

应急交通疏散中的逆向车道操作方法

周亚飞, 蔡靖, 程霄楠, 谢天生

交通运输部水运科学研究院安全与应急技术研究中心, 北京 100088

摘要 逆向车道操作方法是应急交通疏散研究的重要课题。以元胞传输模型(CTM)理论为基础,以最小化总行程时间为目标函数,构建了逆向车道操作数学模型。将模型应用于实例,利用 MathProg 语言和 Lp_solve 求解器对模型进行数值求解,利用微观交通仿真软件 VISSIM 对疏散过程进行微观仿真,并通过数值结果与仿真结果的比较,对模型进行了验证,从而使应急交通疏散的研究更贴近于实际情况。研究表明,该模型的逆向车道操作方法可显著提高疏散路网容量和疏散效率。

关键词 应急交通疏散;逆向车道操作;元胞传输模型;数值求解;微观交通仿真

中图分类号 X951

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.h2.006

Contraflow Operation in Emergency Traffic Evacuation

ZHOU Yafei, CAI Jing, CHENG Xiaonan, XIE Tiansheng

Security and Emergency Technology Research Center, China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China

Abstract Contraflow operation is an important measure in the emergency traffic evacuation. Based on the theory of the cell transmission model (CTM), a contraflow operation model is built with the total travel time as the objective function. With the numerical solution and the microscopic traffic simulation methods combined, the contraflow operation model is solved numerically with MathProg language and Lp_solve solver, the evacuation process is simulated microscopically using the microscopic traffic simulation software VISSIM. The numerical results and the simulation results are compared to make the model closer to the actual situation. The results show that the contraflow operation can significantly improve the road network capacity and the evacuation efficiency.

Keywords emergency traffic evacuation; contraflow operation; cell transmission model; numerical solution; microscopic traffic simulation

0 引言

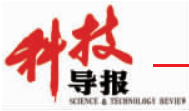
台风、飓风、洪水等自然灾害可能对人员的健康及安全造成严重的风险和威胁。这种情况下,大规模和长距离的应急交通疏散就被用作保护人员远离潜在危害的重要手段^[1]。而如何更好地利用现有的道路网络,是改善应急交通疏散行动的关键。应急交通疏散中的逆向车道操作(或车道逆转操作),是指将部分或全部向危险方向行驶的车道转变为向安全方向行驶,并供疏散车辆使用。这种操作是基于向危险方向行驶的车辆通常较少,而疏散车辆又通常超过向安全方向行驶的道路网络容量。

FEMA^[2](2000)通过研究认为,相对于传统的 2 条出境车道结构,完全逆转 2 条车道可以将道路网络容量增加 70%,而逆转 1 条车道可以将道路网络容量增加 30%。美国大西洋和墨西哥湾沿岸 9 个州的负责机构在制定飓风疏散计划时,已广泛采用逆向车道操作^[3,4],如乔治亚和南卡罗莱纳州在

1999 年的飓风“Floyd”疏散中就执行了高速公路逆向车道计划。Tuydes 等^[5]提出了逆向车道操作的链接-耦合技术,适用于在逆转时可以交换容量的道路网络段。Tuydes^[6]引入了基于车道的容量可逆性(LCR)和全部或无容量可逆性(TCR)的概念。Tuydes 等^[7]提出了一种同时使用仿真分配和禁忌搜索算法的启发式算法,并应用在大规模疏散的道路网络中。Mahmassani 等^[8]使用仿真软件 DYNASMART 提出了一种优化方案用于动态容量再分配。Wolshon^[9,10]讨论了有关飓风疏散的逆向车道操作问题,并强调了逆转路段入口和出口处的车辆路线重新分配。利用微观仿真程序 CORSIM, Theodoulou 等^[11]及 Lim 等^[12]在评估新奥尔良市的飓风疏散计划时,分别分析了逆向路段的入口和出口设计。Kwon 等^[13]使用仿真软件检验明尼阿波利斯市中心的疏散计划时也强调了逆向入口处的关键设计。本文将数值求解与微观交通仿真方法结合起来,研究应急交通疏散的逆向车道操作方法。

