

1-2-2019

## Integrated Simulation of Mixed Traffic Flow on Elementary and Middle School Gate's Road When Students Going to School

Mingbao Pang

*School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;*

Yanan Pei

*School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;*

Zhang Ning

*School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Integrated Simulation of Mixed Traffic Flow on Elementary and Middle School Gate's Road When Students Going to School

## Abstract

*Abstract: Synthesizing the advantages and disadvantages of social force model (SFM) and cellular automaton model (CAM), a simulation model of mixed traffic flow including pedestrian, motor vehicle and non-motorized vehicle on the interference road section of elementary and middle school's gate when students going to school was established. The traffic flow characteristics after changing the proportion of students going to school by private car and implementing different traffic organization schemes were analyzed. The results of the examples indicate that its organization phenomena can be realized by decreasing the proportion of pupils taking private cars and implementing different measures of traffic organization optimization according to the different road classes based on self-organization, which enhances the road traffic efficiency and ensures the traffic safety. Meanwhile, the effectiveness and feasibilities of the integrated simulation model are verified. Furthermore these can provide some reference values for the mixed traffic flow simulation of other road interference section.*

## Keywords

integrated simulation of traffic flow, social force model (SFM), interference rule, cellular automaton model (CAM), elementary and middle school gate's road;

## Recommended Citation

Pang Mingbao, Pei Yanan, Zhang Ning. Integrated Simulation of Mixed Traffic Flow on Elementary and Middle School Gate's Road When Students Going to School[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1162-1171.

# 中小学门口道路上学混合交通流的综合仿真

庞明宝, 裴亚男, 张宁

(河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

**摘要:** 综合社会力模型 SFM (Social Force Model) 和元胞自动机模型 CAM (Cellular Automaton Model) 的优缺点, 建立一个行人、机动车、非机动车交织的中小学门口道路区域的混合交通流仿真模型, 对上学期间的交通流过程进行仿真, 对乘私家车上学比例变化和不同交通组织方案下的交通流特性进行分析。结果表明减少乘私家车上学比例, 针对不同道路级别实施“在自组织基础上的不同交通组织优化措施”能使该区域实现有序的它组织, 从而提高道路通行效率、保证交通安全; 证明了该综合仿真模型的有效性和可行性, 为其它道路交织区域混合交通流仿真提供参考。

**关键词:** 交通流综合仿真; 社会力模型; 交织规则; 元胞自动机模型; 中小学门口道路

中图分类号: TP273.5; U491.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 03-1162-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803049

## Integrated Simulation of Mixed Traffic Flow on Elementary and Middle School Gate's Road When Students Going to School

Pang Mingbao, Pei Yanan, Zhang Ning

(School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Synthesizing the advantages and disadvantages of social force model (SFM) and cellular automaton model (CAM), a simulation model of mixed traffic flow including pedestrian, motor vehicle and non-motorized vehicle on the interference road section of elementary and middle school's gate when students going to school was established. The traffic flow characteristics after changing the proportion of students going to school by private car and implementing different traffic organization schemes were analyzed. The results of the examples indicate that its organization phenomena can be realized by decreasing the proportion of pupils taking private cars and implementing different measures of traffic organization optimization according to the different road classes based on self-organization, which enhances the road traffic efficiency and ensures the traffic safety. Meanwhile, the effectiveness and feasibilities of the integrated simulation model are verified. Furthermore these can provide some reference values for the mixed traffic flow simulation of other road interference section.

**Keywords:** integrated simulation of traffic flow; social force model (SFM); interference rule; cellular automaton model (CAM); elementary and middle school gate's road

## 引言

交通流仿真模型由于能更加精确的映射车辆、

行人等在具体交通行为过程中的非线性行为<sup>[1-7]</sup>, 成为研究与解决交通问题的基础, 如: 跟驰模型、流体力学模型和元胞自动机模型 CAM (cellular automaton model) 等。特别是 CAM, 在道路交通流仿真中得到了应用, 部分涉及到机动车与非机动车、行人的交织和混行等<sup>[5,8-10]</sup>。虽然 CAM 在涉及多交通工具混合交织时能通过建立不同交通工具在元胞



收稿日期: 2016-04-08 修回日期: 2016-07-07;  
基金项目: 国家自然科学基金(50478088), 河北省自然科学基金(E2015202266);  
作者简介: 庞明宝(1966-), 男, 河南西峡, 博士, 教授, 研究方向为智能交通系统、交通系统工程; 裴亚男(1991-), 女, 河北邯郸, 硕士生, 研究方向为交通运输规划与管理。

<http://www.china-simulation.com>

• 1162 •

中的进化规则予以实现, 但交织方式相对简单。这是因为其作为一种离散化模型受到元胞尺寸的限制, 每个决策主体在纵、横向呈现一定的空间限制, 而这个空间不能太小(否则元胞数量巨大, 计算效率低甚至无法实现), 也不能太大(否则无法映射其非线性行为), 所以其在处理单一交通工具交织和交通工具所占空间差距不大的低密度交织时, 呈现出特有的优势; 而在处理所占空间较小、高密度的仿真对象如人群, 或多交通方式高密度交织时, 由于各交通工具体积差距较大, 很难选择合理的元胞尺寸去细致映射人、车、非机动车的穿插排列非线性关系。如中小学门口道路区段在上放学期间的交织问题<sup>[5,9,11-12]</sup>, 对自行车道停车对机动车的正常行驶影响, 只能采用挤车变道方式予以规则修正<sup>[5,9]</sup>; 对于非机动车、行人等过马路采用简化规则方式<sup>[5,9]</sup>。这种处理使所建立的仿真模型与真实的非线性行为存在一定差距, 工程应用呈现局限性。而如何在现交通流仿真理论方法的基础上, 针对这一类交通工具多样且体积差距较大、流量大、场地狭窄、冲突严重的特殊道路区段, 建立能高度映射出其非线性行为的仿真模型, 成为一个亟待解决的问题。

