

文章编号:1671-1637(2014)05-0074-08

道路交通网络脆弱性动态辨识方法

张 勇¹, 屠宁雯^{1,2}, 陶骏杰¹

(1. 苏州大学 城市轨道交通学院, 江苏 苏州 215006; 2. 华中科技大学 管理学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:分析了路段和节点的流量传播过程与离散的瞬时动态用户最优路径选择均衡条件,建立了反应型的动态用户均衡网络交通流模型,设计了对角化的启发式算法求解模型,评价了动态化的道路网络脆弱性指数。分析结果表明:在自由流速度为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、堵塞密度为 $125 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$ 的9节点12路段构成的算例路网中,在时刻3路段1受损时,路段3在高峰时的车辆数量从原有的50 veh增加到了100 veh,入口流量增加1倍,路段2的入口流量降为0;在路段3、6、7和10构成的路径上,路段1受损使得此路径的车辆数将近增加1倍,车辆数量的增加导致各路段的阻抗增加。提出的方法能刻画车辆绕开受损路段的交通流传播过程,能有效辨识道路网络在各个路段各个时刻的脆弱性。

关键词: 交通规划; 交通网络; 脆弱性; 灾害; 动态均衡

中图分类号: U491.13 **文献标志码:** A

Identification method of dynamic road traffic network vulnerability

ZHANG Yong¹, TU Ning-wen^{1,2}, TAO Jun-jie¹

(1. School of Urban Railway Transportation, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;

2. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The traffic flow propagation process of section and node and the discrete instantaneous dynamic equilibrium condition of optimal route choice for user were analyzed, the reactive traffic flow model of dynamic user equilibrium network was established, diagonalizable heuristic algorithm was designed to solve the model, and the dynamic vulnerability index of road network was evaluated. Analysis result shows for an example road network with 12 sections and 9 nodes, free-flow speed is $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ and jam density is $125 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$, when section 1 is broken at time 3, vehicle amount at peak time increases from the original 50 veh to 100 veh at section 3, the inflow of section 3 increases by 1 time, and the inflow of section 2 drops to 0. The damage of section 1 doubles the vehicles on the path consisting of sections 3, 6, 7 and 10, the increase of vehicle amount leads to the increase of impedance on each section. The traffic flow propagation process of vehicle bypassing the broken section can be described, the proposed method is effective to identify the vulnerability of road network for each section at each time. 3 tabs, 11 figs, 25 refs.

Key words: traffic planning; traffic network; vulnerability; disaster; dynamic equilibrium

Author resume: ZHANG Yong (1978-), male, associate professor, PhD, +86-512-67601052, sinkey@126.com.

收稿日期:2014-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51108289);江苏省自然科学基金项目(10KJB580003);国家社会科学基金项目(13&-ZD175)

作者简介:张 勇(1978-),男,江苏如东人,苏州大学副教授,工学博士,从事道路交通规划研究。

0 引 言

道路网络是维持城市功能正常运转的动脉,然而,频频出现的城市洪涝、暴雪灾害等导致中国北京、上海等大中城市多次发生大面积道路交通瘫痪。大面积交通拥堵的直接原因在于地势低洼、雨雪量集中区域的路段交通功能往往最先失效,引发车辆排队溢出路段;如果降雨、降雪持续,将有更多的路段失效,从而触发邻接路段车辆排队,形成大范围路网堵塞,甚至产生交通死锁。这就需要在各时段多个地点进行道路救援抢修,因此,如何判断路段失效对路网交通产生何种程度的破坏,成为科学开展道路网络防灾减灾的前提。进行道路网络的交通脆弱性分析,对于城市减灾规划、应急预案制定与道路抢护资源分配具有极强的应用价值。

Berdica 首先提出了道路网络的脆弱性的定义,分析了灾害事件引发的路网交通服务功能下降的敏感性^[1],但未能给出如何分析道路网络脆弱性的方法,仅给出了产生原因,即道路网络功能丧失取决于灾害发生概率和严重程度;Sarewitz 等考虑到大样本灾害记录的稀缺性和完备性,认为采用概率评价脆弱性难以实用^[2];D'Este 等认为脆弱性应该只考虑灾害的后果,即小部分路段失效显著降低节点可达性的严重程度,认为仅需要灾害严重程度的数据而无需灾害发生的概率^[3];Holmgren 认为脆弱性应该是道路网络对灾害风险的敏感性程度^[4],该定义被广泛接受,路网交通功能面对灾害发生而降低的敏感性即为道路网络脆弱性。