收稿日期:2013-03-25;修回日期:2013-08-19

作者简介:周亚飞,博士,助理研究员,研究方向为风险评价、公共安全及防灾减灾规划等。电子信箱:nkzhouyf@gmail.com



1 逆向车道操作模型

1.1 元胞传输模型 (CTM) 理论

Daganzo^[14,15]提出的元胞传输概念的基本思路是把道路链接转换成大小相等的部分,或称为元胞,可以自由流动速度穿越 1 个单位时间间隔。然后,车辆在元胞中的移动用 2 个关系定义,即流量传播关系和流量守恒方程。流量传播关系是基于上游/下游的交通条件来确定 2 个元胞之间的流量,而流量守恒方程则描述元胞状态,即每个元胞中的车辆数随着时间的演变。

1.2 逆向车道操作模型构建

逆向车道操作通过将入境车道逆转为出境车道,以增加可用路网的容量。逆向车道操作的主要问题之一是确定从普通车道到逆向车道的入口位置。这些入口也被称为交叉口。

本文利用元胞传输模型 (CTM, Cell Transmission Model) 理论,构建一种优化模型来辅助决策者确定逆向交叉口的位位置,特别是在有最大数量限制时(由于人力和后勤)确定交叉口的最佳位置,从而优化疏散行动。

目标函数为

$$\min Z = \sum_{i \in C_G} \sum_{t \in T} x_i^t \Delta t \quad (1)$$

约束条件如下:

$$x_i^t = x_i^{t-1} + \sum_{k \in \Gamma^+(i)} y_k^{t-1} - \sum_{k \in \Gamma^-(i)} y_k^{t-1} \quad \forall i \in C \setminus (C_R \cup C_S), \forall t \in T \quad (2)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + d_i^t - \sum_{k \in \Gamma^-(i)} y_k^{t-1} \quad \forall i \in C_R, \forall t \in T \quad (3)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + \sum_{k \in \Gamma^+(i)} y_k^{t-1} \quad \forall i \in C_S, \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{k \in \Gamma^-(i)} y_k^t \leq x_i^t \quad \forall i \in C \setminus C_S, \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{k \in \Gamma^+(i)} y_k^t \leq Q_i^t \quad \forall i \in C \setminus C_R, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{k \in \Gamma^-(i)} y_k^t \leq Q_k^t \quad \forall i \in C \setminus C_S, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{k \in \Gamma^+(i)} y_k^t \leq N_k - x_i^t \quad \forall i \in C \setminus C_R, \forall t \in T \quad (8)$$

$$x_i^t \leq \delta_i^t N_i^t \quad \forall i \in C_G, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{i \in C_G} \delta_i^t \leq \max C_r \quad \forall i \in C_G, \forall t \in T \quad (10)$$

$$x_i^t \geq 0 \quad \forall i \in C \quad (11)$$

$$y_k^t \geq 0 \quad \forall (i, j) \in H \quad (12)$$

$$0 \leq \delta_i^t \leq 1 \quad \delta_i^t \text{ 为整数} \quad (13)$$

$$x_i^0 = \bar{x}_i \quad \forall i \in C \quad (14)$$

$$y_{ij}^0 = \bar{y}_{ij} \quad \forall (i, j) \in H \quad (15)$$

以上各式中:

C 为元胞的集合,它包括一般元胞 C_0 、汇合元胞 C_M 、发散元胞 C_D 、源元胞 C_R 、库元胞 C_S 和交叉口元胞 C_G (交叉口元胞

也属于一般元胞);

