

文章编号:1672-9331(2018)04-0052-07

# 基于改进 CTM 模型的城市快速路交通流仿真

林 琴, 龙科军

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 为了探讨城市快速路交通流特征, 针对快速路的 4 个模块进行了交通流仿真。以经典元胞传输模型(CTM)为基础, 根据相邻元胞间流量传输相等的基本原理, 引入元胞长度参数, 推导出了元胞间流量传输公式, 由此提出改进的元胞传输模型。利用改进元胞传输模型对城市快速路交通流进行仿真, 主要包括道路环境和交通环境两个方面, 即上匝道之间的间距以及主线和匝道流量比, 仿真包括构成城市快速路的 4 个模块: 基本路段、合流区、分流区以及交织区, 以车辆延误作为分析指标。仿真结果表明, 基本路段和分流区的延误增加量一致, 合流区和交织区的延误增加量一致。

**关键词:** 城市快速路; 元胞传输模型; 改进型; 基本路段; 合流区; 分流区; 交织区

中图分类号: U491

文献标识码: A

## Urban expressway traffic flow simulation based on improved CTM model

LIN Qin, LONG Ke-jun

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology,  
Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to discuss the characteristics of urban expressway traffic flow, traffic flow simulation was performed for four modules of the expressway. Based on the classical Cell Transmission Model (CTM), according to the basic principle of equal flow transmission between neighboring cells, cell length parameters were introduced and the formula for intercellular communications was deduced. An improved cellular transmission model was proposed. The use of the improved cell transmission model for urban expressway traffic flow simulation mainly includes two aspects of road environment and traffic environment, namely, the distance between the upper roads and the ratio of the main line and the tunnel flow. And the simulation includes four modules that constitute the urban expressway: Basic road section, Confluence area, Triage area, and Weaving area, and use vehicle delay as an analysis indicator. The simulation results show that the increase of delays in the Basic road section and the Triage area is the same, and the increase in the delay in the Converging area and the Weaving area is the same.

**Key words:** urban expressway; cell transmission model; improved type; basic road section; confluence area; triage area; weaving area

收稿日期: 2018-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678076)

通讯作者: 龙科军(1974—), 男, 湖南双峰人, 长沙理工大学教授, 博士, 主要从事交通运输规划与管理方面的研究。

E-mail: longkejun@csust.edu.cn

交通流仿真的主要方法为宏观仿真和微观仿真。相比于微观模型,宏观模型有参数易于标定、计算便捷等优点,因此更适应于现实交通的管理与应用。元胞传输模型(Cell Transmission Model, 简称 CTM)最早由 Daganzo 在 1994 年提出,在宏观交通流仿真中应用广泛。姚凯斌等<sup>[1]</sup>以元胞密度传输作为迭代特征,提出改进型元胞传输模型,通过划分车道元胞和交叉口元胞,对城市道路进行了仿真,其结果与 Vissim 仿真结果进行对比可知,改进元胞传输模型的实用性较强。Scholars 等<sup>[2]</sup>通过分路段元胞和交叉口元胞,对交叉车流进行了仿真研究。史良等<sup>[3]</sup>利用改进的元胞传输模型,对环形快速路交通流进行了仿真,为对快速路进一步的研究奠定了基础。杨泳等<sup>[4]</sup>建立了迟滞现象的改进元胞传输模型,主要是为了研究城市快速路不规则道路几何特征的交通流传播规律。陈庚<sup>[5]</sup>利用改进元胞传输模型仿真了快速路交通事件对交通流变化的影响。

CTM 模型还能很好地描述交通流排队消散过程。Li 等<sup>[6]</sup>利用更新元胞传输模型,提出了一种硬路肩运行操作优化方法,对硬路肩运行和排队警告进行了仿真结果验证。杨泳等<sup>[7]</sup>通过引入元胞长度和密度两个参数,提出了改进型元胞传输模型,对快速路的不同匝道间距、位置以及有无控制进行了定量分析,对城市快速交通流的拥堵传播疏散进行了分析。黄超等<sup>[8]</sup>利用修正过的元胞传输模型细化了高速公路交通流密度—速度的关系,提高了元胞传输模型的实用性。龚葵等<sup>[9]</sup>以路网中的车道为基础,路段和节点分为车道元胞和交叉口元胞,对随机路网的拥堵程度时变进行了描述。张正义等<sup>[10]</sup>利用 CTM 模型,对高速公路隧道入口的交通流变化情况进行了模拟,并对二次事故风险进行了评价。

