

DOI:10.13203/j.whugis20150482



文章编号:1671-8860(2018)03-0349-07

利用反向流和冲突消除进行人车混行疏散路网优化

李秋萍^{1,2} 栾学晨^{1,3} 周素红^{1,2} 张星⁴

- 1 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州, 510275
- 2 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广东 广州, 510275
- 3 广东瑞图万方科技股份有限公司, 广东 佛山, 528305
- 4 深圳大学深圳市空间信息智能感知与服务重点实验室, 广东 深圳, 518060

摘要:城市突发事件时人员会选择不同的交通方式(步行、驾车等)进行疏散,在交叉口处极易出现人车混行。提出了一种利用反向流和冲突消除策略的人车混行疏散路网优化方法,对主要疏散路径进行人、车流的反向以扩大通行能力,并在交叉口处禁止人、车的部分转向来进行人车分流以消减人车冲突。建立了以平均疏散时间和平均疏散路径长度最小为目标的优化模型,并利用遗传算法求解最优的人车分流方案。以武汉市2 km范围内的路网为例进行实验,并针对不同的人车混合比例进行模型敏感性分析。结果表明,所提方法能通过人车混行网络设计提高疏散效率,在行人比例较高的情况下,平均疏散时间及疏散路径长度的改善较明显。

关键词:城市交通;疏散路网优化;冲突消除;反向流;人车混行

中图法分类号: P208

文献标志码: A

城市较大范围的应急疏散往往会涉及到大量的疏散对象(行人、车辆等)^[1],然而现有的道路设施很难应付短时间内猛增的人、车交通需求^[2-3],同时,交叉口的人车冲突使疏散过程更加复杂,有必要研究针对人车混合疏散路网的优化方法以提高人车混合流的疏散效率。

行人是城市交通系统中不可忽略的部分,然而目前在人车混合疏散路网优化方面的研究却相对较少。大部分研究是针对人车混合疏散流模拟^[4]、人车疏散路径优化分配^[2]。例如文献^[4]提出了混合元胞自动机(cellular automata, CA)模型来模拟疏散过程中的行人、车辆的运动及人车之间的冲突。文献^[2]改进了 k 最短路径算法进行人车疏散路径优化分配。疏散网络优化研究^[5-13]主要以车辆作为疏散对象,通过冲突消除和反向车道两类策略来优化疏散网络。冲突消除策略通过控制交叉口不同方向的车流转向来消除车流之间的冲突、减轻交叉口的拥堵^[5-9]。反向车道策略通过将双向车道全部或部分逆向,缓解撤

离方向上的交通压力^[9-13]。但上述研究忽略了疏散过程中行人的影响,很难直接运用在人车混合疏散系统的路网优化中。

本文综合上述两种策略对人车混合疏散路网进行优化,对主要疏散路径进行人、车流的反向以扩大道路通行能力,并在交叉口处禁止行人、车辆的部分转向来进行人车分流以消减人车冲突,提高人车混行路网的整体疏散效率。

1 疏散路网表达及优化策略

1.1 疏散路网表达

本文采用两层结构来表达疏散路网,上层网络为节点-弧段结构,用有向图 $G(N, A)$ 表示,其中 N 为节点集合,表示各交叉口, A 为弧段集合,表示各路段(图1(a))。为了描述行人、车辆各自的运动方向以及人车冲突,对上层网络进行扩展,生成下层行人子网络和车辆子网络(图1(b)、1(c))。行人子网络描述行人在人行道及人行横

收稿日期:2016-03-21

项目资助:空间信息智能感知与服务深圳市重点实验室(深圳大学)开放基金(42990005);国家自然科学基金(41501424, 41271166, 41522104, 41301511);深圳市科技计划基础研究项目(JCYJ20140418095735587);中央高校基本科研业务费专项资金资助(15lgjc38)。

第一作者:李秋萍,博士,讲师,主要从事应急疏散交通流建模及疏散方案优化研究。liqp3@mail.sysu.edu.cn

通讯作者:栾学晨,博士。luanxuechen@ritu.cn

道上的运动方向,车辆子网络描述车辆在车行道上的运动方向。以十字交叉口为例,行人和车辆的冲突点一共8个,均匀分布在交叉口的4个方向上(图1(d))。

1.2 基于疏散主路径的反向流策略

对于单一事故点(如有毒气体泄漏、核辐射等)引起的紧急疏散,交通需求具有明显的不对称

性,交通流由事故点向周边区域呈放射状发散。针对这种放射状特点,本文提出了基于疏散主路径的反向流策略,通过在主要的放射轴上进行人车流的单行设置扩大道路通行能力。图2(a)为一个示例网络,基于疏散主路径的人车反向流设置方法如下。