H 为元胞之间链接的集合,它包括

源链接 $H_R = \{(i, j) | j \in C_R\}$,

库链接 $H_S = \{(i, j) | j \in C_S\}$,

一般链接 $H_O = \{(i, j) | i \in (C_0 \cup C_M), j \in (C_0 \cup C_D)\}$,

汇合链接 $H_M = \{(i, j) | i \in (C_0 \cup C_G), j \in C_M\}$,

发散链接 $H_D = \{(i, j) | i \in C_D, j \in (C_0 \cup C_G)\}$;

x_i^t 为元胞 i 在时刻 t 容纳的车辆数; Q_i^t 为元胞 i 在时刻 t 的最大流量; N_i^t 为元胞 i 在时刻 t 可以容纳的最大车辆数; d_i^t 为起点元胞 i 在时刻 t 的需求; y_{ij}^t 为时刻 t 从元胞 i 迁移到元胞 j 的车辆数; $\max C_r$ 为交叉口的最大数量; T 为总分析时间; $\Gamma^-(i)$ 为元胞 i 下游元胞的集合; $\Gamma^+(i)$ 为元胞 i 上游元胞的集合。

模型中,式(1)为总行程时间,优化模型的目标是最小化总行程时间;式(2)为汇合元胞、发散元胞和普通元胞的流量守恒约束;式(3)和式(4)分别为源元胞和库元胞的流量守恒约束;式(5)和式(6)是定义元胞向下一个元胞传送能力的约束条件;式(7)和式(8)是定义从上一个元胞接收车辆能力的约束条件。公式(5)~(8)确保了从一个元胞转移到下一个元胞的车辆数必须小于上游元胞的发送能力和下游元胞的接收能力。

式(9)在约束条件中引入了 1 个二进制变量 δ_i^t 。这个变量保证了交叉口元胞在不运行时可以没有车辆^[6]。如果 $\delta_i^t = 0$,则式(9)变为 $x_i^t \leq 0$;其他情况则为 $x_i^t \leq N_i^t$ 。因此,当 δ_i^t 为 0 时,车辆不能通过交叉口进入逆向车道。

式(10)规定了运行的交叉口数不超过允许的最大数量 ($\max C_r$)。如前所述,交叉口数量受限于维持交叉口运行的可用人力资源数量。

式(11)和式(12)为非负约束。式(13)说明了 δ_i^t 是 1 个二进制变量。式(14)和式(15)为初始条件。

这个模型也可根据需求和交通条件,在每个时间步长确定最佳的交叉口位置。在事故或车辆燃料耗尽而造成不可预见的道路拥堵时,动态交叉口会非常有用^[5-7,17-19]。

1.3 模型数值求解方法

在构建了逆向车道操作的数学模型后,利用 MathProg 语言和 Lp_solve 求解器对其进行求解。

MathProg 是一种建模语言,用于描述线性数学规划模型^[20,21]。Lp_solve 是一种线性(整数)规划求解器,并基于修正的单纯形法和分枝定界法^[21]。

2 微观交通仿真分析方法

微观交通仿真软件 (VISSIM) 是德国 PTV 公司开发的微观交通流仿真软件系统,用于分析交通系统中的各种运行。VISSIM 是一种离散和随机的微观仿真软件,时间步长为 0.1s。车辆的横向运动(车道变换)采用基于规则(Rule-based)的算法,纵向运动采用德国 Karlsruhe 大学 Wiedemann 教授的“心理-生理跟车模型”。该软件系统在分析交通运行情况时

考虑车道类型、交通组成、交通信号控制、停让控制等众多条件,功能包括分析、评价、优化交通网络、设计方案比较等,是分析许多交通问题的有效工具^[23]。

VISSIM 采用的核心模型是 Wiedemann 于 1974 年建立的生理-心理驾驶行为模型。该模型示意如图 1 所示,图中的 AX 表示静止车辆之间的期望距离边界, BX 表示低速度差下的最小期望跟驰距离的边界, SDV 或 CLDV 表示接近前车的边界, OPDV 表示速度差的边界 (后车比前车的速度小),