目前,路网脆弱性研究采用静态交通均衡模型来开展的。研究的思路有 2 类,第 1 类是遍历失效方法即轮流断裂每个路段,基于静态交通均衡分配结果评价各路段断裂对道路网络服务能力下降程度的影响,再确定脆弱性显著路段。诸多学者也对路网服务能力提出了诸多定义,关键词包括连通性^[3]、可达性^[5-6]、路段总阻抗^[7]、鲁棒指数^[8]、路段交通动态安全综合^[9]等。张勇等同时考虑了路段排队容量限制和断面通行能力限制,基于鲁棒指数提出了面向静态道路交通网络的脆弱性辨识方法^[10];Sullivan 等提出了脆弱性修正指数法和网络出行脆弱性法^[11],其优势在于能够直接比较规模、拓扑和连通性各不相同的道路网络的脆弱性,特别是分析含有因灾害而被孤立使用路段的运输网络;刘思峰等提出了路段重要度的辨识模型,其中的路段重要度是指全路网的车辆通行时间总量与去除某路段后剩余

路网行程时间总量的差值^[12],该模型也是国内在该领域的最早探索,但是未能采用合适的模型分析道路受损引发的交通流的再分布问题;杨露萍等认为在评估道路网络脆弱性时,除了考虑路网内部单元间相互作用和路网节点单元的恢复能力外,还需综合考虑路网结构、交通流运行状态、应急救援点设置等因素,并以路网用户最终损失时间为测度进行了路网脆弱性评估^[13],该研究中路网行程时间计算采用了简单的最短路算法,没有考虑路网容量等限制因素。第 2 类方法主要利用博弈论的分析方法,基于标准的无约束随机 UE 模型,Bell 等利用博弈论提出了最大-最小对偶模型确定路网脆弱性^[14-15];Pamela 等基于博弈论提出了双层网络规划模型来寻找脆弱路段^[16],但仅基于静态用户均衡模型进行脆弱性分析,无法分析灾害期间内不同路段在不同时刻的脆弱性。

当道路网络受到灾害破坏时,无论是道路出行的出行者,还是路网设施本身均会发生变化:其一,了解灾害信息的驾驶人往往驾驶车辆从其他路段绕开受损路段到达目的地^[17],这将导致路网其他路段的拥挤;其二,受损路段本身往往并不是在同一时段同时受到破坏的。为了模拟路段受损状况,要求建立的研究方法能在不同时刻调整路段通行能力,因此,有必要面向灾害期间的路段通行能力受损情形,开展交通网络脆弱性的动态分析。为此,本文较以往的研究做了进一步的拓展,将现有的静态道路网络的脆弱性评价方法拓展到动态网络;在以往分析脆弱性的网络交通流模型中增加时间维,实现灾害条件下的交通流动态化描述;通过构建扩张的时空网络,利用启发式算法来求解模型,实现不同时刻的受损路段的脆弱性评价。

1 动态脆弱性指数

根据文献[7-8],交通网络脆弱性指数的定义为路段受损前后路网总阻抗的变化。当道路网络处于完好状态时,道路网络的总阻抗(时间) c 为

$$c = \sum_a \tau_a x_a \quad (1)$$

式中: x_a 为路段 a 的流量; τ_a 为路段 a 的阻抗。

本文规定,当路段 a 受损时,阻抗为 0,令 c_a 为当且仅当路段 a 受损后的网络总阻抗(时间),即有

$$c_a = \sum_a \tau'_a x'_a \delta_a \quad (2)$$

$$\delta_a = \begin{cases} 1 & \text{路段 } a \text{ 未受损} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (3)$$

式中: x'_a 为有损坏路段网络中路段 a 的流量; τ'_a 为有损坏路段网络中路段 a 的阻抗。

令 B_a 为路段 a 受损时的道路网络脆弱性指数, 则有

$$B_a = c_a - c \quad (4)$$

然而上述脆弱性指数是静态的, 无法分析灾害期间不同时刻路段受损对路网交通造成的破坏, 因此, 有必要引入时间维, 面向动态的交通网络提出相应的脆弱性指数计算方法。图 1 为路段流入与流出车辆数量, 将研究时段离散为若干小时段, 则流入与流出流量累计曲线(折线)所围的各小梯形的面积和就是路段总阻抗, 即

$$c = \frac{1}{2} \left[t_2 n_1 + \sum_{k=2}^K (n_k - n_{k-1}) \cdot (t_k - t_{k-2}) \right] \quad (5)$$

式中: t_k 为经过离散后的第 k 个时段; n_k 为在 k 时刻路段累计流入与流出的车辆数量。

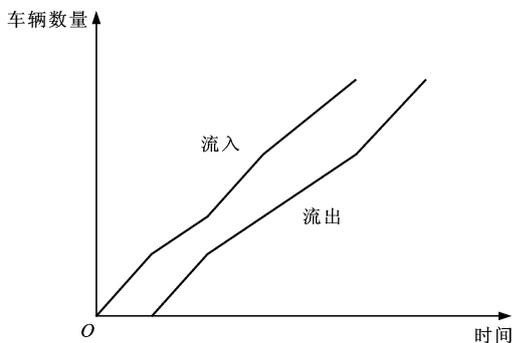


图 1 流入与流出车辆数量

Fig1 Vehicle amounts of inflow and outflow

2 模型构建

发生灾害时, 车辆将在时间或空间上规避灾害, 因此, 车辆将根据灾害发生时间与地点在途经的交叉口处重新选择到达目的地的最短路径。这就决定了所建立的交通流模型应当是反应型的, 即车辆在行驶过程中, 而不是在出发前已经预先选择出发路径及时间, 因此, 反应型模型更符合灾害期间的路径选择行为。本文将通过反应型的动态网络运输模型来模拟灾害时交通流随时间变化的特征。