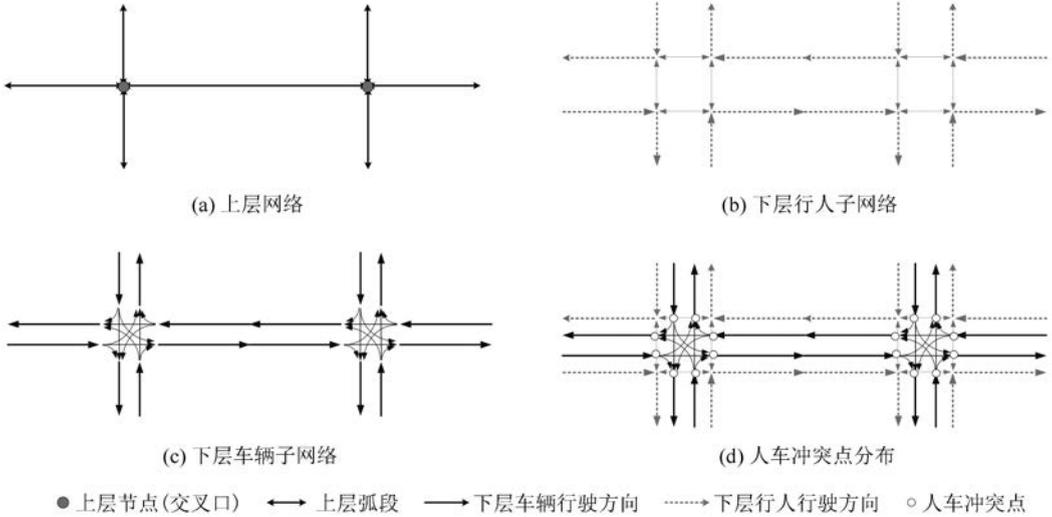


图1 疏散网络表达

Fig.1 Evacuation Network Representation

1)采用 Dijkstra 算法计算从事故点通向4个出口($E_1 \sim E_4$)的最短路径 $\overline{sp} = \{sp^{E_1}, sp^{E_2}, sp^{E_3}, sp^{E_4}\}$ 。路段 ij 的权值 d_{ij} 为:

$$d_{ij} = \frac{L(i,j)^\alpha}{W(i,j)^\beta}, i, j \in G(N, A)$$

$$\alpha \geq 0, \beta \geq 0 \quad (1)$$

式中, $L(i, j)$ 为路段 ij 的长度; $W(i, j)$ 为路段 ij 的宽度; α, β 分别为 $L(i, j)$ 和 $W(i, j)$ 的相对重要性。

$\overline{sp} = \{sp^{E_1}, sp^{E_2}, sp^{E_3}, sp^{E_4}\}$ 即为当前网络的疏散主路径。

2)对包含在疏散主路径中的路段同时进行车道和人行道的逆行设置以最大化疏散主路径的利用效率,如图2(b)所示。

通过4条疏散主路径将疏散区域划分成4个相对独立的分区(见图2),在各个路网分区内分别实施交叉口冲突点消除策略。

1.3 交叉口人车冲突消除策略

图3(a)示例了十字交叉口处的人车冲突点分布。本文提出3种人车限行方案来进行交叉口处的人车分流。限行方案1为在交叉口的某一侧分支(如图3(b)中的右侧分支)放置路障,车辆及行人的转向同时受到限制,人车冲突点减少为2。

限行方案2和限行方案3分别为在交叉口设置相邻及相对两侧路障(如图3(c)、3(d)),人车冲突点数目减少为0。按照本文提出的路障设置方法,在一侧分支设置路障后,车辆完全被禁止进入该路段,行人在疏散过程中有机会独占该侧分支的整条路段,有助于提高行人疏散效率。