综上所述,目前基于元胞传输模型的道路交通流仿真主要集中在依据道路几何特征不同而进行的研究,针对道路环境和交通环境均不同的元胞传输模型研究较少。因此,本研究的研究重点是,以元胞传输模型为基础,提出改进的元胞传输模型(MCTM),针对不同的道路环境和交通环境,对城市快速路的交通流进行仿真分析,为城市快速路的设计和管理提供理论依据。

## 1 经典元胞传输模型

元胞传输模型(CTM)最早由 Daganzo 在 1994 年提出,主要用于研究网络上的动态交通问题<sup>[11]</sup>。其中心思想是,将路段等距地划分为  $N$  个元胞,利用各个元胞之间通过的车辆数来描述交通流传播过程。由于 CTM 模型具有时间和空间的离散以及结构简单等特点,所以被广泛运用到了交通流模拟研究中,并且其在过饱和问题上比 Vissim 仿真更具优势<sup>[12]</sup>。

元胞传输模型的一般形式为:

$$n_i(t) = n_i(t-1) + y_{i-1}(t-1) - y_i(t-1). \quad (1)$$

$$y_i(t) = \min\{n_{i-1}(t), Q_i(t), \omega/v[N_i(t) - n_i(t)]\}. \quad (2)$$

式中: $n_i(t)$ 为  $t$  时刻元胞  $i$  内的车辆数; $y_i(t)$ 为  $t$  时刻元胞  $i$  向元胞  $(i+1)$  实际传输的交通量; $N_i(t)$ 为元胞  $i$  的容纳能力; $Q_i(t)$ 为元胞  $i$  的通行能力; $\omega$  为反向传播速度; $v$  为自由流速度; $[N_i(t) - n_i(t)]$ 为元胞  $i$  的剩余可容纳车辆数。

## 2 改进的元胞传输模型

经典的元胞传输模型虽然结构简单,但是相同的元胞长度不能很好地描述城市快速路的道路几何特征。快速路的基本路段长度以及匝道与匝道之间的距离都不相同,为了更好地模拟城市快速路的交通流特性,需要依据不同的路段长度建立长度不同的元胞。改进型元胞传输模型(MCTM)示意图如图 1 所示。

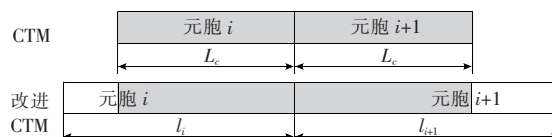


图 1 CTM 与改进 CTM 元胞图

Fig. 1 CTM and Improved CTM Cell Graph

由图 1 可知,改进后的元胞传输模型的元胞长度可以不相等,但是元胞  $i$  和元胞  $(i+1)$  的长度  $l_i$  和  $l_{i+1}$  必须大于车辆在一个时间步长内以自由流速度通过的距离  $L_c$ ,因此可以根据元胞长度需

求来设置仿真步长。

根据元胞传输模型中元胞间的交通流传递过程可知,在MCTM中,单位时间步长 $\sigma$ 内元胞 $i$ 的驶出车辆数仅与后半段长度 $L_c$ 有关。同样地,下游元胞 $(i+1)$ 接受的车辆数也仅来自元胞 $i$ 的车辆数,即长度 $L_c$ 内的车辆数。所以改进CTM模型在 $t$ 时刻流入元胞 $i$ 的实际传输量只与各个元胞长度 $L_c$ 有关:

$$y_{i+1}(t) = \min \left\{ \frac{L_c}{l_i} n_i(t), Q_{i+1}(t), \frac{L_c \omega}{l_{i+1}} [N_{i+1}(t) - n_{i+1}(t)] \right\}. \quad (3)$$