2.1 问题假设

道路网络受到灾害破坏可能导致车辆随机混乱停滞的情形, 为了简化模型, 本文将研究时段离散为若干等长的小时段, 并做出如下假设: 灾害发生期间, 所有的车辆驾驶人均知道灾害发生的地点与时刻, 路网中的车辆为了规避灾害地点, 将在每个交叉

口处重新选择到达目的地的最短路径; 在每个时段上灾害仅能破坏一个路段; 在行驶途中车辆不能掉头行驶, 且每个路段只有一个入口和一个出口; 每个车道上的车辆单列行驶, 即同一车道上不会出现多辆车并列行驶的情形; 为了简化灾害对道路所造成的破坏影响, 路段受损时的断面通行能力完全下降为 $0^{[7-8]}$ 。

2.2 动态行驶时间描述

2.2.1 瞬时行驶时间

定义瞬时路段行驶时间 $c_a(k)$ 为在 k 时刻交通条件下, 用户穿越路段 a 的时间; 瞬时路径行驶时间 $\eta_{prs}(k)$ 为 k 时刻交通条件下, 用户穿越 r, s 间路径 p 的时间。本文以瞬时行驶时间函数为基础来构造模型。路段 a 的旅行时间 $c_a(k)$ 包括驶完该路段的时间 $g_{1a}[x_a(k), u_a(k)]$ 以及路段出口处发生瞬时排队的延误 $g_{2a}[x_a(k), v_a(k)]^{[18]}$, 即

$$c_a(k) = c_a[x_a(k), u_a(k), v_a(k)] \quad (6)$$

式中: $x_a(k)$ 、 $u_a(k)$ 、 $v_a(k)$ 分别为 k 时刻路段 a 的车辆数量、进入流量和离开流量。

瞬时路径旅行时间 $\eta_{prs}(k)$ 可以表示为

$$\eta_{prs}(k) = \sum_{a \in p} c_a[x_a(k), u_a(k), v_a(k)] \quad (7)$$

令 $\sigma_{rs}(k)$ 为 k 时刻交通条件下 r, s 间的最小瞬时行驶时间, 则 $\sigma_{rs}(k)$ 是以 k 时刻路段流量为变量的函数。

2.2.2 实际行驶时间

为了建立路段上的交通流速度与密度之间的关系, 本文采用格林希尔治速度-密度模型来估计。 k 时刻路段 a 上的交通流的速度 $e_a(k)$ 为

$$e_a(k) = u_f [1 - d_a(k)/d_j] \quad (8)$$

式中: u_f 为自由流速度; d_j 为堵塞密度; $d_a(k)$ 为 k 时刻路段 a 的车辆密度。

记 $\tau_a(k)$ 为 k 时刻路段 a 对应的实际路段行驶时间, 即在 k 时刻进入此路段后实际经历的时间。那么在 k 时刻驶完路段 a 需要的实际路段行驶时间 $\tau_a(k)$ 为

$$\tau_a(k) = l_a / e_a(k) \quad (9)$$

式中: l_a 为路段 a 的长度。

$\tau_a(k)$ 在文中仅用于流量传播约束条件。为了简化起见, 在时段 t_k , 路段 a 上的实际行驶时间 $\bar{\tau}_a(k)$ 为 k 时刻起始实际行驶时间 $\tau_a(k)$ 和 $k+1$ 时刻实际行驶时间的均值, 即

$$\bar{\tau}_a(k) = \frac{1}{2} [\tau_a(k) + \tau_a(k+1)] \quad (10)$$

如果 $h-0.5 \leq \bar{\tau}_a(k) < h+0.5$ 成立, 则

$$\bar{\tau}_a(k) = h \quad (11)$$

式中: h 为参数,取 $0 \sim K$ 之间的整数。

2.3 约束条件

交通流在路段与节点的流入流出满足车辆守恒约束。具体来说,某个时刻进入和离开路段的车辆数量将决定此时刻路段上的车辆数量,据此可以给出路段流量守恒约束。而对于起讫对间的节点,进入节点的车辆数量等于离开节点的车辆数量,据此可以给出节点流量守恒约束。