以十字型交叉口 N_i 为例,对其每个分支进行编号 $\{N_i^1, N_i^2, N_i^3, N_i^4\}$, 用 $\lambda(N_i^k)$ 表达第 k 个分支上的路障设置状态(式(2))。T型交叉口的情形可以类推。

$$\lambda(N_i^k) = \begin{cases} 1, & \text{第 } k \text{ 个分支设置路障} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

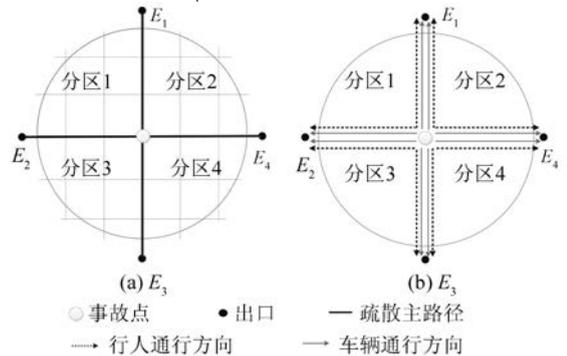


图2 疏散主路径的反向流设置

Fig.2 Evacuation Network Division and Contraflow Settings

2 多目标疏散路网优化模型

2.1 模型定义

每种路障设置方案会产生不同的疏散网络结构,从而导致不同的疏散效率。本文利用平均疏散时间 F_T 和平均疏散路径长度 F_L 两个指标来对不同路障设置方案下的疏散效率进行评价,以最小化 F_T 和 F_L 作为优化目标。

$$\min F_T = \frac{\sum_{m=1}^{M_p} T_p^m + \sum_{n=1}^{M_v} T_v^n}{M_p + M_v} \quad (3)$$

$$\min F_L = \frac{\sum_{m=1}^{M_p} L_p^m + \sum_{n=1}^{M_v} L_v^n}{M_p + M_v} \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \sum_k \lambda(N_i^k) \leq 2 \quad (5)$$

其中, M_p, M_v 分别为混合疏散系统中行人和车辆的数目; T_p^m 和 T_v^n 分别为行人 m 和车辆 n 完成疏散所花费的时间; L_p^m, L_v^n 分别为行人 m 和车辆 n 完成疏散所经过的路径长度。式(5)为约束条件,表示一个交叉口设置路障的个数应不超过 2。

2.2 人车混合疏散交通流模拟

为了计算上述模型中 F_T 和 F_L 的值,本文利用队列模型^[14-15]和 CA 模型^[16]对疏散系统中的人车混合交通流进行模拟。为简化模型并提高交通流模拟的速度,本文忽略路段上行人和车流之间的摩擦,只重点关注人流、车流在路段上的运动以及在交叉口处的人车冲突。在路段处,依据队列模型分别建立行人和车辆的队列(见图 4),路段上交通流的模拟与文献[14]中的队列模型一致。在交叉口处,采用统一的元胞空间,行人和车辆分别按照各自的尺寸占据不同数目的单元格(见图 4),利用元胞自动机模型模拟人车的运动及冲突。

行人和车辆在交叉口均采用无后退的运动规则,利用静态地面场模型^[15]来对个体的运动进行引导。在以 q 为终点的元胞空间中任意位置 $c(x, y)$ 处静态地面场值 S_{xy}^q 的计算公式为:

$$S_{xy}^q = \max_q \{ \max_{lh} d_{lh}^q \} - d_{xy}^q \quad (6)$$

式中, l, h 为随机选取的元胞空间位置。

越接近终点 q 的地方,静态地面场的值就越大。通过比较个体当前所在位置 $c(x, y)$ 与其周围单元格的静态地面场值来决定个体的移动方向。当不同的个体(行人或车辆)竞争同一个单元格时进行等概率随机选择。当所有个体均安全到