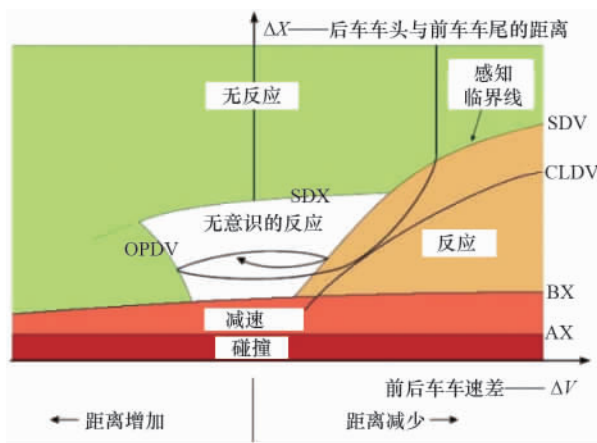


图 1 跟车模型

Fig. 1 Car-following model

SDX 表示最大跟驰距离的边界。该模型的基本思路是,一旦后车驾驶员认为他与前车之间的距离小于其心理(安全)距离时,后车驾驶员开始减速。由于后车驾驶员无法准确判断前车车速,后车车速会在一段时间内低于前车车速,直到前后车之间的距离达到另一个心理(安全)距离时,后车驾驶员开始缓慢地加速,由此周而复始,形成一个加速、减速的迭代过程^[24]。

VISSIM 的仿真流程如图 2 所示。

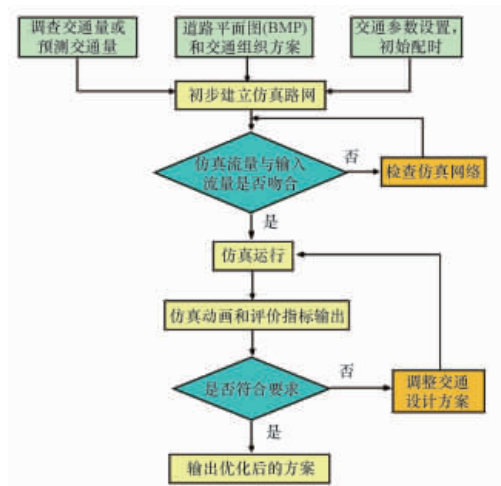


图 2 VISSIM 仿真流程

Fig. 2 VISSIM simulation flow

3 实例应用

以某疏散主干道为例,利用 MathProg 和 Lp_solve 对模型进行数值求解,利用微观交通仿真软件 VISSIM 对疏散过程进行仿真,并对数值结果和仿真结果进行比较。通过实例分析,对所构建的逆向车道操作模型进行验证。

3.1 疏散情景

某疏散主干道的疏散情景如图 3 所示。该疏散主干道长约 20km,图 3 中的 2 条路线分别为逆向车道和正向车道(上

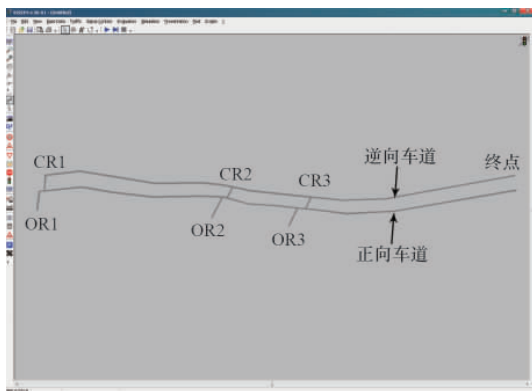


图 3 疏散情景

Fig. 3 Evacuation scene graph

面路线为逆向车道,下面路线为正向车道),其中 OR1、OR2、OR3 为 3 个疏散起点, CR1、CR2、CR3 为供选择的交叉口。正向车道的最大车速为 40km/h,逆向车道的最大车速为 35km/h (由于不熟悉路况等驾驶因素)。根据各起点处的居民分布情况,确定各起点的交通需求,见表 1。