动态网络中的流量是时间的函数,当前时刻的瞬时路段旅行时间取决于之前任意时刻任意路段的入口流量、出口流量以及车辆数量。设 r, s 间路径 p 上任意的中间节点记为 $j_1 (j_1 \neq r)$, 记子路径 \tilde{p} 为原路径 p 上从 j_1 到终点 s 的剩余部分路径。对任意的 $a \in \tilde{p}$, 如果有流量在 k 时刻沿路径 p 通过路段 a , 那么在 $k + \bar{\tau}_a(k)$ 时,子路径 \tilde{p} 的下游路段将产生额外的车辆,或者在 $k + \bar{\tau}_a(k)$ 时,增加了到达目的地的离开车辆^[17],即传播约束可以表述为

$$x_{aprs}(k) = \sum_{b \in \tilde{p}} \left\{ x_{bprs}[k + \bar{\tau}_a(k)] - x_{bprs}(k) \right\} + E_{prs}[k + \bar{\tau}_a(k)] - E_{prs}(k) \quad (12)$$

式中: $x_{aprs}(k)$ 为 k 时刻由 r, s 间的路径 p 流入路段 a 的车辆数量; $x_{bprs}(k)$ 为 k 时刻由 r, s 间的路径 p 流入路段 b 的车辆数量; $E_{prs}(k)$ 为 k 时刻由 r 经由路径 p 流入 s 的累计车辆数量。

2.4 动态均衡条件

反应型的动态交通均衡条件满足任意时刻从任意决策点出发的流量所耗费的瞬时旅行时间等于最小瞬时路径旅行时间^[18]。为此,基于路段的瞬时动态用户最优条件构建动态模型。为了区别于实际建模计算,本文带“*”的变量均表示基于路段的瞬时动态用户最优(简称 DUO)状态来分配计算的结果。设 $\sigma_{is}^*(k)$ 为 k 时刻从 i 到 s 的最小瞬时旅行时间,该变量将根据基于路段的瞬时动态用户最优分配得到。那么对于路段 a 而言,如果从 i 到 s 的流量在 k 时刻进入路段 a , 此时 $\sigma_{is}^*(k)$ 应该等于或小于 k 时刻从 j 出发前往 s 去的最小瞬时旅行时间 $\sigma_{js}^*(k)$ 加上 k 时刻走完路段 a 的瞬时行驶时间 $c_a^*(k)$, 即如果 $u_a^*(k) > 0$ 时,有

$$\sigma_{js}^*(k) + c_a^*(k) \geq \sigma_{is}^*(k) \quad (13)$$

当 $u_a^*(k) = 0$ 时,有

$$\sigma_{js}^*(k) + c_a^*(k) < \sigma_{is}^*(k) \quad (14)$$

结合式(13)、(14),基于路段旅行时间的瞬时动

态用户最优路径选择条件为

$$[\sigma_{js}^*(k) + c_a^*(k) - \sigma_{is}^*(k)]u_a^*(k) = 0 \quad (15)$$

3 求解算法

为简化动态模型的求解,需要给出式(15)的等价变分不等式(Variational Inequity, VI)模型^[19],再以 VI 模型为基础重构最优控制模型,利用网络扩张方法将动态交通网络转化为静态的交通网络,最后通过嵌套连续平均值算法和对角线算法求解离散型最优控制问题^[20-25]。式(15)的变分不等式等价变换及其最优控制模型重构与由动态交通网络转化为静态交通网络的交通网络扩张方法过程较为常见,基于时空网络扩张的对角化启发式算法计算过程如下。

Step 0:初始化。找到网络空置时包含路段车辆数量、进出路段流量以及进出起讫点间路径的累计车辆数量的一个初始可行解,置外迭代次数为 $m=1$ 。

Step 1:对角化。根据式(12)计算当前的实际路段旅行时间估计值,并求解瞬时 DUO 规划,置内迭代次数为 $n=1$ 。

Step 1.1:更新。计算各路段行程时间及其延误,作为扩展网络的路段费用。

Step 1.2:方向搜寻。首先根据时空网络费用矩阵寻找从各人工起点到所有路径终点集合之间的最短路,接着搜寻起讫对之间满足式(11)的最小费用路径,最后通过全有全无分配得到辅助解。

Step 1.3:网络更新。基于连续平均算法(MSA),利用时空网络辅助解和时空网络可行解,得到第 $n+1$ 次的解。

Step 1.4:内迭代收敛检验。如果 n 等于事先规定的数值,转向 Step 2;否则,置 $n=n+1$,并回到 Step 1.1。

Step 2:外迭代收敛检验。如果时空网络当前解是接近瞬时 DUO 状态的,转到 Step 3;否则,置 $m=m+1$,转向 Step 1。

Step 3:脆弱性指数。依次在各个时刻阻断各路段,依据 Step 2 的时空网络当前解计算路段失效前后网络脆弱性指数。

内迭代次数和外迭代次数是相互关联的,如果 m 很大,那么 n 应该相应变小,并且反之也成立,一般 n 取 3 就能加速收敛。为了验证算法的有效性与收敛速度,本文基于 MATLAB 平台编制了基于网络扩张的连续平均值算法程序,算法流程见图 2。