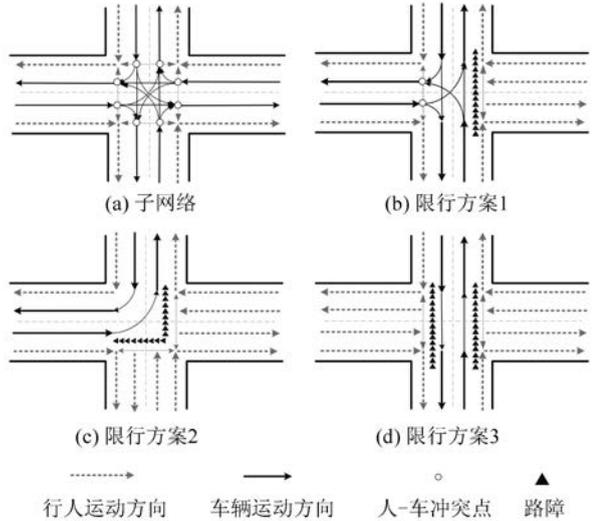


图 3 交叉口限行方案示例

Fig.3 Examples of Traffic Control Plans at Intersections

达疏散区域出口则人车混合交通流模拟结束,统计在当前路障设置方案下整个疏散系统中平均疏散时间 F_T 及平均疏散路径长度 F_L 。

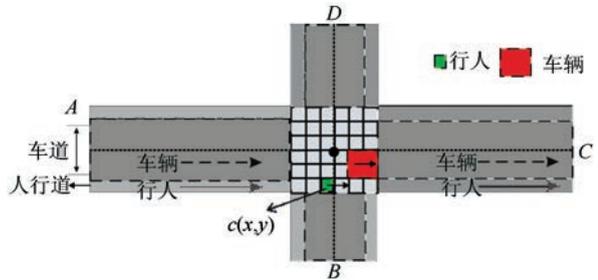


图 4 人车混合流模拟

Fig.4 Mixed Traffic Simulation on Road Links and Intersections

3 模型求解

本文利用基于 NSGA_II 的多目标遗传算法^[16]对上述路网优化模型进行求解。首先,根据本文的研究问题对染色体进行编码,然后基于 NSGA_II 中的选择、交叉、变异算子对染色体进行操作,其中适应度函数值分别为平均疏散时间 F_T 及平均疏散路径长度 F_L 。反复迭代,直到达到预定的迭代次数或者适应度函数值收敛。

采用二进制串 $(x_{12}, x_{21} \dots x_{ij}, x_{ji} \dots)$ 进行编码,基因 x_{ij} 表示路段 ij 上是否设置路障。路段 ij 和 ji 属于交叉口 i 的同一个分支,若路段 ij 上被设置路障,则 x_{ij}, x_{ji} 的值为 1,否则为 0。

采用这样的编码方式,在染色体变异操作中候选解可能会违反式(5)的约束。对于违反约束

的候选解,采用附加惩罚值的方式来降低其在选择操作中被选入下一代的概率。

$$F'_T = F_T + \sigma_T \quad (7)$$

$$F'_L = F_L + \sigma_L \quad (8)$$

其中, σ_T 和 σ_L 分别为两个较大的常数。

4 实验结果与分析

4.1 实验区域

以武汉市局部道路网作为实验区域,假设某日清晨一辆氯罐车在图5中所示的位置发生严重氯气泄漏事故,周围2 km内的人群需要尽快疏散(本文以行人和小汽车为疏散对象,暂不考虑路网上的背景交通)。在周边选择了广场、绿地、学校等15个安全区域(图5中黑色点),并生成了15条疏散主路径(黑色粗线)。参照武汉统计年鉴^[17],实验区域所在的武昌区人口密度为13 425人/km²,武汉家庭小汽车平均保有比例为20%。人群疏散方式定义为步行和驾车两种模式,按照研究区覆盖的居住区面积估算出受影响的居民总数为99 000,其中行人数目79 149,车辆以小汽车计算约为4 917辆(假设每辆小汽车容纳人数为4)。



图5 实验区域

Fig.5 Experiment Area

4.2 实验结果

表1比较了疏散网络优化前(原始路网)、后(优化方案1~3)的疏散效率。优化方案1~3是在由NSGA_II算法得出的多个人车流向控制优化方案中选出的3组方案。优化方案1平均疏散时间最短,优化方案3平均疏散路径长度最短。此外,表1还将本文的路网优化方法与基于 k 最短路径的交通流分配方法^[2,18]进行了对比。从表

1中可以看出,3组优化方案在两个评价指标上相对原始路网均有较大改善,其中平均疏散时间缩短了717.98 s,平均疏散路径长度减小了190.04 m。尽管在 k 最短路径方案中平均疏散路径长度 F_L 被优化得较好,但由于人车交通流较为集中容易造成拥堵,且未对人车转向进行优化控制导致人车冲突较多,其平均疏散时间 F_T 相对本文方法得出的3个优化方案均较差。