表 1 各疏散起点的交通需求

Table 1 Traffic demand at each origin

疏散起点	总车辆数/辆	加载速率/车辆·h ⁻¹
OR1	7200	2400
OR2	4200	1400
OR3	5400	1800

3.2 模型数值求解

选取 2min 为单位时间步长,将图 3 中的疏散路网转化为元胞连接图,则正向车道每个元胞长约 1300m,逆向车道每个元胞长约 1170m。元胞连接如图 4 所示,其中方格中的数字为元胞编号。

根据各起点处的交通需求、元胞连接图、车辆行驶速度等参数,利用 MathProg 语言和 Lp_solve 求解器对逆向车道操作模型进行求解,得到不同情况下的最佳交叉口选择,见表 2。

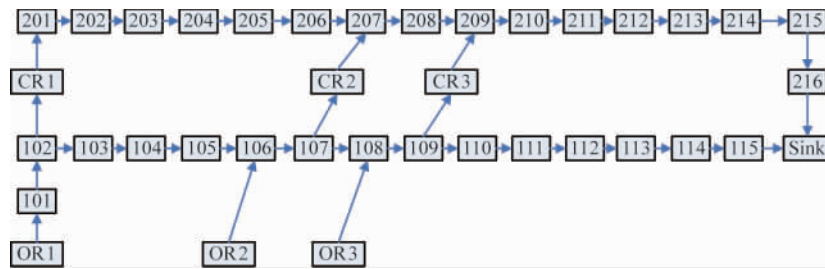


图4 元胞连接图

Fig. 4 Cell connection graph

表2 不同情况下的最佳交叉口

Table2 Best intersections under different scenes

最大交叉口数量	1个交叉口	2个交叉口
交叉口设置	CR2	CR1,CR2
平均速度/km·h ⁻¹	31.923	32.755
疏散完成时间/min	223.327	219.774
总行程时间/h	8510.836	8327.129

从表2可以看出,当最多设置1个交叉口时,最佳交叉口为CR2;当最多设置2个交叉口时,最佳交叉口为CR1和CR2。

3.3 微观交通仿真

在微观交通仿真软件VISSIM中对疏散路网进行建模。设置各项参数后,运行VISSIM对疏散过程进行仿真。仿真结果列于表3,到达终点处的车辆数变化如图5和图6所示。

表3 微观交通仿真结果

Table3 Microscopic simulation results

交叉口设置	平均速度/ km·h ⁻¹	疏散完成时间/ min	总行程时间/ h
CR2	31.649	230.4667	8602.207
CR1,CR2	32.397	231.1333	8441.344

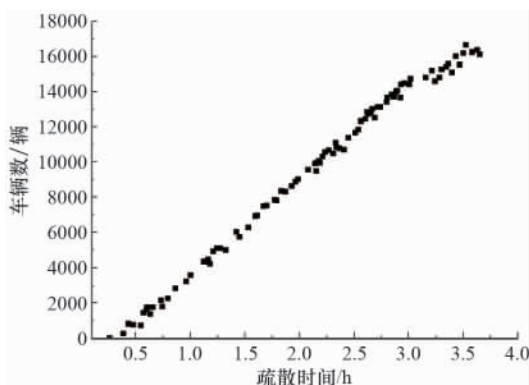


图5 终点处车辆数随时间变化(CR2)

Fig. 5 Cumulative arriving curves (CR2)

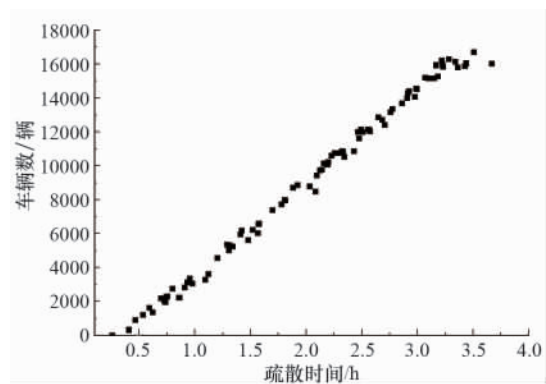


图6 终点处车辆数随时间变化(CR1&CR2)

