

中小学门口道路上学期间的一个元胞自动机模型*

陈静 庞明宝[†] 杨敏

(河北工业大学土木工程学院交通运输系, 天津 300401)

(2013年11月4日收到; 2013年12月18日收到修改稿)

在已有交通流道路瓶颈、交织区和混合交通流研究的基础上, 建立一个中小学门口道路区段上学期间的元胞自动机模型, 对上学期间的道路交通流特性进行了模拟, 对驾私家车送学生上学比例、乘校车上学比例和交警现场指挥对道路交通流的影响进行实验分析. 模拟结果表明减少驾车送学生上学比例、增加乘校车学生比例、辅助以交警现场指挥, 可保证交通安全, 从而达到抑制交通拥堵、减少车辆总通行时间提高道路实际通行能力的目的.

关键词: 元胞自动机模型, 智能交通系统, 中小学校上学, 混合交通流

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.63.094502

1 引言

城市交通作为复杂非线性网络系统^[1-4], 其日趋严峻拥堵的现象之一是可能出现的拥堵点及其扩散^[4-9]. 只有对具体拥堵点建立相关模型, 对其形成的机理、扩散的范围等进行研究并提出相关解决问题的方法^[10-13], 才能为解决城市交通网路拥堵问题提供前提条件^[14]. 在各种常态化的拥堵点中, 一些中小学和大型医院门口道路具有一定的代表性, 特别是很多位于城市中心区、老城区的重点学校、甲级医院门口道路, 每天在特定时间段如上学期间具有交通流量大、出行者及其交通工具多且混行、需要临时停车上下人、可能与上下班高峰交通流产生交叉、交通冲突严重等特点, 拥堵所形成的局部瓶颈如果不能迅速消散, 可能会随时向线、面扩展, 影响到整个城市交通网络, 而这一现象已经成为很多城市所面临的迫切需要解决的交通问题之一.

元胞自动机(CA)作为一种时间和空间都离散化的数学模型, 在描述交通流的非线性行为和其

他物理特征方面得到了很大的发展与应用^[15-26], 特别在NaSch模型的基础上, 众多学者针对具体交通问题建立其相关元胞自动机模型, 并对其交通机理及管控措施进行分析讨论. 如针对公交站对交通流影响的模拟分析^[6-8], 针对道路突发瓶颈的交通流影响分析等^[5], 研究的是局部瓶颈对交通流的影响^[11]; 匝道系统出入口交通流模拟分析等^[9,15,19-21], 针对的是交织区交通流的动态特性及其分析; 针对自行车流模型的建立与分析^[24]; 针对行人和机动车相互干扰分析^[10,11,25,26], 研究的是不同交通工具的混行问题. 这些研究对象均具有交通流来源方向和所使用的交通工具多样性、不同类型出行者速度差大、交通安全问题严重、交织区相互干扰等复杂性特点, 为交通流的深入研究提供基础, 但均不涉及中小学门口道路. 基于此, 本文在已有交通流道路瓶颈、交织区交通流和混合交通流研究的基础上, 尝试建立一个中小学门口道路区段上学期间的元胞自动机模型, 对上学期间的交通流特性进行模拟, 对驾车送学生上学比例、乘校车学生比例和交警现场指挥对道路交通流的影响进行实验分析, 为具体交通控制和管理提供参考.

* 国家自然科学基金(批准号: 50478088)和河北省自然科学基金(批准号: E2011202073)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: pmbpgy@sohu.com

2 CA 模型

研究对象如图 1 所示的一所中小学门口道路区段, 其中学校坐落在道路的一侧. 该道路区段由双向四车道的机动车道、双向自行车道及人行道组成. 整个区段道路长度 L , 宽度 W , 且为说明问题, 该区段不包含除学校以外其他单位等进出口, 公交车站也设置在研究区段以外; 自行车道在上下学时间段可停机动车; 人行道在自行车道以外; 考虑到实际, 在上学期期间邻自行车道的机动车道部分司机临时停车用于学生下车, 但邻中心线两个方向的车道均不能停车; 同时一些行人(含自行车)穿越道路形成交织.

本研究对象涉及机动车、自行车和行人. 其中机动车采用经典的 STNS 模型, 道路上元胞 i 或为空或被速度为 v 的车辆占据着 (v 取 $0, 1, 2, \dots, v_{\max}$ 等整数值), v_{\max} 为车辆在道路上所允许的最大速度值. $x(i, t)$ 与 $v(i, t)$ 分别表示第 i 辆车在第 t 时刻的位置和速度, $d(i, t)$ 为第 i 辆车在第 t 时刻与第 $i + 1$ 辆车之间空的元胞数, l 为每辆车占据的元胞数, 则有: $d(i, t) = x(i + 1, t) - x(i, t) - l$. 其中 $d(i, t)_{\text{front}}$ 是第 i 辆车在第 t 时刻与旁车道上的前车间的空元胞数; $d(i, t)_{\text{back}}$ 是第 i 辆车在第 t 时刻与旁车道上的后车间的空元胞数; d_{safe} 是确保车辆不会发生撞车的安全距离; 随机慢化概率 p 的取值范围为 0 到 1 .