表1 优化前后结果对比

Tab.1 Experiment Results Before and After Optimization

疏散方案	F_T/s	F_L/m
原始路网	5 662.15	2 332.57
k 最短路径方案	5 396.28	1 357.20
优化方案1	4 944.17	2 148.54
优化方案2	5 006.25	2 142.53
优化方案3	5 103.79	2 144.42

图6为3个优化后的疏散网络中路障(黑色粗线两端即路障的位置)的分布。可以看出,有些交叉口处(如图6中虚线圈所示)在3个优化方案中均存在,说明这些地方的人车冲突明显,进行人车流向的管制能够提高疏散效率。

以优化方案1为例,一些典型交叉口及路段的子网络如图7所示。以路段①的子网络为例,其路障的设置方案为图3中的“限行方案3”,设置路障后,车辆的部分转向受到限制,人车冲突点完全消除。此外,路段②、路段③子网络中人车冲突点的改善也较显著。

4.3 敏感性分析

为了测试本文方法对不同人车混合比例的适应性,进行以下敏感性分析。表2为总人口数一定的情况下,9组不同的家庭小汽车保有比例下计算出的人车疏散数目,并以此分成了9组不同的方案。利用本文方法分析对比这9组人车配比在疏散路网优化前后(优化后的疏散网络以优化方案1为例)的平均疏散时间、平均疏散路径长度的改善程度。如图8所示,本文的方法在行人混合比例较高的情况下对平均疏散时间的改善较明显,而在车辆占据比较高的情况下其改善相对较小;对平均疏散路径长度的改善程度较为平稳。这是因为本文方法在处理人车冲突时对车辆的转向进行了更多约束(有些路段为车辆禁行),当车辆比例较小时,对车辆转向的限制能够清除人车冲突点,大幅提高疏散效率;当车辆比例逐渐增大时,这种约束在一定程度上制约了疏散效率。由于本文方法同时兼顾路网的连通性,因此不同的人车混行比例对平均疏散路径长度的影响较小。

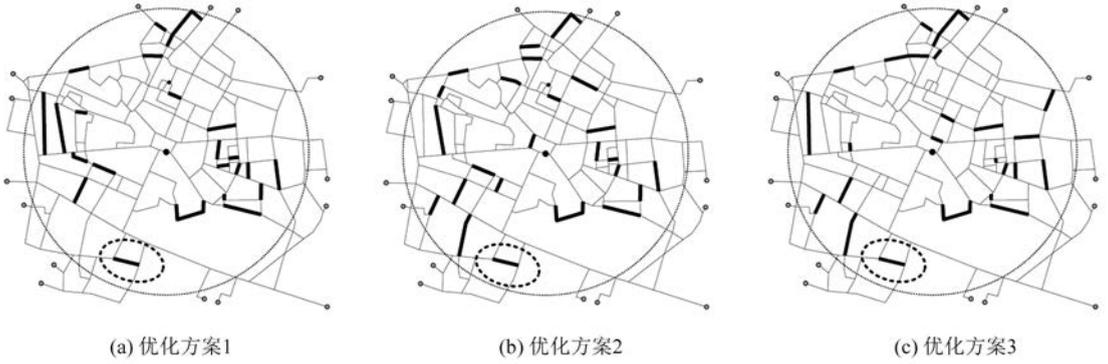


图 6 优化后的疏散网络中路障的空间分布

Fig.6 Spatial Distribution of Barriers of Three Optimal Networks

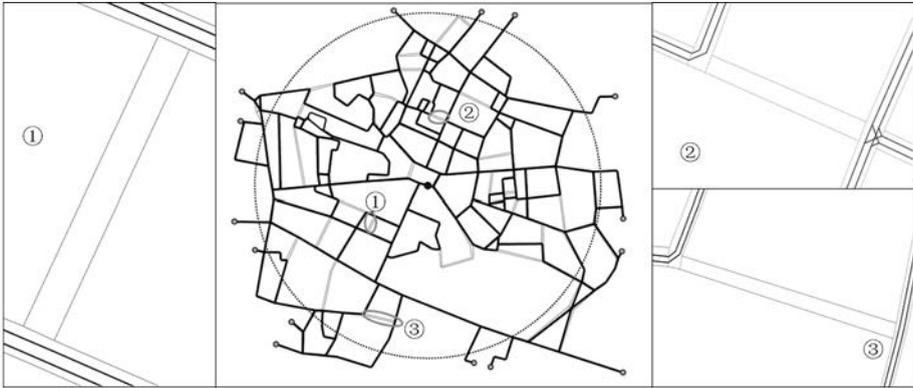


图 7 优化方案 1 的典型交叉口人车子网络

Fig.7 Movement Directions of Pedestrians and Vehicles in Some Typical Intersections of Optimal Network 1