Fig. 6 Cumulative arriving curves (CR1&CR2)

从图5和图6可以看出,在疏散开始的前20min内,几乎没有车辆到达终点,这说明车辆从起点加载到路网中需要一定的时间。随着疏散的进行,到达终点处的车辆数不断增多,且由于道路比较通畅,车辆数的增长率较大,基本呈线性变化。当交叉口为CR2时,在疏散开始3h后,到达终点处的车辆数变化趋于平缓,直到车辆全部疏散出路网。当交叉口为CR1和CR2时,在疏散开始3h40min后,到达终点处的车辆数变化趋于平缓,这说明当选取2个交叉口时,疏散路网的利用率较高,道路上的拥堵现象较少。

3.4 数值结果与仿真结果比较分析

数值计算结果与仿真结果的比较如图7、图8、图9所示,其中图7为平均速度比较,图8为疏散完成时间比较,图9为总行程时间比较。

从比较结果可以看出,数值计算结果与仿真结果基本一致,数值计算结果中的平均速度较大于仿真结果,因而相应的疏散完成时间和总行程时间较小。仿真结果中,1个交叉口的疏散完成时间小于2个交叉口,但总行程时间却大于2个交叉口,说明设置2个交叉口虽然疏散时间较长,但由于产生拥堵情况较少,因此疏散速度较快。

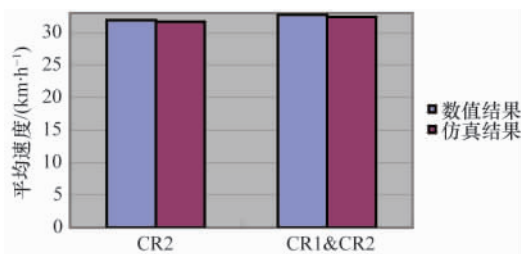


图 7 平均速度比较

Fig. 7 Comparison of average speed

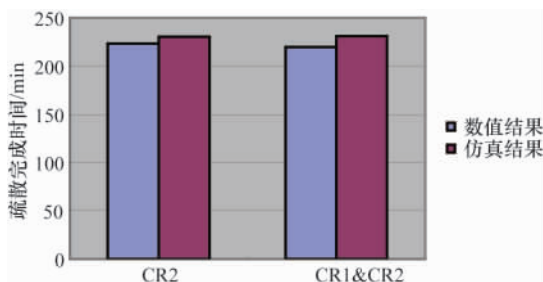


图 8 疏散完成时间比较

Fig. 8 Comparison of clearance time

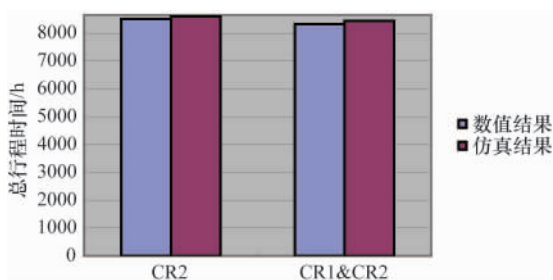


图 9 总行程时间比较

Fig. 9 Comparison of total travel time

4 结论

以 CTM 理论为基础,以最小化总行程时间为目标函数,构建了逆向车道操作模型。以长约 20km 的某疏散主干道为例进行模型应用,通过数值求解与微观交通仿真,确定了不同最大交叉口数量时的最佳位置,表明通过逆向车道操作,可以更好地利用现有道路网络,提高疏散效率。

将数值求解与微观仿真方法结合起来,通过数值求解结果与微观仿真结果的比较分析,相互验证,可以使应急交通疏散的研究更贴近于实际情况,为应急交通疏散提供决策参考和依据。

参考文献 (References)

[1] Sorensen J H, Shumpert B L, Vogt B M. Planning for protective action decision making: Evacuate or shelter-in-place[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 109 (1): 1-11.
 [2] FEMA. Southeast united states hurricane evacuation traffic study-executive summary[R]. Washington: Federal Emergency Management Agency, 2000.