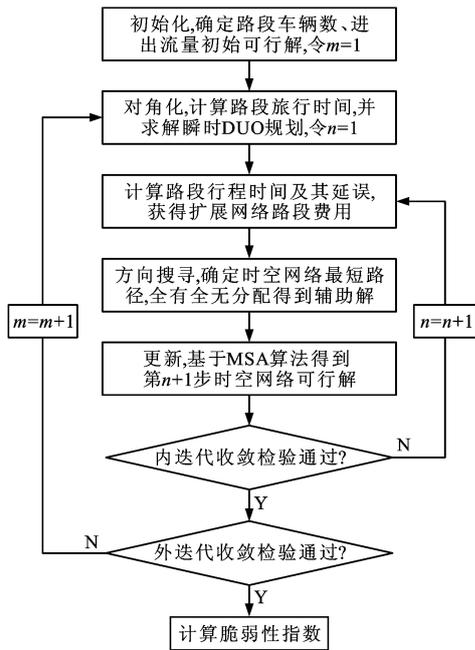


图 2 算法流程
Fig. 2 Algorithm flow

4 计算结果分析

本文算例网格见图 3,由 9 个节点和 12 个路段

表 1 路段长度与自由流时间

Tab. 1 Lengths and free-flow times of sections

路段	长度/m	自由流时间/min	路段	长度/m	自由流时间/min	路段	长度/m	自由流时间/min
1	1 500	2.25	5	1 200	1.80	9	1 200	1.80
2	1 000	1.50	6	1 000	1.50	10	1 500	2.25
3	1 200	1.80	7	1 200	1.80	11	1 500	2.25
4	1 500	2.25	8	1 500	2.25	12	1 000	1.50

表 2 OD 需求

Tab. 2 OD demand

时段	1	2	3	4	5
节点 21→节点 25	20	10	20	30	20
节点 21→节点 29	20	10	20	30	20

表 3 阻抗函数系数

Tab. 3 Impedance function coefficients

参数	β_{1a}	β_{2a}	β_{3a}	β_{4a}	β_{5a}	β_{6a}
取值	1.000	0.001	0.000	0.000	0.015	0.002

图 4 为算法的收敛情况,随着迭代次数的增加,求解间隙值不断下降。在 29 次迭代之后,误差间隙值小于 0.000 1,已经到达了一个满意的均衡解。

本文首先以路段 1 从时刻 3 受损为例,比较路网受损前后交通流状态变动对比结果。图 5、6 分别路段 1 受损前后路段 1~3 上的车辆数量和入口流量随时间的变化。根据图 5、6 可知,如果路段 1 从

组成。将研究时段(时长 15 min)离散成 15 个时长 1 min 的小时段,时刻点从 0 开始,时段 1 为时刻 0 到时刻 1 的小时段,以此类推。假设自由流速度为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,堵塞密度为 $125 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$;路段长

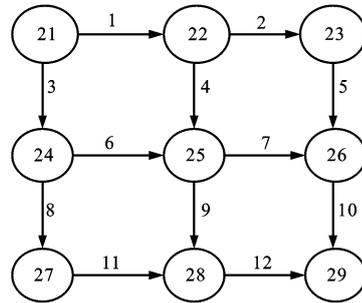


图 3 算例网络

Fig. 3 Example network

度、自由流时间与 OD 需求见分别表 1、2。对于时段 a ,行驶时间更新为

$$c_a(k) = g_{1a}[x_a(k), u_a(k)] + g_{2a}[x_a(k), v_a(k)] \quad (16)$$

$$g_{1a}[x_a(k), u_a(k)] = \beta_{1a} + \beta_{2a}[u_a(k)]^2 + \beta_{3a}[x_a(k)]^2$$

$$g_{2a}[x_a(k), v_a(k)] = \beta_{4a} + \beta_{5a}[v_a(k)]^2 + \beta_{6a}[x_a(k)]^2$$

式中: $\beta_{1a} \sim \beta_{6a}$ 均为路段阻抗函数系数,本文具体取值见表 3。

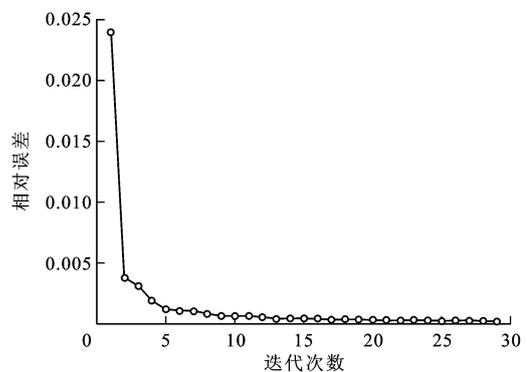


图 4 算法的收敛效果

Fig. 4 Algorithm convergence effect

时刻 3 起受损,车辆数从时刻 3 起将不再变化。这一现象的产生原因有 2 个:由于假设车辆不能掉头行驶,路段 1 也没有其他出口,该路段受损后使得已经在该路段上的车辆被困住,路段 1 的出口流量也为 0,所以车辆数保持不变;由于路段 1 是起始路