相较于式(2),式(3)引入了元胞长度参数,和式(1)构成了改进型CTM模型的一般流量传输形式。其一般形式反映了各个元胞之间交通流传输、密度传递以及排队疏散的过程,符合流密速三者之间的内在联系。同时,传统的元胞传输模型

规定元胞长度必须一致,而一致的长度不能很好地描述不规则几何的城市快速路,所以引入元胞长度参数变量以克服传统元胞传输模型长度必须一致的局限性,从而提高CTM模型的实用性。

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真环境的构建

城市快速路的交通流特征能为其规划设计和管控提供理论依据。为了更好地了解城市快速路的交通流特征,利用改进元胞传输模型对城市快速路交通流进行了仿真分析。仿真对象为一段典型的高架城市快速路路段,如图2所示,将该路段划分为11个元胞,仿真路段还包含了快速路元胞传输模型构建的4种情况,即合流区、分流区、基本路段和交织区。主线单向两车道,包括3个上匝道和3个下匝道,匝道为单车道。

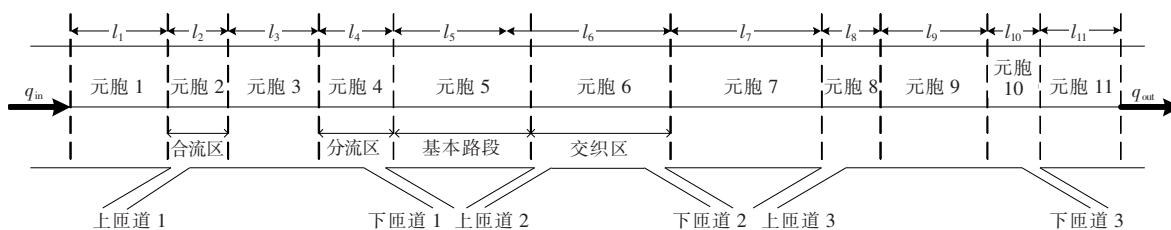


图2 改进CTM模型模拟快速路交通流示意图(单位:km)

Fig. 2 Improved CTM model simulates expressway traffic flow (Unit: km)

快速路主线通行能力为3600辆/h,自由流速度为75 km/h,反向传播速度为25 km/h。下匝道的接收能力为无限大,分流比为10%,即 $R_{\text{下匝道}} = \infty$ , $r_{\text{下匝道}} = 10\%$ 。上匝道的融合比为50%,即主线元胞 $i$ 允许上匝道车辆进入的最大比例 $\lambda = 50\%$ 。本研究对城市快速路交通流的模拟主要包括道路环境和交通环境两部分,即上匝道之间的间距以及主线和匝道的车流比。在仿真模拟中,其他的参数设置如下:时间步长 $\sigma$ 为10 s;模拟时长为60 min,即360个时间步;阻塞密度 $k_{\text{jam}}$ 为122 辆/(h·车道)。

为了优化仿真环境,拟作如下假设。

- 1) 单个元胞至多只有一个上匝道或者下匝道。
- 2) 单个含有上匝道(下匝道)的一定位于该元

胞开始位置(结束位置)。

3) 不含上匝道(下匝道)的单个元胞无出入口,构成基本路段。

4) 单个元胞的车道数相同。

#### 3.2 基于道路环境的CTM仿真

快速路的道路环境仿真,即改变城市快速路相邻入口匝道之间的距离,而相邻入口匝道和出口匝道的距离不变;同时仿真时段还包括了平峰和高峰两个时期,在前180个仿真时间步长为平峰时期,后180个仿真时间步长为高峰时期。利用改进元胞传输模型进行仿真分析,仿真示意图如图3所示。由于相邻上匝道和下匝道的距离不变,所以只能改变基本路段元胞5和元胞7的长度,故选取3组不同的上匝道间距,数据如表1所示。

