根据路段分布情况对交通流进行合理的疏导,这为交通事故后管理提供了理论基础。

表3 各分区内有向路段

Tab. 3 Directed road sections of each partition

分区编号	有向路段编号
3	$a_{23}^{+}, a_{24}^{-}, a_{25}^{+}, a_{25}^{-}, a_{26}^{+}, a_{27}^{-}, a_{28}^{+}, a_{28}^{-}, a_{29}^{+}, a_{30}^{+}, a_{31}^{-}, a_{32}^{+}, a_{32}^{-}, a_{33}^{+}, a_{38}^{+}, a_{45}^{+}, a_{46}^{+}, a_{51}^{-}$
2	$a_5^{-}, a_{10}^{+}, a_{11}^{+}, a_{11}^{-}, a_{12}^{+}, a_{13}^{+}, a_{17}^{+}, a_{17}^{-}, a_{18}^{-}, a_{19}^{+}, a_{23}^{-}, a_{24}^{+}, a_{26}^{-}, a_{27}^{+}, a_{34}^{+}, a_{39}^{-}, a_{41}^{-}, a_{42}^{+}, a_{47}^{+}, a_{48}^{-}, a_{49}^{+}$
1	其他

## 4 结 语

(1)在交通事故的背景下,优化了级联失效过程,并在负载分配迭代过程中结合了交通密度耗散理论,所得到的模型能够明确网络中所有路段与事故路段之间的关系;为了进一步区分事故影响范围,提出了基于聚类分析的影响范围分区方法,为精细化的优化交通系统提供了可行的理论依据,这对第一时间采取相关诱导措施起到关键性作用。

(2)基于前景理论的级联失效演变过程模拟了出行者在面对事故时的路径选择行为,模型计算值与试验结果吻合度高,决定系数为0.981。

(3)以重庆渝中半岛某区域路网为例进行了仿真分析,以初始需求和事故持续时间为变量,探讨了2种关键变量的相互影响关系;当初始需求较小时,网络受影响程度较小,随着事故持续时间的增加,由于路段间的相互作用,相继失效的路段导致受影响的路段的数量急剧增加;当初始需求增加时,事故持续时间从20 min增加到30 min对网络的影响严重,直接影响区的路段数量从5个增加至18个,这表明网络结构无法承受大量额外加载的车辆而形成大面积的道路瘫痪。

(4)在后续的研究中,需要重点讨论分区标准的详细定义,从而更好地研究不同分区情况下如何采取相应等级的诱导方案;针对路网结构与交通事故影响范围的作用关系,研究具有高鲁棒性网络的设计方法。

## 参考文献:

### References:

- [1] AMIRGHOLY M, GAO H O. Modeling the dynamics of congestion in large urban networks using the macroscopic fundamental diagram: user equilibrium, system optimum, and pricing strategies[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 104: 215-237.
- [2] KNOOP V L, VAN LINT H, HOOGENDOORN S P. Traffic dynamics: its impact on the macroscopic fundamental diagram[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2015, 438: 236-250.
- [3] KEYVAN-EKBATANI M, PAPAGEORGIOU M, PAPAMICHAIL I. Urban congestion gating control based on reduced operational network fundamental diagrams[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 33: 74-87.
- [4] YILDIRIMOGLU M, GEROLIMINIS N. Approximating dynamic equilibrium conditions with macroscopic fundamental diagrams[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 70: 186-200.
- [5] MAHMASSANI H S, SABERI M, ZOCCAIE A. Urban network gridlock: theory, characteristics, and dynamics[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 36: 480-497.
- [6] KERNER B S. Criticism of generally accepted fundamentals and methodologies of traffic and transportation theory: a brief review[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2013, 392(21): 5261-5282.
- [7] WANG Yu-qi, CAO Jian-nong, LI Wen-gen, et al. Exploring traffic congestion correlation from multiple data sources[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2017, 41: 470-483.
- [8] YANG Su. On feature selection for traffic congestion prediction[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 26: 160-169.
- [9] KONG Xiang-jie, XU Zhen-zhen, SHEN Guo-jiang, et al. Urban traffic congestion estimation and prediction based on floating car trajectory data[J]. Future Generation Computer Systems, 2016, 61: 97-107.
- [10] HE Fei-fei, YAN Xue-dong, LIU Yang, et al. A traffic congestion assessment method for urban road networks based on speed performance index[J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 425-433.
- [11] TIAN Jun-fang, TREIBER M, MA Shou-feng, et al. Microscopic driving theory with oscillatory congested states: model and empirical verification[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 71: 138-157.
- [12] TIAN Jun-fang, LI Guang-yu, TREIBER M, et al. Cellular automaton model simulating spatiotemporal patterns, phase transitions and concave growth pattern of oscillations in traffic flow[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 93: 560-575.
- [13] CHUNG Y, RECKER W W. A methodological approach for estimating temporal and spatial extent of delays caused by