基于行人自驱动力、与其他人、边界和障碍物间社会心理力和物理力等建立的社会力模型 SFM(social force model)<sup>[4,6-7,13-14]</sup>, 由于能使行人在密度大的区域产生较大斥力, 从而引导行人避开高密度区域, 更好地刻画了行人对环境的感知。在交通行为微观仿真方面, 主要集中于地铁等运输场站的行人间、人群集聚场地的安全疏散等<sup>[6-7]</sup>。而针对机动车、自行车及行人等间的复杂交织的研究现集中于交叉口的行人过街 SFM 的建立方面<sup>[13]</sup>, 不涉及中小学和医院门口道路区域。SFM 作为一种连续型模型, 能表现出“人、非机动车等在交织区运动时横向移动灵活, 停止时呈现穿插排列”的行为特点, 虽然理论上也能用于机动车仿真, 但存在着计算量大、运算速度慢等特征, 适用于较小范围的复杂交织区段, 对于研究对象较大区域, 宜采用“分割为若干区段, 对复杂交织区段采用 SFM, 其

它采用与之交通流特点相适用的微观仿真模型”形式。基于此, 本文综合 SFM 和 CAM 在交通仿真的优缺点, 以中小学门口上学期间包括机动车道、自行车道和人行道在内区域为研究对象, 尝试建立一个多交通工具复杂交织区域的交通流综合仿真模型, 对上学期间的交通流自组织和它组织现象进行仿真, 为具体交通管理提供决策支持。

## 1 研究对象及综合模型

研究对象为如图 1 所示的一所中学或小学门口道路区域, 由相反方向的机动车道(方向 1 为 Lane 3\_1, 3\_2, …, 3\_n; 方向 2 为 Lane 4\_1, 4\_2, …, 4\_n)、双向自行车道(Lane 2 和 5)、人行道(Lane 1 和 6)和校门口子区域 A 组成。图中所示的  $x$ 、 $y$  及箭头是下面所建立 SFM 中的坐标系, 依据学校上学对道路交通的影响范围确定出路段长度为  $L$ , 每条机动车道、自行车道和人行道宽度分别为  $W_a$ 、 $W_b$  和  $W_p$ 。为简化问题, 该区段不含除学校外其它单位的进出口, 公交站也设置在区段外。按照我国交通法规, 子区域 A 作为交通通道在上放学期间禁止任何车辆停放; 机动车在机动车道上正常行驶, 上学期间小汽车可临时停放在自行车道上, 部分可在邻自行车道的机动车道上短暂停车用于学生下车, 但人行道、邻中心线两个方向的机动车道不能停车; 摩托车在我国主要城市中心区禁行, 不考虑, 因此仅考虑自行车和电动车两种非机动车; 电动车在我国虽无法律地位, 但交通管理中仅限于自行车道上行驶; 在上学期部分非机动车行驶在邻自行车道的机动车道上, 与机动车等形成混行, 同时也可临时停放在除子区域 A 外的人行道、自行车道上; 小三轮车简化为自行车予以处理。在上学期部分行人、自行车、电动车等穿越道路与直行车辆形成交织。

### 1.1 车辆一般道路行驶 CAM 及规则

#### 1.1.1 机动车规则

包括送学生上学的私家车、校车、教职工上班

机动车及经过该路段但与学校无关的机动车 4 种。在非交织区正常行驶时仿真演化规则同一般 CAM 规则<sup>[5,9]</sup>。其中 1m 一个元胞，小汽车占 5 个元胞，校车占 12 个元胞。

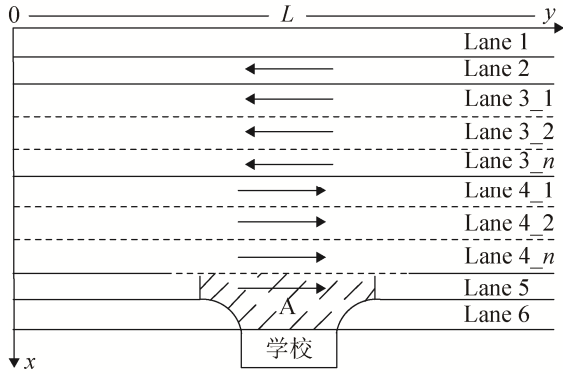


图 1 研究对象示意图

Fig. 1 Schematic diagram of studied object

### 1.1.2 非机动车规则

通过非交织区段时采用 CAM，1m 一个元胞，考虑到电动车和自行车所占空间近似，但速度不同，均设占 2 个元胞，最大速度分别为  $v_{\max\_eb}$  和  $v_{\max\_b}$ 。自行车道元胞划分见图 2 (Lane 2 同)，等分为 3 个子车道，每个子车道的宽度可容纳一辆非机动车通行。非机动车在非交织区自行车道上行驶，其规则同机动车。设子车道  $i$  向  $j$  换道概率为  $p_{i-j}$ ，则换道规则为：

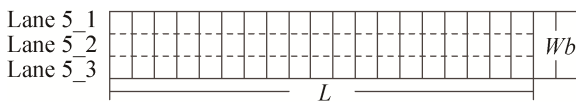


图 2 自行车道划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bike lane partition

1) 子车道 Lane 5\_1 上行驶的非机动车当换道条件满足时，只能以较大概率  $p_{1-2}$  换到 Lane 5\_2 上。

2) 中间子车道 Lane 5\_2 上行驶的非机动车，在 Lane 5\_1 和 5\_3 均满足换道条件时，出于安全驾驶的考虑，会优先换向 Lane 5\_3 上，远离机动车道，即： $0 < p_{2-1} < p_{2-3} < 1$ 。