[3] Urbina E A. A state-of-the-practice review of hurricane evacuation plans and policies[R]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2002.
 [4] Urbina E, Wolshon B. National review of hurricane evacuation plans and policies: a comparison and contrast of state practices[J]. Transportation Research A, 2003, 37 (3): 257-275.
 [5] Tuydes H, Ziliaskopoulos A. Network re-design to optimize evacuation contraflow[C]. Presented at the 83rd Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, January 11-15, 2004.
 [6] Tuydes H. Network traffic management under disaster conditions[D]. Evanston: Northwestern University, 2005.
 [7] Tuydes H, Ziliaskopoulos A. A tabu-based heuristic approach for the optimization of network evacuation contraflow[C]. Presented at the 85th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, January 22-26, 2006.
 [8] Mahmassani H, Sbayti H. Optimal scheduling of contraflow operations for network evacuation planning[C]. Presented at the 2005 INFORMS Annual Meeting, San Francisco, November 13-16, 2005.
 [9] Wolshon B. "One Way Out": Contraflow freeway operation for hurricane evacuation[J]. Natural Hazards Review, 2001, 2 (3): 105-112.
 [10] Wolshon B. Planning for the evacuation of New Orleans[J]. ITE Journal, 2002, 72 (2): 44-49.
 [11] Theodoulou G, Wolshon B. Modeling and analyses of freeway contraflow to improve future evacuations[C]. Presented at the 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, January 11-15, 2004.
 [12] Lim E, Wolshon B. Modeling and performance assessment of contraflow evacuation termination points[C]. Presented at the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, January 9-13, 2005.
 [13] Kwon E, Pitt S. Evaluation of emergency evacuation strategies for downtown event traffic using a dynamic network model[C]. Presented at the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, January 9-13, 2005.
 [14] Daganzo F C. The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory[J]. Transportation Research: Part B, 1994, 28B(4): 269-287.
 [15] Daganzo F C. The cell transmission model II network traffic[J]. Transportation Research: Part B, 1995, 29B(2): 79-93.
 [16] Kalafatas G, Peeta S. An exact graph structure for dynamic traffic assignment: formulation, properties, computational experience[C]. TRB 2007 Annual Meeting, Washington, January 21-25, 2007.
 [17] Tuydes H, Ziliaskopoulos A. The network evacuation problem and solution algorithms [C]. Presented at the 2005 INFORMS Annual Meeting, San Francisco, November 13-16, 2005.
 [18] Liu Y. An Integrated Optimal Control System for Emergency Evacuation [D]. Baltimore: University of Maryland, 2007.
 [19] Shen W, Nie Y, Zhang, H M. A dynamic network simplex method for designing evacuation Plans[C]. TRB 2007 Annual Meeting, Washington, January 21-25, 2007.
 [20] Robert Fourer, David M Gay, Brian W. Kernighan. A modeling language for mathematical programming[J]. Management Science, 1990(36): 519-554.
 [21] Andrew M. Modeling language GNU MathProg[EB/OL]. [2012-11-16]. <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/MathProg.htm>.
 [22] Software Foundation Inc. Lp_solve reference guide menu [EB/OL]. [2012-11-16]. <http://lpsolve.sourceforge.net/>.
 [23] PTV-AG. VISSIM user manual-version 4.20[EB/OL]. [2012-11-16]. <http://www.vissim.de/index.php?id=1801>.
 [24] Wiedemann. Modelling of RTI-Elements on multi-lane roads[J]. Advanced Telematics in Road Transport Edited by the Commission of the European Community, 1991(13): 1001-1010.

(责任编辑 韩星明)