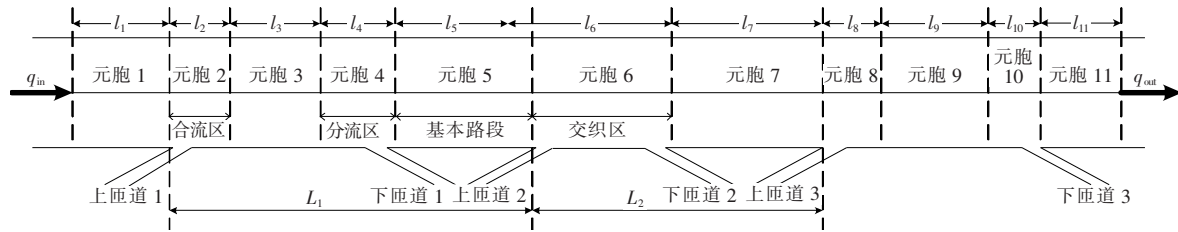


图 3 不同匝道间距 VCTM 仿真示意图

Fig. 3 Different channel spacing VCTM simulation diagram

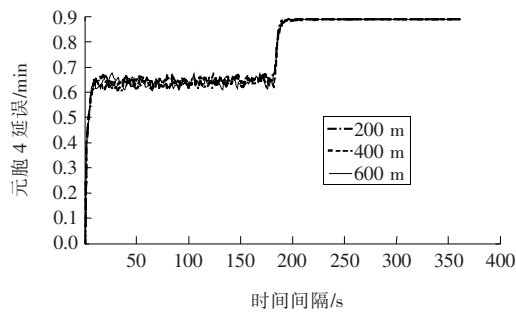
表 1 上匝道间距数据表

Table 1 Upper ramp pitch table

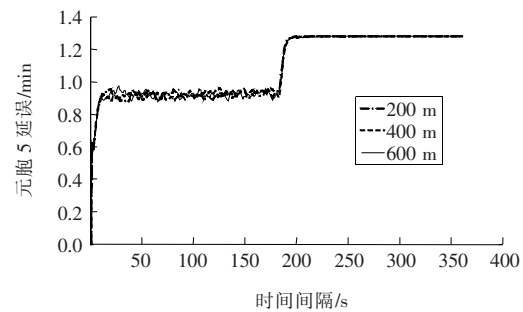
m

分组	元胞 5	元胞 7
第一组	200	200
第二组	400	400
第三组	600	600

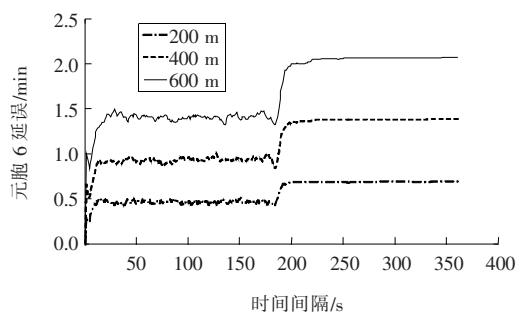
通过改变匝道间距,利用改进的元胞传输模型进行仿真。取元胞 4、元胞 5、元胞 6 以及元胞 8 分别作为分流区、基本路段、交织区以及合流区的代表。为研究城市快速路交通拥挤的形成过程,通过综合分析交通流的各个参数,最终选择车辆延误作为快速路拥堵分析评价指标。仿真结果如图 4 所示。



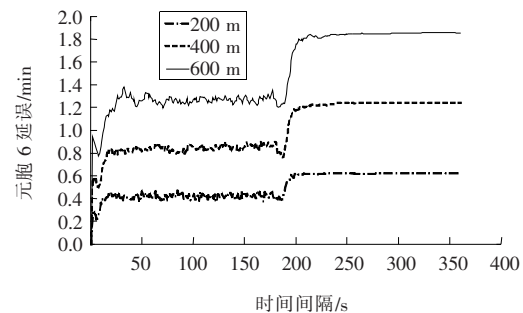
(a) 元胞 4



(b) 元胞 5



(c) 元胞 6



(d) 元胞 8

图 4 元胞 4、5、6、8 的距离—延误图

Fig. 4 Distance-delay diagrams for cell 4, 5, 6, and 8

分析图 4 可得如下结论。

1) 从整体上看,当匝道间距发生变化时,基本路段和分流区的延误基本不受影响,对合流区和交织区的延误影响较大。而在相同的匝道间距下,交织区的延误最大,即元胞 6 的延误最大,其次是合流区元胞 8 的延误,然后是基本路段元胞 5