3) 子车道 Lane 5\_3 上行驶的非机动车只能换到 Lane 5\_2 上，换道概率为  $p_{3-2}$ 。

到达学校门口附近时，Lane 5 上与学校相关的非机动车以一定比例换道到 Lane 5\_3 上，或停在自行车道、人行道上，或进入学校；Lane 2 上或停在自行车道、人行道上，或换道到邻机动车道的子车道上过马路。

### 1.1.3 机动车与非机动车混行规则

上学时段，由于私家车占用自行车道停车，非机动车可在邻自行车道的机动车道上行驶，形成机非混行。正常混行规则同前，非机动车换道概率为：

1) 进入混行区域。在临近停车区域，Lane 5\_2 和 5\_3 上的非机动车需判断前方是否停有车：①若有且满足换道条件则换到 Lane 5\_1 上，即  $p_{3-2} = p_{2-1} = 1$ ；②若 Lane 5\_2 和 5\_3 上的非机动车在行驶到与停靠的私家车的距离小于安全距离时还未找到换道机会，则停车等待换道；③部分 Lane 5\_1 上的非机动车在满足换道条件下，以概率  $p_{1-4}$  换到机动车道，其中  $p_{1-4}$  为非机动车子车道 1 向机动车道 4\_n 换道概率。

2) 驶出混行区域。①机动车道上的非机动车在驶出私家车停靠区域后，出于安全考虑，若满足换道条件，以较大概率  $p_{4-1}$  换回非机动车道 Lane 5\_1 上， $p_{4-1}$  为机动车道 4\_n 向非机动车道子车道 1 的换道概率；② Lane 5\_1 上的非机动车在驶出私家车停靠区域后，不再换到机动车道。

## 1.2 行人、自行车和电动车人行道 SFM 规则

在图 1 所示 SFM 坐标系中建立  $information(i, j, t)$  三维矩阵信息表，其中  $i, j, t$  分别为仿真对象、状态信息列和仿真时刻。仿真对象  $i$  的质量  $m_i$ 、半径  $r$ 、速度分量  $(v_x, v_y)$ 、位置坐标为  $(s_x, s_y)$ 、区分行人与非机动车标记  $mark$  1、区分仿真对象是否与学校相关  $mark$  2。其它主要参数见表 1。

### 1.2.1 受力计算

考虑到行人和推非机动车过马路者的体积差异，行人用圆表示其需求空间；自行车和电动车用椭圆表示其纵横需求空间。SFM 模型中，各受力计算为：

1) 自身驱动力。仿真对象  $i$  向目标地点靠近而产生的主观行动力为:  $\vec{f}_i(t) = m_i[v_i^0(t)\vec{e}_i^0 - \vec{v}_i(t)]$ 。

2) 来自其它仿真对象的作用力。其它仿真对象闯入  $i$  的需求空间时, 对  $i$  产生社会心理排斥力和物理作用力, 为:  $\vec{f}_{ij}(t) = \vec{f}_{ij}^{soc}(t) + \vec{f}_{ij}^{ph}(t)$ 。其中社会心理排斥力计算为:

$$\vec{f}_{ij}^{soc}(t) = A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] \vec{n}_{ij},$$

物理作用力为:

$$\vec{f}_{ij}^{ph}(t) = \vec{f}_{ij}^{ph,N}(t) + \vec{f}_{ij}^{ph,tan}(t)$$

$$\vec{f}_{ij}^{ph,N}(t) = ky\Theta(r_{ij} - d_{ij})\vec{n}_{ij}$$

$$\vec{f}_{ij}^{ph,tan}(t) = Ky\Theta(r_{ij} - d_{ij})\Delta v_{ij}^t \vec{t}_{ij}$$

同时仿真对象  $i$  前面的其它仿真对象或障碍物会对  $i$  产生作用力, 其身后的没有作用力。

表 1 SFM 中主要参数定义

Tab. 1 Definition of main parameters in SFM

变量	定义
$f_i(t)$	$t$ 时刻仿真对象 $i$ 的自身驱动力
$f_{ij}(t)$	$t$ 时刻仿真对象 $j$ 对 $i$ 的作用力
$f_{ij}^{soc}(t)$	$t$ 时刻 $j$ 对 $i$ 的社会心理作用力
$f_{ij}^{ph}(t)$	$t$ 时刻 $j$ 对 $i$ 的物理作用力
$f_{ij}^{ph,N}(t)$	$t$ 时刻 $j$ 对 $i$ 的身体正压力
$f_{ij}^{ph,tan}(t)$	$t$ 时刻 $j$ 对 $i$ 的切向摩擦力
$f_{ib}(t)$	$t$ 时刻仿真对象 $i$ 受到的边界作用力
$f_i^{all}(t)$	$t$ 时刻 $i$ 所受合力
$v_i^0(t)$	$t$ 时刻仿真对象 $i$ 的期望速率
$\vec{v}_i(t)$	$t$ 时刻仿真对象 $i$ 的速度
$\vec{e}_i^0$	仿真对象 $i$ 期望的运动方向
$A_i$	$j$ 对 $i$ 社会心理力作用强度
$B_i$	$j$ 对 $i$ 社会心理力作用范围
$r_{ij}$	$i$ 和 $j$ 的半径之和
$d_{ij}$	$i$ 和 $j$ 的中心距
$ky$	其他仿真对象对 $i$ 的正压力系数
$Ky$	其他仿真对象对 $i$ 的滑动摩擦力系数
$\Delta v_{ij}^t$	$i$ 和 $j$ 的速度差
$\vec{n}_{ij}$	$j$ 指向 $i$ 的单位向量
$\vec{t}_{ij}$	$j$ 与 $i$ 切向单位向量
$\vec{s}_i(t)$	$t$ 时刻仿真对象 $i$ 的位置坐标
$f_{vi}(t)$	$t$ 时刻直行车辆对过马路者 $i$ 的作用力
$fx_{vi}(t)$	直行车辆对过马路者 $i$ 作用力的 $x$ 轴分量
$fy_{vi}(t)$	直行车辆对过马路者 $i$ 作用力的 $y$ 轴分量
$S_i$	直行车辆对过马路者 $i$ 的作用力强度
$M_{vi}$	直行车辆对过马路者 $i$ 的作用力范围
$r_{vi}$	过马路者 $i$ 与直行车辆间距离
$\vec{n}_{vi}$	直行车辆指向过马路者 $i$ 的单位向量