段,它的阻断致使还未出发的用户选择备用路段 3 出行,不会再有流量进入路段 1,路段 1 的入口流量在时刻 3 后直降为 0。路段 3 在高峰时段的车辆数量从原有的 50 veh 增加到了 100 veh,图 5 中路段 3 的入口流量也增加了 1 倍;包含路段 2 的路径势必要先经过路段 1,路段 1 受损后路段 2 的入口流量迅速降为 0,车辆数量随时间的推进也逐渐降为 0。这表明,反应型动态交通流模型不仅能抓住灾害发生后常出现车辆绕开事故地点的现象,还能描述交通流绕道时向其他路段蔓延的过程。

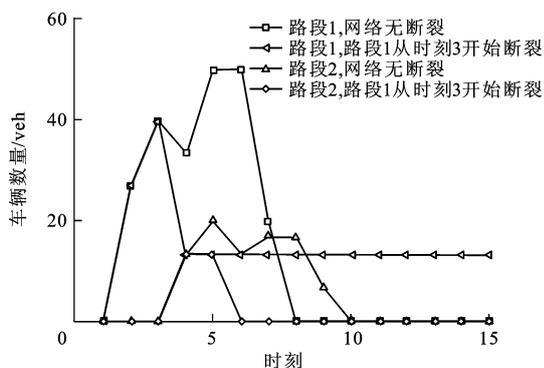


图 5 网络受损前后路段车辆数量

Fig. 5 Vehicle amounts before and after network damage

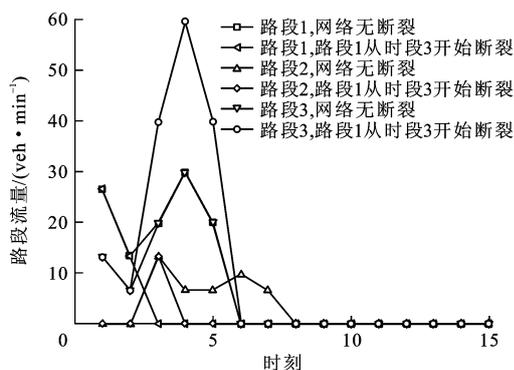


图 6 网络受损前后路段流入量

Fig. 6 Inflows before and after network damage

灾害发生后,往往出现大流量交通流向下游路段传播,图 7~10 给出了网络路段受损前后路段 3、6、7、10 上车辆数量随时间的变化情况,路段 1 受损使得路段 3、6、7、10 上的车辆数量迅速增加了近 1 倍,车辆数量的增加导致各路段的阻抗增加,各个路段的车辆通过时间增加,使得车辆需要耗费更多的时间完成出行。这表明反应型动态交通流模型还能描述交通流的激荡波从上游路段向下游路段蔓延的过程。

为了能揭示交通网络在路段受损条件下的脆弱性,本文在各时刻依次阻断各路段,再利用动态模型

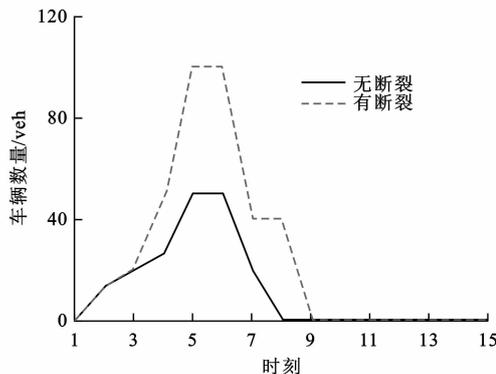


图 7 网络受损前后路段 3 的车辆数量

Fig. 7 Vehicle amounts at section 3 before and after network damage

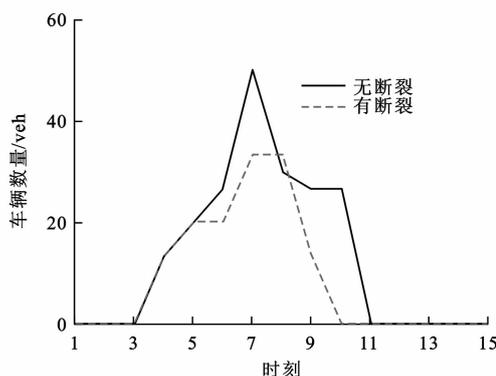


图 8 网络受损前后路段 6 的车辆数量

Fig. 8 Vehicle amounts at section 6 before and after network damage

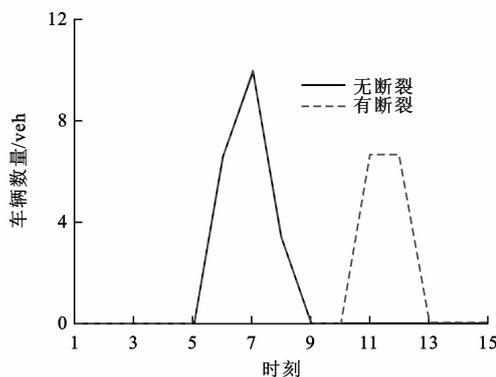


图 9 网络受损前后路段 7 的车辆数量

Fig. 9 Vehicle amounts at section 7 before and after network damage

获得对应路网的交通流分布,进而根据式(5)计算交通网络脆弱性指数。由于每个时刻仅断裂 1 个路段,因此,12 个路段仅有 12 个时刻的道路网络脆弱性指数,结果见图 11,纵坐标值越大表明对应路段在该时刻失效对网络交通影响越大,若脆弱性指数为正,表示路段受损延长了用户在网络中的停留时间;反之,则意味着路段失效反而节约了出行时间。