- freeway accidents[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(3): 1454-1461.
- [14] CHUNG Y, RECKER W W. Frailty models for the estimation of spatiotemporally maximum congested impact information on freeway accidents[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(4): 2104-2112.
- [15] WANG Zheng-li, QI Xin, JIANG Hai. Estimating the spatiotemporal impact of traffic incidents: an integer programming approach consistent with the propagation of shockwaves[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 111: 356-369.
- [16] MARSHALL W E, GARRICK N W. Does street network design affect traffic safety?[J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43(3): 769-781.
- [17] ZHANG Yuan-yuan, BIGHAM J, RAGLAND D, et al. Investigating the associations between road network structure and non-motorist accidents[J]. Journal of Transport Geography, 2015, 42: 34-47.
- [18] SUN Chen-shuo, PEI Xin, HAO Jun-heng, et al. Role of road network features in the evaluation of incident impacts on urban traffic mobility[J]. Transportation Research part B: Methodological, 2018, 117: 101-116.
- [19] MFINANGA D, FUNGO E. Impact of incidents on traffic congestion in Dares Salaam City[J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2013, 2(2): 95-108.
- [20] HOJATI A T, FERREIRA L, WASHINGTON S, et al. Modelling the impact of traffic incidents on travel time reliability[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 65: 49-60.
- [21] KADDOURA I, NAGEL K. Using real-world traffic incident data in transport modeling[J]. Procedia Computer Science, 2018, 130: 880-885.
- [22] 刘 伟,陈科全,刘玉印,等. 前景理论下道路网络的级联失效演变[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(1): 145-151.
- LIU Wei, CHEN Ke-quan, LIU Yu-yin, et al. Cascading failure simulation of road network based on prospect theory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(1): 145-151. (in Chinese)
- [23] 马壮林,邵春福,胡大伟,等. 高速公路交通事故起数时空分析模型[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 93-99.
- MA Zhuang-lin, SHAO Chun-fu, HU Da-wei, et al. Temporal-spatial analysis model of traffic accident frequency on expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 93-99. (in Chinese)
- [24] 金书鑫,王建军,徐嫚谷. 区域高速路网交通事故影响区划分及交通诱导[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(2): 89-98.
- JIN Shu-xin, WANG Jian-jun, XU Man-gu. Traffic accident affected zone division and traffic guidance under regional highway network[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(2): 89-98. (in Chinese)
- [25] 肖恢翠,陆 建,邱红桐,等. 城市快速路交通事件影响范围预测模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 54-59.
- XIAO Hui-hui, LU Jian, QIU Hong-tong, et al. The range forecast model of traffic incidents impact on urban expressway[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 54-59. (in Chinese)
- [26] 王正武,陈小兰,李常乐. 道路交通网络级联失效影响源辨识[J]. 中国公路学报, 2015, 28(10): 98-104.
- WANG Zheng-wu, CHEN Xiao-lan, LI Chang-le. Identifying influence sources of cascading failure for road traffic network[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(10): 98-104.
- [27] 任小聪,向红艳,陈 坚. 交通事故信息对路径选择行为的影响建模与分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(7): 103-107, 113.
- REN Xiao-cong, XIANG Hong-yan, CHEN Jian. Modeling and analysis of influence of traffic accident information on route choice behavior[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(7): 103-107, 113. (in Chinese)
- [28] TVERSKY A, KAHAMAN D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty[J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5: 297-323.
- [29] 莫祥伦. 城市道路交通流自组织运行机理及控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- MO Xiang-lun. Study on operation mechanism and control of self-organization traffic flow in urban road net[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [30] 石小法,王 炜,杨东援. 信息对出行者出行行为的影响研究[J]. 中国公路学报, 2002, 15(1): 89-92.
- SHI Xiao-fa, WANG Wei, YANG Dong-yuan. Bounded-rational travel behavior under traffic incident[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(1): 89-92. (in Chinese)