综合两个指标来看,当家庭小汽车保有比例在 10%~30%时,对两个目标函数值的改善程度均较好,其中在 20%时改善程度最高。

表 2 以家庭小汽车比例表示的人车混合比例设置
Tab.2 Number of Pedestrians and Vehicles Under Different Car-to-Family Ratios

家庭小汽车保有比例/%	人车数目	
	行人	车辆
10	89 040	2 443
20	79 149	4 917
30	69 246	7 393
40	59 354	9 868
50	49 466	12 344
60	39 563	14 815
70	29 661	17 287
80	19 753	19 769
90	9 862	22 234

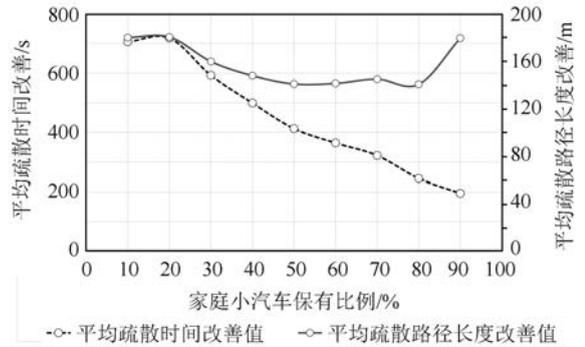


图 8 平均疏散时间、平均疏散路径长度随家庭保有车辆比例的变化

Fig.8 Improvements of Average Evacuation Time and Length with Different Car-to-Family Ratios

5 结 语

本文针对城市突发事件时疏散交通流人车混行的特点,提出了一种基于冲突消除和反向流策略的人车混合疏散路网优化方法。实验结果表

明,本文方法能够有效地优化人车混行疏散网络,提高人车混合流的疏散效率。通过比较不同人车混合比例下的平均疏散时间及平均疏散路径长度,发现本文方法在行人占混合疏散系统比例较高的情况下,对二者的改善程度更明显。本文方法目前主要解决人车冲突,后续将进一步考虑消除人车混合疏散系统中的车车冲突。此外,事故影响范围和程度的动态性、疏散人员空间分布的