的延误,而分流区的元胞 4 的延误最小。当时间由平峰到高峰时期转变时,车辆延误会剧增,达到一定时间后又趋于稳定。

2) 通过进一步的仿真数据分析可知,当匝道间距由第一组数据变化到第二组数据时,即元胞 5 和元胞 7 的长度由 200 m 增加到 400 m 时,分流

区和基本路段的延误增加了50%，交织区和合流区的延误增加了66.6%。而当元胞5和元胞7的长度由400 m增加到600 m时，分流区和基本路段增加的延误仍然为50%，而交织区和合流区的延误则增加了60%。具体结果如表2所示。由此可知，当上匝道间距发生变化时，分流区和基本路段的延误分别与之成线性相关，且基本路段和分流区的延误变化相同，合流区和交织区的延误变化相同。

表2 不同道路环境条件下的延误分析

Table 2 Analysis of delays under different road conditions %

	匝道间距变换/m	
	200~400	400~600
元胞4	50.0	50.0
元胞5	50.0	50.0
元胞6	66.6	60.0
元胞8	66.6	60.0

3) 对于图4[(a),(b)]即分流区和合流区来

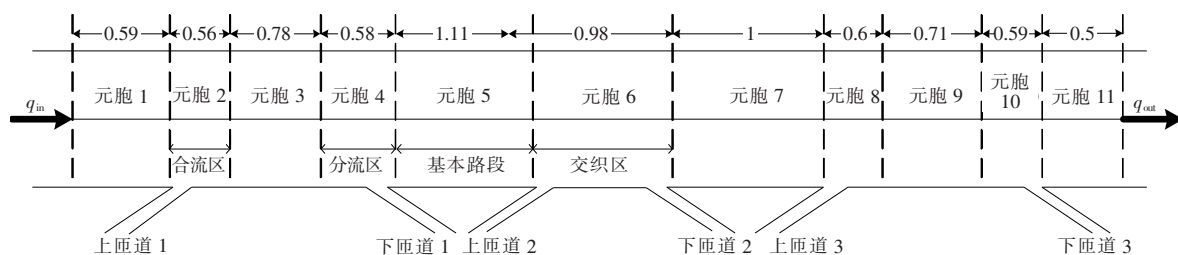


图5 主线匝道流量比 MCTM 仿真示意图

Fig. 5 Mainline ramp flow ratio MCTM simulation schematic

通过改变主线和匝道的流量比，利用改进元胞传输模型进行仿真。选取元胞4、元胞5、元胞6和元胞8分别作为分流区、基本路段、交织区以及合流区的代表。具体仿真结果如图6所示。

通过图6可以得到如下结论。

1) 从整体上来说，当仿真时间步长达到一定时间时，各个单位元胞延误基本趋于稳定状态。通过对比4个图形发现，交织区的延误最大，其次为分流区的车辆延误，然后是合流区的延误，而基本路段的车辆延误最小。

2) 通过进一步的仿真数据分析可知，当主线与匝道车流量比由2:1转变为2.5:1时，分流区和基本路段的延误增加了58%，交织区和合流

说，相邻上匝道距离发生变化时，对其基本没有影响；而对于图4[(c),(d)]来说，其影响较大，并随间距的增加而增大。

### 3.3 基于交通环境的CTM仿真

城市快速路交通流仿真的交通环境主要是主线车流和入口匝道的车流比。选取3组流量比数据(如表3所示)，利用改进元胞传输模型进行仿真分析。匝道位置分别位于元胞2、元胞4、元胞6、元胞8和元胞10(如图5所示)，其中，各元胞的长度为 $l_i$ (km)为：

$$l_i = \{0.59, 0.56, 0.78, 0.58, 1.11, 0.98, 1, 0.6, 0.71, 0.59, 0.5\};$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.$$

表3 主线与匝道车流比数据选取表

Table 3 Mainline and ramp traffic ratio data selection table

车道功能	第一组	第二组	第三组
主线	2	2.5	3
匝道	1	1	1

区的延误增加了59%；而当主线与匝道车流量比由2.5:1变为3:1时，分流区和基本路段元胞的延误增加了55%，元胞6和元胞8的延误增加了56%。具体结果如表4所示。由此可知，当主线与匝道流量比发生变化时，分流区和基本路段的延误分别与之成线性相关，合流区和交织区分别与之成线性相关，即合流区、基本路段、分流区的延误变化相同，合流区和交织区的延误变化相同。