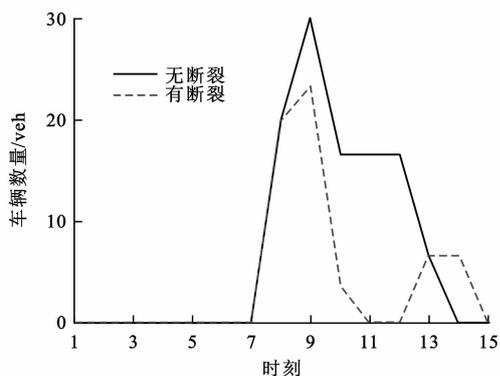


图 10 网络受损前后路段 10 的车辆数量

Fig. 10 Vehicle amounts at section 10 before and after network damage

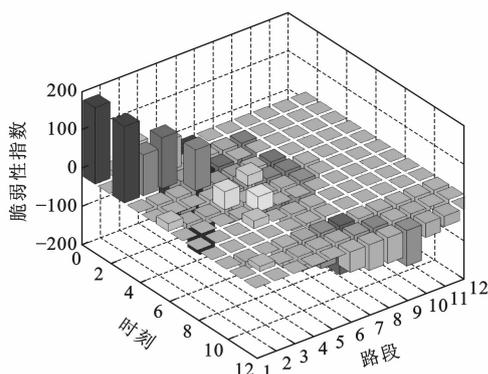


图 11 路网脆弱性指数

Fig. 11 Road network vulnerability indexes

出现后者的原因在于,某些路径交通堵塞的时间大于绕行到其他路段的时间,此时该路段的受损将交通流分流到其他路段使得交通堵塞被分散,从而降低原最短路径上的车辆数量与流量,缩短整个网络的出行时间。图 11 中的路段 1~3 在前 3 个时段,路段 4 在时段 4,对于网络交通具有相当的脆弱性。路段 1 在起始时刻受损,用户只能选择路段 3 作为起始路段,这意味着如果网络中连接起始节点的路段较少,那么任一起始路段的失效都会造成严重的交通拥挤,因此,对应的网络总阻抗比未受损网络大得多。而在后期,接近终点的路段受损,出行者将有较多备选路径到达目的地,不会出现某些路段流量剧增的情况,因此,网络总阻抗几乎无变化。综上分析,基于反应型的动态网络交通流模型能有效辨识道路网络脆弱性,即能度量各时刻各路段受损对道路网络整体交通造成的破坏程度。

5 结 语

本文在静态道路网络脆弱性指数中引入时间维度,从而将脆弱性指数动态化,实现了灾害条件下的

道路网络交通受损程度的量化。基于这一动态化的脆弱性指数,通过分析路段和节点在时间和空间上的流量传播过程与约束,给出离散的瞬时动态用户最优路径选择均衡条件,从而建立起反应型的动态用户均衡网络交通流模型。构建扩张时空网络,设计了对角化的启发式算法来求解模型。基于所建模型与算法,评价各受损路段对应的道路网络脆弱性指数。反应型的动态交通流模型不仅能描述交通流从上游向下游路段传播的过程,还能抓住灾害发生后常出现车辆绕开受损路段向其他路段蔓延的过程,能有效辨识道路网络在各个路段各个时刻的脆弱性,这将为路段抢修资源分配和道路网络改造优先时序决策提供支持。文中提供的动态模型没有考虑路段的断面通行能力约束和路段容量约束,会给出网络路段能力无限的假象,需要在今后的研究中克服。

参 考 文 献 :

References :

- [1] BERDICA K. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done[J]. *Transport Policy*, 2002, 9(2): 117-127.
- [2] SAREWITZ D, PIELKE R, KEYKHAH M. Vulnerability and risk: some thoughts from a political and policy perspective[J]. *Risk Analysis*, 2003, 23(4): 805-810.
- [3] D'ESTE G M, TAYLOR M A P. Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks[C]//IIDA Y, BELL M G H. *The Network Reliability of Transport*. Oxford: Elsevier, 2003: 23-44.
- [4] HOLMGREN A. Vulnerability analysis of electrical power delivery networks[R]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2004.
- [5] SOHN J. Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: an accessibility approach[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2006, 40(5): 491-506.
- [6] SOHN J, KIM T J, HEWINGS G J D, et al. Retrofit priority of transportation network links under an earthquake[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2003, 129(4): 195-210.
- [7] JENELIUS E, PETERSEN T, MATTSSON L. Importance and exposure in road network vulnerability analysis[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2006, 40(7): 537-560.
- [8] SCOTT D M, NOVAK D C, AULTMAN-HALL L, et al. Network robustness index: a new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks[J]. *Journal of Transport Geography*, 2006, 14(3): 215-227.
- [9] 廖 军,安毅生,张绍阳,等. 路段动态交通安全综合评价模型[J]. *交通运输工程学报*, 2009, 9(4): 79-84.