3) 边界作用力为  $\vec{f}_{ib}(t)$ 。边界作用力计算参考 2), 其中自行车道边界不是实际存在的障碍物, 因此仅有社会心理力; 学校等单位围墙(或栏杆)为实际存在的边界, 其对  $i$  的作用力包括社会心理排斥力和物理作用力。

### 1.2.2 运行规则

1) 合力计算:  $\vec{f}_i^{all}(t) = \vec{f}_i(t) + \vec{f}_{ij}(t) + \vec{f}_{ib}(t)$ 。

2) 加速度:  $\vec{a}_i(t) = \vec{f}_i^{all}(t) / m_i$ 。

3) 速度更新:  $\vec{v}_i(t+1) = \vec{v}_i(t) + \vec{a}_i(t)$ 。

4) 运动过程:  $\Delta \vec{d} = (\vec{v}_i(t) + \vec{v}_i(t+1)) / 2$ ,

$\vec{s}_i(t+1) = \vec{s}_i(t) + \Delta \vec{d}$ 。其中  $\Delta d$  表示位移差。

### 1.3 自行车道和机动车道的交织规则

考虑到直行的机动车和非机动车即使在该交织区也基本围绕着车道行驶, 而 CAM 基本能描述出其进化规则, 本研究依然采用 CAM 来映射其非线性关系; 而对过马路的行人和非机动车, 其经过该交织区段时具有“没有明确的车道限制, 具有主观性和随意性, 呈现横向移动灵活, 停止时呈现穿插排列”的行为特点, 因此本研究采用 SFM 来仿真其进化过程。同时在两种模型间建立一个  $6+2n$  行  $L$  列的判断矩阵( $2n$  个机动车道,  $6$  个非机动车子车道, 共  $6+2n$  个交织车道), 判断矩阵中的各单元分别对应 SFM 中坐标系内的一定范围, 当过马路者位置坐标落进相应的矩阵单元范围内时, 被记录下来; 判断矩阵中的第  $i$  行第  $j$  列与相应车道的第  $j$  个元胞相对应。这样, 直行车辆在 CAM 中的元胞位置和过马路者在 SFM 中的坐标位置通过判断矩阵衔接起来。

#### 1.3.1 直行机动车、非机动车规则

对车头位置  $loc(k, t)$ 、速度  $v(k, t)$  以及车长  $l_k$  的直行车辆  $k$ , 在每一仿真步, 依据判断矩阵判断  $(loc(k, t)+1) \sim (loc(k+1, t)-l_k-d_{safe})$  中的所有元胞中是否有过马路者: 若有则减速行驶,  $v = \min(v(k, t), loc(p, t) - loc(k, t) - d_{safe})$ ; 若没有, 按一般规则进化。其中  $loc(p, t)$  为离本车最近的过马路者位置坐标所对应的元胞位置,  $d_{safe}$  为避免相撞的安全距离。

### 1.3.2 过马路行人、非机动车规则

行人和非机动车在过马路时，按照 1.2.1 的公式计算其受力，然后按照 1.2.2 的规则进化，同时将进化后的速度、位置等信息记录在 information 信息表中。其中过马路者在穿越马路时所受到来自直行车道上游最近的车辆的作用力如图 3 示，且随着相对位置的变化而变化，为：

$$\vec{f}_{xvi}(t) = S_i \exp\left(\frac{r_{vi}}{M_{vi}}\right) \vec{n}_{vi} \cos \varphi(t)$$

$$\vec{f}_{yvi}(t) = S_i \exp\left(\frac{r_{vi}}{M_{vi}}\right) \vec{n}_{vi} \sin \varphi(t)$$

$$\vec{f}_{vi}(t) = \vec{f}_{xvi}(t) + \vec{f}_{yvi}(t)$$

其中， $\varphi$  为直行车辆对过马路者的作用力与所标定坐标轴  $x$  轴间的夹角，其值会随着时间而变化。

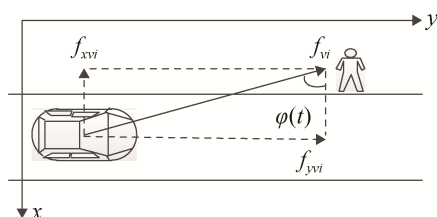


图 3 直行车辆和过马路者的作用力  
Fig. 3 Force between the straight vehicle and the crossing road user

对行人结伴过马路现象，按照“这些冒险者忽略机动车对其的作用力强行穿过马路，此时机动车不得不避让”处理。

## 1.4 边界条件

### 1.4.1 基本边界条件

分为 6:30-6:50，6:50-7:10，7:10-7:20 和 7:20-7:30 四个时间段，其中第 3 000 步(早 7:20)学校打上课预备铃声，7:30 后上课。交通流分：经过该路段与学校无关的机动车和非机动车、送学生上学的校车及教工机动车、送学生上学的私家车、送学生上学的非机动车、驾驶非机动车上学的师生、步行到校(含步行和下公交车后步行)的师生。