3) 通过比较2个含有出口匝道的元胞延误，即元胞4和元胞6，在相同的仿真时间下，元胞4的延误较小。比较2个含有入口匝道的元胞延误，即元胞6和元胞8，在相同的仿真时间下，元胞8的延误较小。

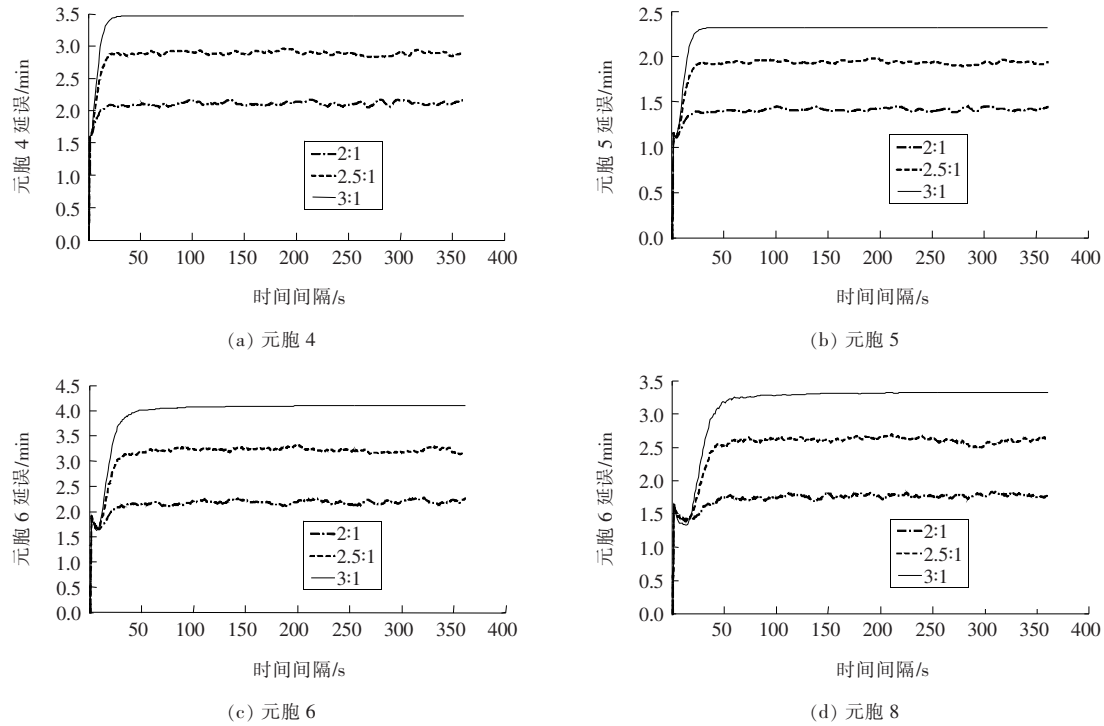


图 6 元胞 4、5、6、8 时间—延误图

Fig. 6 Cell-time 4,5,6,8 time-delay diagram

表 4 不同交通环境条件下的延误分析

Table 4 Analysis of delays under different traffic conditions

	主线匝道流量比	
	2:1~2.5:1	2.5:1~3:1
元胞 4	58	55
元胞 5	58	55
元胞 6	59	56
元胞 8	59	56

## 4 结论

本研究以经典的 Daganzo 元胞传输模型为基础,通过引入元胞长度这一参数,建立了适用于不规则道路几何形状的城市快速路交通流仿真分析工具。依据所提出的改进元胞传输模型(MCTM),对基本路段、合流区、分流区和交织区进行了交通流仿真,得到如下结论。