差异性等因素也待后续进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] Jin Meilian, Chen Tao, Shen Shifei. Influence of Transport Mode Choice on Evacuation Time in Mixed Traffic Flow Evacuation Simulations [J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 2009, 49(2): 179-182 (金美莲, 陈涛, 申世飞. 城市混合流疏散中不同交通方式配比对疏散时间的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(2): 179-182)
- [2] Li Qingquan, Li Qiuping, Fang Zhixiang. An Emergency Evacuation Routing Optimization Model Based on Space-time Congestion Concept [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(4): 517-523 (李清泉, 李秋萍, 方志祥. 一种基于时空拥挤度的应急疏散路径优化方法[J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 517-523)
- [3] Meng Yongchang, Yang Saini, Shi Peijun. Multi-objective Optimization of Emergency Evacuation Using Improved Genetic Algorithm [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(2): 201-205 (孟永昌, 杨赛霓, 史培军. 基于改进遗传算法的路网应急疏散多目标优化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(2): 201-205)
- [4] Zhang X, Chang G L. A CA-based model for Simulation Vehicular-pedestrian Mixed Flows in a Congested Network[C]. The 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D C, 2011
- [5] Xie C, Turnquist M A. Lane-Based Evacuation Network Optimization: An integrated Lagrangian Relaxation and Tabu Search Approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, 19(1): 40-63
- [6] Liu Y, Luo Z. A Bi-level Model for Planning Signalized and Uninterrupted Flow Intersections in an Evacuation Network[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2012, 27(10): 731-747
- [7] Cova T J, Johnson J P. A Network Flow Model for Lane-Based Evacuation Routing [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2003, 37(7): 579-604
- [8] Wang Jian, Hu Xiaowei, Tong Jingjing, et al. Route Planning of Regional Emergency Evacuation Based on Lane Modeling [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10(2): 82-87 (王健, 胡晓伟, 佟晶晶, 等. 基于车道建模的区域应急疏散路径规划[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(2): 82-87)
- [9] Ren Gang, Hua Jinyi, Zhang Zhiyun, et al. Optimal Evacuation Network Design with Contraflow and Conflict Elimination Strategy [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(3): 88-93 (任刚, 华璟怡, 张志云, 等. 基于反向车道与冲突消除的疏散网络优化设计[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 88-93)
- [10] Bretschneider S, Kimms A. Pattern-Based Evacuation Planning for Urban Areas [J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 216(1): 57-69
- [11] Hamza-Lup G L, Hua K A, Le M, et al. Enhancing Intelligent Transportation Systems to Improve and Support Homeland Security [C]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, Washington D C, USA, 2004
- [12] Kim S, Shekhar S. Contraflow Network Reconfiguration for Evacuation Planning [C]. *The 13th Annual ACM International Workshop on Geographic Information Systems*, New York, 2005
- [13] Yan Xinping, Lv Nengchao, Liu Zhenglin, et al. Bi-level Programming for Optimization of Contraflow Lanes after Massive Activities [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2009, 44(1): 112-117 (严新平, 吕能超, 刘正林, 等. 大型活动后车道单行优化的双层规划[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(1): 112-117)
- [14] Fang Z X, Li Q P, Li Q Q, et al. A Space-Time Efficiency Model for Optimizing Intra-Intersection Vehicle-Pedestrian Evacuation Movements [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 31: 112-130
- [15] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, et al. Simulation of Pedestrian Dynamics Using a Two-Dimensional Cellular Automaton [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2001(1): 507-525
- [16] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197
- [17] Wuhan Municipal Bureau of Statistics. Wuhan Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2010 (武汉市统计局. 武汉统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2010)
- [18] Stepanov A, Smith J M. Multi-objective Evacuation Routing in Transportation Networks [J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 198(2): 435-446

Evacuation Network Optimization Based on Contraflow and Conflict Elimination for Pedestrian-Vehicle Mixed Flows

LI Qiuping^{1,2} LUAN Xuechen^{1,3} ZHOU Suhong^{1,2} ZHANG Xing⁴

1 School of Geography Science and Planning, Sun Yatsen University,

Guangzhou 510275, China

2 Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, Guangzhou 510275, China

3 Guangdong Ritu Information Systems Co Ltd, Foshan 528305, China

4 Shenzhen Key Laboratory of Spatial Smart Sensing and Services, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

Abstract: People under emergencies will choose different traffic modes (walking, driving, etc.) for evacuation. In this circumstance, the conflicts of the mixed flows (pedestrians and vehicles) at various locations in the network can be critical to the operational efficiency of the evacuation activities. This paper proposes an evacuation network optimization approach based on conflict elimination and contraflow strategy by separating pedestrian and vehicle flows with physical barriers at road intersections and reverse pedestrians and vehicles on main evacuation routes, respectively. A multi-objective optimization model is formulated to determine the appropriate locations of barriers or blocks in the evacuation network. A genetic based algorithm is developed to solve the optimization problem. The proposed model is tested for an evacuation zone with the area of 2 km² in Wuhan city. Besides, the sensitivity analysis is implemented for different mixing ratios of pedestrians and vehicles. The results show that the proposed approach can effectively separate pedestrian and vehicle flows at intersections to improve the evacuation efficiency, and the improvements are greater when pedestrians take a higher percentage in the evacuation system.

Key words: urban traffic; evacuation network optimization; conflict elimination; contraflow; pedestrian-vehicle mixed flows

First author: LI Qiuping, PhD, lecturer, specializes in transportation modeling and emergency evacuation optimization. E-mail: liqp3@mail.sysu.edu.cn

Corresponding author: LUAN Xuechen, PhD. E-mail: luanxuechen@ritu.cn

Foundation support: The Open Fund of Shenzhen Key Laboratory of Spatial Smart Sensing and Services (Shenzhen University), No. 42990005; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41501424, 41271166, 41522104, 41301511; Shenzhen Scientific Research and Development Funding Program, No. JCYJ20140418095735587; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 15lgjc38.