1) 入口条件：机动车和非机动车道同[5, 9]。对人行道，行人从最左和最右端产生：①在 Lane 1

最左端生成的，其进入人行道的初始位置坐标为  $x_0=\text{rand}(Wp-0)$ ,  $y_0=0$ ；在右端产生的，进入的初始位置为  $x_0=\text{rand}(Wp-0)$ ,  $y_0=L$ 。②在 Lane 6 左端生成的，其进入人行道 Lane 6 的初始位置坐标为  $x_0=(2nWa+2Wb+Wp)+\text{rand}(Wp-0)$ ,  $y_0=0$ ；在 Lane 6 右端生成的，其进入 Lane 6 的初始位置为： $x_0=(2nWa+2Wb+Wp)+\text{rand}(Wp-0)$ ,  $y_0=L$ 。检测初始化位置  $B_i$  范围内是否存在其他行人、非机动车，若没有，且  $\text{rand}(\ )>p_{in}$ (行人进入人行道概率)，则新的行人将进入人行道，且新进入行人随机生成的质量、半径、速度、位置以及标记和时间信息将被记录到 information 状态信息表内。

2) 出口条件：机动车道和非机动车道的车辆，依据 CA 中完全开放边界条件从道路两端驶出。对人行道：

①Lane 1 上要去往学校的行人、非机动车，若其下一时刻的位置坐标  $x_{t+1}=Wp$ ,  $y_{t+1} \in (a,b)$ ，则将从 Lane 1 上消失，等待进入交织区；②Lane 6 上要去往学校的行人、非机动车，若其下一时刻的位置  $x_{t+1}=2nWa+2Wb+2Wp$ ,  $y_{t+1} \in (a,b)$ ，则从 Lane 6 上消失，进入学校，且在 information 状态信息表内的信息将被删除。其中  $a, b$  表示学校门口始末位置。

### 1.4.2 行人和非机动车过马路时边界条件

1) 入口条件：①行人。在 Lane 2 停车送学生的私家车，停车后产生一个过马路去学校的行人，初始坐标为： $x_0=Wp+2/3 Wb$ ,  $y_0=\text{loc}(k)+0.5l_{car}$ ，其中  $\text{loc}(k)$ 为车头坐标；在 Lane 3\_1 临时停车的，产生行人的初始位置为： $x_0=Wp+Wb+Wa$ ,  $y_0=\text{loc}(k)+0.5l_{car}$ ；在 Lane 4\_n 临时停车的，其产生行人的初始位置为： $x_0=Wp+Wb+2nWa$ ,  $y_0=\text{loc}(k)-0.5l_{car}$ 。②乘非机动车到达学校对面需过马路的师生，先换到 Lane 2\_3 上，初始位置  $x_0=Wp+Wb$ ,  $y_0=\text{loc}(k)$ ；Lane 1 上去往学校的行人或非机动车，通过判断车辆对其的作用力决定是否能够进入交织区内，具体受力计算见 1.3.2。

2) 出口条件：过马路去往学校的行人或非机

动车, 若其下一时刻的位置  $x_{t+1}=2nWa+2Wb+Wp$ ,  $y_{t+1} \in (a,b)$  则其从交织区消失, 进入学校; 若  $x_{t+1}=2nWa+2Wb+Wp$ ,  $y_{t+1} < a$  或  $y_{t+1} > b$ , 则其从人行道 Lane 6 上进入学校。

## 2 仿真实验分析

### 2.1 实验条件及现状仿真分析

采用 1 所建立的综合仿真模型来研究天津市南口路(城市次干道)一中学上学期间门口区段的交通流过程。依据交通调查确定其影响范围中路段长度  $L=500$  m, 机动车道为双向四车道(包括: 人行道 Lane 1、Lane 6, 非机动车道 Lane 2、Lane 5, 机动车道 Lane 3\_1、Lane 3\_2、Lane 4\_1、Lane 4\_2),  $Wa=3.5$  m,  $Wb=3$  m,  $Wp=4$  m, 校门口在道路 240–260 m 处, 学校初中共 6 个年级, 每个年级 5 个班, 每班 60 人, 共 1800 人; 最大速度: 机动车 14 m/s。电动车 8 m/s, 自行车 4 m/s; 行人半径  $r_p \sim N(0.2 \text{ m}, 0.02)$ , 质量  $m_p \sim N(45 \text{ kg}, 5)$ , 初始速度  $v_0 \sim N(1 \text{ m/s}, 0.1)$ , 最大速度 1.4 m/s; 推非机动车者横向半径  $r_b \sim N(0.2 \text{ m}, 0.02)$ , 纵向半径 1 m, 质量  $m_b \sim N(65 \text{ kg}, 5)$ , 初始速度  $v_0 \sim N(1 \text{ m/s}, 0.1)$ , 最大速度值为 1.4 m/s; 排斥力范围行人 0.5 m, 推非机动车者横向 0.5 m, 纵向 1.5 m, 边界作用范围为 0.3 m, 直行车辆作用范围 1.5 m; 行人间的社会心理力作用强度 200 N, 身体正压力系数  $4.5 \times 10^4 \text{ N/m}$ , 滑动摩擦力系数  $5 \times 10^4 \text{ N/m}$ 。行人与推非机动车者间、推非机动车者间的社会心理作用力强度 300 N, 身体正压力系数  $5 \times 10^4 \text{ N/m}$ , 滑动摩擦力系数  $5 \times 10^4 \text{ N/m}$ , 边界社会心理力作用强度 400 N, 身体正压力系数  $5 \times 10^4 \text{ N/m}$ , 滑动摩擦力系数  $5 \times 10^4 \text{ N/m}$ ; 直行车辆社会心理力作用强度 1000 N, 仿真步长为 1 s。