- LIAO Jun, AN Yi-sheng, ZHANG Shao-yang, et al. Synthesized evaluation model of dynamic traffic safety for road section[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, 9(4): 79-84. (in Chinese)
- [10] 张勇,屠宁雯,姚林泉.城市道路交通网络脆弱性辨识方法[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(4): 154-161.
- ZHANG Yong, TU Ning-wen, YAO Lin-quan. Urban road traffic network vulnerability identification method[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(4): 154-161. (in Chinese)
- [11] SULLIVAN J L, NOUAK D C, AULTMAN-HALL L, et al. Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: a link-based capacity-reduction approach [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2010, 44(5): 323-336.
- [12] 刘思峰,万寿庆,陆志鹏,等.复杂交通网络中救援点与事故点间的路段重要性评价模型研究[J]. *中国管理科学*, 2009, 17(1): 119-124.
- LIU Si-feng, WAN Shou-qing, LU Zhi-peng, et al. The importance of highway section evaluation model in complex network between accident point and rescue point in the emergency situations [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2009, 17(1): 119-124. (in Chinese)
- [13] 杨露萍,钱大琳.道路交通网络脆弱性研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2012, 12(1): 105-110.
- YANG Lu-ping, QIAN Da-lin. Vulnerability analysis of road networks[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2012, 12(1): 105-110. (in Chinese)
- [14] BELL M G H, KANTURSKA U, SCHMÖCKER J D, et al. Attacker-defender models and road network vulnerability[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2008, 366(2): 1893-1906.
- [15] BELL M G H. The use of game theory to measure the vulnerability of stochastic networks[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2003, 52(1): 63-68.
- [16] PAMELA M M, MAHMASSANI H. Methodology for determining vulnerable links in a transportation network[J]. *Transportation Research Record*, 2004(1882): 88-96.
- [17] 刘天亮,黄海军,陈剑.考虑风险规避和认知更新的日常择路行为演进[J]. *交通运输工程学报*, 2008, 8(4): 90-94, 103.
- LIU Tian-liang, HUANG Hai-jun, CHEN Jian. Evolution of day-to-day route choice behavior considering risk aversion and perception updating [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2008, 8(4): 90-94, 103. (in Chinese)
- [18] RAN B, BOYCE D E. A link-based variational inequality formulation of ideal dynamic user-optimal route choice problem[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1996, 4(1): 1-12.
- [19] LARSSON T, PATRIKSSON M. An augmented Lagrangean dual algorithm for link capacity side constrained traffic assignment problems[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1995, 29(6): 433-455.
- [20] RAN B, BOYCE D E, LEBLANC L J. A new class of instantaneous dynamic user-optimal traffic assignment models[J]. *Operations Research*, 1993, 4(1): 192-202.
- [21] 张菁,陈荔.道路网结构可靠性分析[J]. *长安大学学报:自然科学版*, 2010, 30(4): 77-81.
- ZHANG Jing, CHEN Li. Reliability analysis on structure stability of regional road network [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2010, 30(4): 77-81. (in Chinese)
- [22] 宋永朝,潘晓东,陈聪,等.面向应急疏散的山区公路交通节点连通性研究[J]. *中国公路学报*, 2010, 23(4): 102-106, 126.
- SONG Yong-chao, PAN Xiao-dong, CHEN Cong, et al. Study of connectivity of traffic nodes on mountainous highway for emergency evacuation [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(4): 102-106, 126. (in Chinese)
- [23] 赵岩,高社生,姜微微.突发灾难下大型路网中的人员疏散模型[J]. *长安大学学报:自然科学版*, 2013, 33(2): 89-94.
- ZHAO Yan, GAO She-sheng, JIANG Wei-wei. Model of a large-scale transportation network for evacuation under emergency [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2013, 33(2): 89-94. (in Chinese)
- [24] 郑长江,李悦,王婷.非常态下城市道路交通检测器布局优化方法[J]. *中国公路学报*, 2011, 24(5): 100-106.
- ZHENG Chang-jiang, LI Yue, WANG Ting. Layout optimization method of urban road traffic detectors under abnormal state [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, 24(5): 100-106. (in Chinese)
- [25] LIAO Fei-xiong, ARENTZE T, TIMMERMANS H. Multi-state supernetworks: recent progress and prospects [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition*, 2014, 1(1): 13-27.