1) 在不发生交通事件的情况下,各个元胞的车辆延误经过一定的时间后将会达到稳定状态。

2) 在不同的道路和交通环境下,交织区的交通延误总是最大的。

3) 不管是在相邻上匝道间距不同的情况下,还是在主线和匝道流量比不同的情况下,分流区和基本路段延误增加的百分比一致,合流区和交织区延误增加的百分比一致。从城市快速路的道路几何特征分析造成这种结果的原因,主要是快速路的入口匝道对快速路主线流量影响较大。

本研究所提出的改进元胞传输模型(MCTM),对模拟分析城市快速路交通流特征具有一定的作用。它通过与实际的交通调查数据相结合,能更准确地描述城市快速路交通流特征,可为进一步研究城市快速路交通拥堵形成疏散机理提供理论依据。

## 〔参考文献〕

- [1] 姚凯斌,林培群. 一种考虑交叉口因素的改进元胞传输模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2017,17(3): 105-111.  
YAO Kai-bin, LIN Pei-qun. An improved cell transmission model considering intersection factor [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(3): 105-111.
- [2] Scholars S, Szeto S A, Jia B E A. Research on analy-



- sis method of traffic congestion mechanism based on improved cell transmission model[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012, 28(11): 1035-1052.
- [3] 史良, 陈阳舟, 张鲁. 环形快速路交通流的改进元胞传输模型建立与仿真[J]. *交通信息与安全*, 2012, 30(5): 45-49.
- SHI Liang, CHEN Yang-zhou, ZHANG Lu. Improved cellular transmission model establishment and simulation for ring expressway traffic flow[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2012, 30(5): 45-49.
- [4] 杨泳, 严余松, 户佐安, 等. 城市快速路改进型元胞传输模型及仿真[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(6): 135-141.
- YANG Yong, YAN Yu-song, HU Zuo-an. An improved cell transmission model for urban expressway and simulation[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(6): 135-141.
- [5] 陈庚. 基于改进型 CTM 模型的城市快速路交通事件仿真[J]. *交通科技*, 2016(6): 146-149.
- CHENG Geng. Urban expressway traffic incident simulation based on improved CTM Model[J]. *Journal of Transportation Science and Technology*, 2016(6): 146-149.
- [6] Li R, Ye Z, Li B, et al. Simulation of hard shoulder running combined with queue warning during traffic accident with CTM model[J]. *Iet Intelligent Transport Systems*, 2017, 11(9): 553-560.
- [7] 杨泳, 户佐安. 改进型 CTM 模型匝道控制下拥堵传播规律研究[J]. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2015(5): 915-919.
- YANG Yong, HU Zuo-an. Research on congestion propagation rule in the modified ctm model on the ramp meter[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering*, 2015(5): 915-919.
- [8] 黄超, 陈日强. 基于元胞传输模型的高速公路交通流仿真模型[J]. *中国交通信息化*, 2017(7): 127-130, 135.
- HUANG Chao, CHEN Ri-qiang. Freeway traffic flow simulation model based on cellular transmission model[J]. *China ITS Journal*, 2017(7): 127-130, 135.
- [9] 龚葵, 李苏剑, 邢恩辉. 拥堵程度时变的随机路网可变元胞传输模型[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(3): 6-11.
- GONG Yan, LI Su-jian, XING En-hui. Novel variable cell transmission model for stochastic road network with time-varying congestion degree[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2015, 51(3): 6-11.
- [10] 张正义, 路巧珍, 朱可宁, 等. 基于 CTM 的高速公路隧道入口段交通流仿真与分析[J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2015, 47(4): 543-548.
- ZHENG Zheng-yi, LU Qiao-zhen, ZHU Ke-ning. Simulation and analysis of freeway traffic in the tunnel entrance section based on CTM[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology*, 2015, 47(4): 543-548.
- [11] 贾斌. 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟[M]. 北京: 北京科学出版社, 2007.
- JIA Bing. Models and simulations of traffic system based on the theory of cellular automaton[M]. Beijing: Beijing Science Press, 2007.
- [12] 黄玮, 沈峰, 杨晓光. 基于细胞传输模型的交通流仿真特征及适用性研究[J]. *交通信息与安全*, 2008, 26(1): 19-23.
- HUANG Wei, SHEN Feng, YANG Xiao-guang. Research on traffic flow simulation characteristics and applicability based on cell transmission model[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2008, 26(1): 19-23.