图 4 为实际道路调查数据、采用 CAM<sup>[9]</sup>仿真数据和采用本综合模型仿真数据的密度-流量曲线比较(标准化后道路流量, 即道路实际流量与设计容量之比, 后同), 其中依据调查学生到达学校的各交通方式所占比例为: 校车 20%、私家车 35%、

非机动车 25%、其它 20%。可以看出: ①采用 CAM 仿真数据和采用本综合模型仿真数据所得的基本图, 与实际调查的基本图趋势大体一致, 初步验证了本综合模型的有效性。②采用本综合模型仿真数据所得的基本图与实际图比较, 偏差较小, 而采用 CAM 仿真数据, 基本图与实际比较, 偏差稍大, 进一步验证了本综合仿真模型的优越性。依据该基本图, 对综合模型中的有关参数进行了校核。

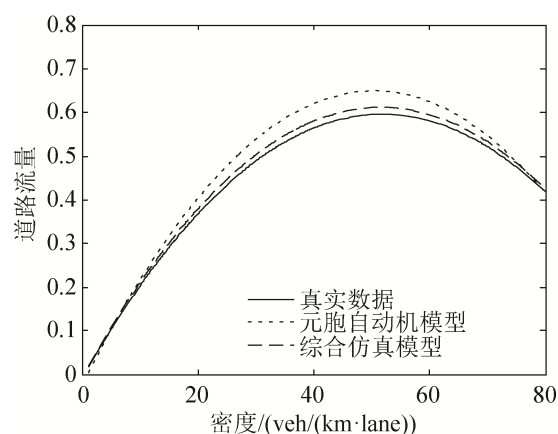


图 4 真实数据与两个仿真模型数据基本图比较  
Fig. 4 The comparison of basic phase diagrams among the actual statistics and two simulation results

### 2.2 驾私家车送学生比例对交通流影响

选取不同的学生乘私家车到校比例进行影响分析, 其中 20% 的学生乘校车到校, 其余学生乘其它方式。图 5 为乘私家车不同比例下邻校门口机动车道(Lane 4\_2)的时空图, 图 6 为学生乘私家车不同比例下道路流量比较。可以看出:

①当私家车比例达到 40% 时, 由于私家车临时停靠、重新启动以及重新汇入车道, 以及大量行人的频繁、无序过马路对于直行车辆造成干扰, 造成交通拥堵和路段瓶颈现象严重。②随着乘坐私家车比例的下降, 道路交通拥堵整体呈现一定程度的缓解趋势, 道路流量得到提高, 从 0.596 增加到 0.706。③但拥堵现象依然存在。这是因为, 随着私家车比例的减小, 原来乘坐私家车到达的学生将转化为步行或公交方式, 过马路行人的数量依然非常多, 而这种自组织现象在高峰期依然呈现无序现象。因



此,降低驾私家车送学生上学比例仅是解决学校门口路段上学期间拥堵的必要条件之一。

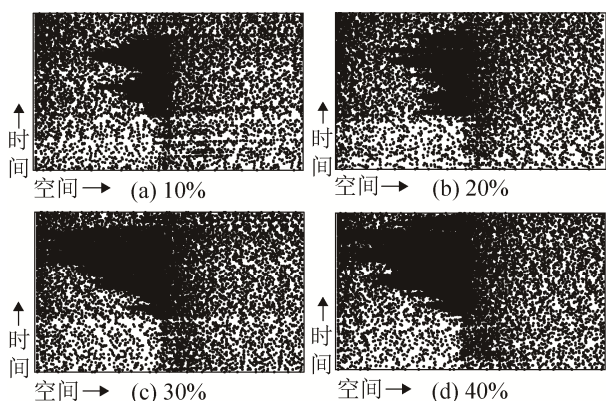


图5 不同私家车比例下车道 Lane 4\_2 时空图  
Fig. 5 The space-time diagrams of Lane 4\_2 under different proportion of private cars

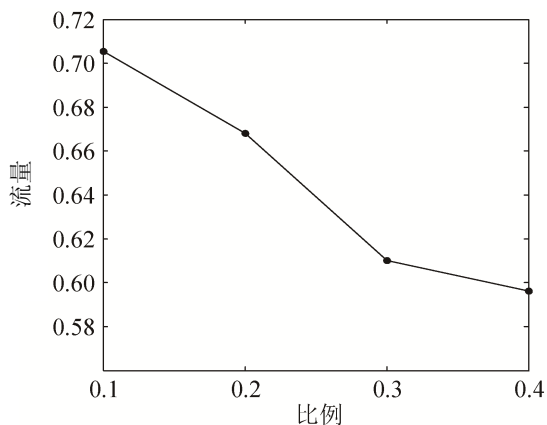


图6 不同私家车比例下道路流量比较图  
Fig. 6 Comparison diagram of road flux under different proportion of private cars

### 2.3 交通组织优化后分析

为改善交通拥堵现象进行交通组织优化,设计四个方案:方案1,维持原状;方案2,在200 m的元胞位置设置5 m宽人行道;方案3,在方案2基础上,在拥堵较严重的第二和第三时段由警察现场指挥组织行人分批从人行道过马路,且假定直行车辆等待时间  $TWC=20$  s,行人等待时间  $TWP=80$  s;方案4:在200 m和300 m元胞位置分别设置一个5 m宽人行道并在门口区段设置黄色网格线禁停区域,在禁停区域内与学校相关的车辆可以掉头进入学校,直行车辆禁止临时停车。图7为各方

案 Lane 4\_2 的时空图,图8为不同交通组织方案下道路流量比较。可以看出:

①3个交通组织方案与现状(方案1)相比在缓解交通拥堵保证交通安全方面均得到改善,道路流量也得到了提高。方案2由于将行人的过马路位置固定于一定区域,减少了直行车辆与过马路行人的交织面积,从而减少了直行车辆避让行人的制动次数,相比较于方案1中行人随意乱穿马路对于上学期间学校门口的瓶颈问题具有一定的改善效果;方案3将过马路行人和直行车辆从空间和时间上隔开,从根本上解决了过马路行人对直行车辆的干扰问题,改善效果显著;方案4中设置两个人行道,减少单条人行道上行人数量对于直行车辆的影响,在门口设置禁停区域,使得与学校相关的车辆能顺利进入学校,避免其在学校门口等待换道机会时所造成的交通干扰。

②四个方案中方案3和4较佳,且以方案3效果最为显著。这是由于在采用的它组织方式中,方案4显然比2更加科学合理,使得效果愈加明显;而方案3采取了强制的时空隔离使得它组织更加有序,拥堵和道路流量得到了最大限度的改进。从而证明了“建立在自组织基础上的交通组织优化措施”能使该区域实现有序的它组织,可达到提高道路通行效率、保证交通安全的目的。

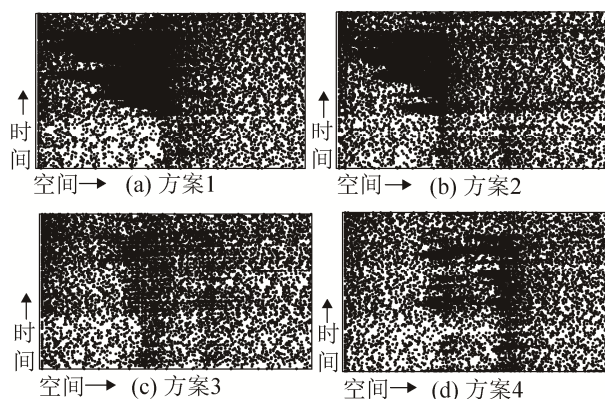


图7 不同方案下 Lane 4\_2 时空图  
Fig. 7 The space-time diagrams of Lane 4\_2 under different projects

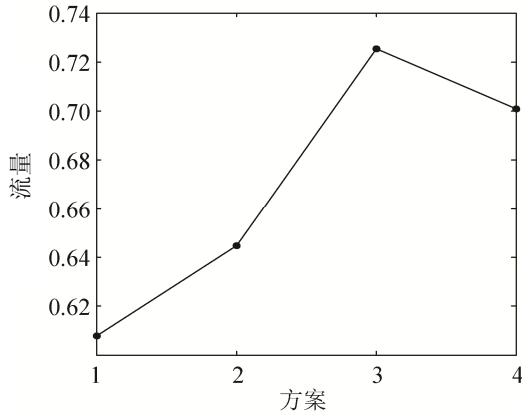


图 8 不同方案下道路流量比较图

Fig. 8 Comparison diagram of road flux under different projects

## 2.4 校门位于不同等级道路交通影响分析

为对校门位于不同等级道路时上学期间交通影响进行分析, 本研究在 2.1-2.3 中双向四车道(城市次干道)案例的基础上, 加入了学校位于城市主干道(双向六车道, 原状态道路中间没有护栏和绿化隔离带)案例、支路(双向二车道)案例的仿真实验分析。其中入口边界中从道路经过与学校无关的交通量和道路设计容量依据道路等级确定。模型校验过程同双向四车道城市次干道(略)。

城市主干道以天津市昆纬路一中学为例, 机动车道双向六车道, 机动车的最大速度 18 m/s, 其余不变。设置四个交通组织方案: 方案 1, 维持原状; 方案 2, 在 200 m 和 300 m 的元胞位置各设置一条 5 m 宽人行道, 并设路中护栏, 行人只能从人行道上过马路, 不可翻越护栏; 方案 3, 在 200 m 的元胞位置设置 5 m 宽人行道, 并设路中护栏, 在拥堵较为严重的第二和第三时段警察指挥组织行人分批从人行道过马路, 且假定直行车辆等待时间  $TWC=30$  s, 行人等待时间  $TWP=100$  s; 方案 4, 为避免上学期间对城市主干道造成的影响, 在学校相邻的等级较低的道路增设侧门, 上学期间学生只能从侧门进入学校, 具体侧门门口交通组织设计根据具体的道路等级进行(本校侧门道路为双向二车道的城市支路)。面向主干道的正门仅在重大节日时象征性的开启, 为解决部分学生从城市主干道-侧门

前支路-侧门的问题, 在主干道 200 m 的元胞位置设置 5 m 宽人行道, 并设路中护栏。

城市支路以天津市五爱道一小学为例, 机动车道双向二车道, 机动车的最大速度 10 m/s, 其余条件不变。设置四个交通组织方案: 方案 1, 维持原状; 方案 2, 在 200 m 元胞位置设置 5 m 宽人行道; 方案 3: 在方案 2 基础上, 在学校门口道路区段设置黄色网格线禁停区域; 方案 4: 在方案 2 的基础上, 在拥堵较为严重的第二和第三时段警察指挥组织行人分批从人行道过马路, 且假定直行车辆等待时间  $TWC=15$  s, 行人等待时间  $TWP=60$  s。

图 9 为 3 个案例(学校门口位于不同等级道路)各自交通组织设计方案道路流量比较。图 10 为其中校门口位于城市主干道(双向六车道)的案例和位于支路案例中各自的维持现状方案和方案 4 中邻校门口的机动车道时空图。

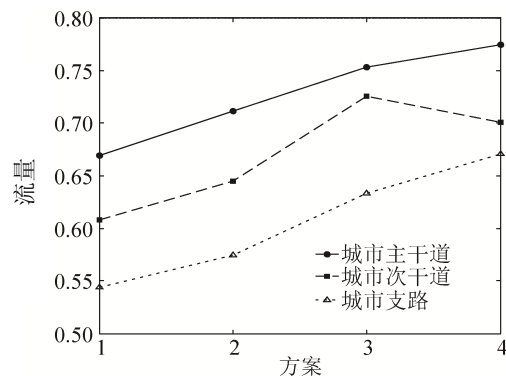


图 9 不同等级道路流量比较图

Fig. 9 Comparison diagram of road flux under different class roads

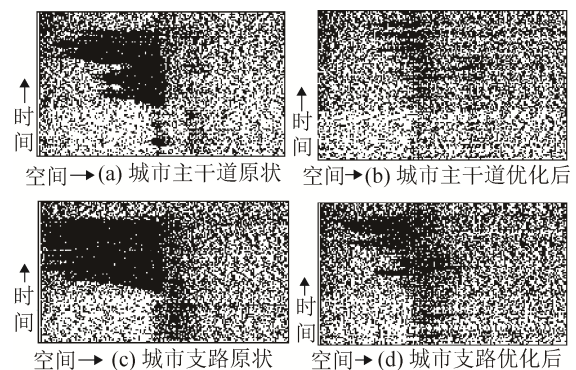


图 10 主干道和支路原状及优化后时空图

Fig. 10 The space-time diagrams of arterial road and branch road including original project and optimized one

可以看出:

①城市主干道和支路案例, 相比较于不施加任何管控措施的方案1, 其它组织方案均在一定程度上缓解了上学期间学校门口道路交通拥堵的状况, 道路流量均得到了一定程度的提升, 其中, 主干道案例的交通组织设计方案中4最佳, 对于巨大交通量短时间内积聚于学校门口主干道的拥堵情况, 上学期间使学生从学校侧门进入学校, 很大程度上避免了混合交通流交织和私家车停靠、启动对于城市主干道的影响; 支路案例的交通组织设计方案中4最佳, 这是由于道路路面较窄, 上学期间大量交通流甚至将学校门口所在支路堵死, 依靠分批过马路这种它组织方式, 实现交织主体的分离, 从而在一定程度上得到缓解。

②相比较于城市主干道和城市次干道, 原状下城市支路的道路交通在上学期间的拥堵更加严重, 道路流量只有设计容量的0.544倍, 不依靠它组织, 道路拥堵将很难解决, 即使进行了它组织—采用优化的交通组织方案, 但仍然只达到设计容量的0.671倍; 而对于城市主干道, 虽然道路流量较大, 在0.669~0.775之间, 但考虑到主干道交通量大、总的影响(延误值)较大, 也应对道路交通进行组织优化。

### 3 结论

综合 SFM 和 CAM 的优缺点, 建立一个行人、机动车和非机动车交织的中小学门口道路区域的混合交通流仿真模型, 对上学期间的交通流运行仿真, 对其可行性进行验证。本文仅是初步研究, 尚需在模型建立等理论上继续完善, 并结合系统开发, 进行具体系统的构建、系统建立后的仿真计算速度和计算复杂度等方面的研究, 为具体工程应用和实施提供支持。

### 参考文献:

[1] 费文鹏, 宋国华, 于雷. 车辆跟驰模型的 VSP 和加速度分布对比分析[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(11): 2257-2264.

Fei Wenpeng, Song Guohua, Yu Lei. Comparative Analysis of VSP and Acceleration Distribution of Car-following Models [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(11): 2257-2264.

[2] Cécile Appert-Rolland, Jérémie Du Boisberranger. Macroscopic Relaxation after On-ramps in Real Data and in Cellular Automata Simulations [J]. Transportation Research Part C (S0968-090X), 2013, 34(9): 162-175.

[3] Jun-fang Tian, Ning Jia, Ning Zhu, et al. Brake Light Cellular Automaton Model with Advanced Randomization for Traffic Breakdown [J]. Transportation Research Part C (S0968-090X), 2014, 44(4): 282-298.

[4] Rafael Delpiano, Jorge Laval, Juan Enrique Coeymans. The Kinematic Wave Model with Finite Decelerations: A Social Force Car-following Model Approximation [J]. Transportation Research Part B (S0191-2615), 2015, 71: 182-193.

[5] 庞明宝, 陈静, 杨敏. 基于CA模型的中小学放学门口道路交通仿真[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(5): 927-934.  
Pang Mingbao, Chen Jing, Yang Min. Traffic Simulation of Elementary and Middle School's Gate Road During Student Departing School Based on CA Model [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(5): 927-934.

[6] Bani Anvari, Michael G H Bell, Aruna Sivakumar. Modelling Shared Space Users via Rule-based Social Force Model [J]. Transportation Research Part C (S0968-090X), 2015, 51: 83-103.

[7] 苗志宏, 李智慧. 火灾环境下人员疏散耦合 SPH 模型及仿真[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(2): 292-300.

Miao Zhihong, Li Zhihui. Coupling SPH Model for Occupant Evacuation in Fires and Simulation [J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(2): 292-300.

[8] 邝先验, 曹韦华, 吴赞. 考虑混入逆行车辆的非机动车流元胞自动机模型[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(2): 268-274.

Kuang Xianyan, Cao Weihua, Wu Yun. Cellular Automata Model of Non-motor Vehicle Flow Considering Reverse Vehicles [J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(2): 268-274.

[9] 陈静, 庞明宝, 杨敏. 中小学门口道路上学期间的一个元胞自动机模型[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 094502.

Chen Jing, Pang Ming-Bao, Yang Min. A cellular automaton model for the road in front of elementary and middle school gates during students going to school [J]. Acta Phys. Sin., 2014, 63(9): 094502.