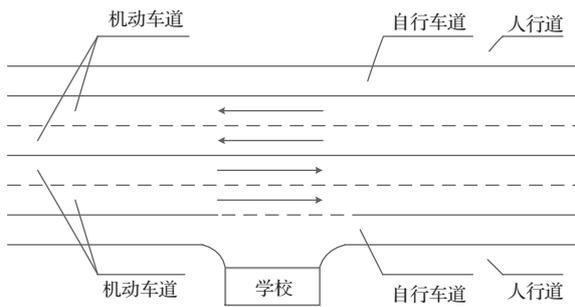


图 1 研究对象示意图

针对由于上学造成学校门口机动车和行人在机动车道所造成的干扰冲突, 本研究通过建立如图 2 所示的交织区的平面交叉系统进行建模, 以描述其人机干扰过程. 在交织区, 每个格子只能容下一个行人, 本研究中道路长度 $L = 500$ m, 宽度 $W = 3.5$ m, 人行横道上允许的最大速度为 v'_{\max} , $x'(i, t)$ 表示人行横道上第 i 个人第 t 秒的位置, 每一

个元胞的边长为 0.5 m, 即一条道路宽度占据 7 个元胞的人行道. 一个行人的占地面积约为 0.25 m², 推自行车过马路的行人占地面积为 0.75 m².

为说明问题并考虑到研究问题的复杂性, 本研究仅对机动车道的交通流进行建模研究, 对人行道和自行车道的交通流过程不进行建模仿真. 但对在上学期期间自行车道停车等拥挤所造成的正常行驶的机动车道规则进行修正, 具体采用挤车变道 [27] 方式予以修正.

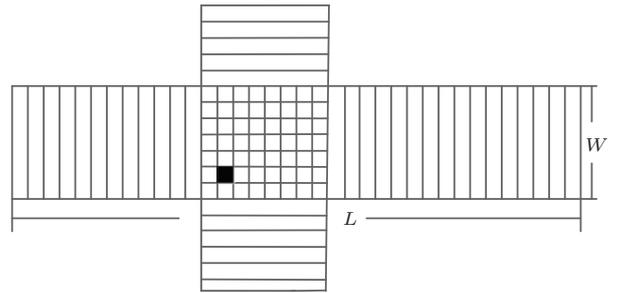


图 2 机动车和非机动车交织元胞自动机模型图

2.1 机动车正常行驶规则

道路上行驶的机动车, 分为家长送学生上学、校车、学校教职工上下班以及从该道路经过但与学校无关的四种类型车辆. 在道路上正常行驶, 其仿真演化规则为:

1) 加速过程: 驾驶员在道路上行驶车辆时, 总是期望以最大速度行驶.

$$v(i, t + 1) = \min(v(i, t) + 1, v_{\max}).$$

2) 减速过程: 为避免与前车发生碰撞并保持安全车距而采取减速措施.

$$v(i, t + 1) = \min(v(i, t), \max(d(i, t) - d_{\text{safe}}, 0)).$$

3) 以概率 p 随机慢化过程: 驾驶员在道路上行驶时, 由各种不确定因素造成的车辆减速.

$$v(i, t + 1) = \max(v(i, t) - 1, 0).$$

4) 运动过程: 驾驶员按照调整后的速度向前行驶, 并进入下一仿真步.

$$x(i, t + 1) = x(i, t) + v(i, t + 1).$$

5) 换道过程: 驾驶员在道路行驶过程中, 当所在车道道路状况无法满足行驶要求, 且旁边车道道路行驶状况优于所在车道时, 在保证安全的情况下, 驾驶员可能会换至旁边道上行驶.

$$\textcircled{1} d(i, t) < \min(v(i, t) + 1, v_{\max});$$

$$\textcircled{2} d(i, t)_{\text{front}} > d(i, t);$$

$$\textcircled{3} d(i, t)_{\text{back}} > d_{\text{safe}};$$

$$\textcircled{4} d(i, t)_{\text{back}} > v_{\text{max}};$$

$$\textcircled{5} \text{rand}(\) < p_1.$$

其中 p_1 为路段上的换道概率.

特别地, 在靠近学校门口的路段, 送学生上学的私家车、校车、学校教职工车辆会尽量换至邻非机动车道的外侧车道上; 从该路段经过但与学校无关的车辆大部分会选择换至路况相对较好的内侧车道. 这些情况下, 只需满足 $\textcircled{2}$ 、 $\textcircled{3}$ 两个条件即可换道. 若其中送学生上学的私家车在到达学校门口仍无法换至外侧车道, 即没有合适的换道机会, 则继续前行, 寻找合适机会予以换道和停车, 在该情况下车辆已经驶过校门, 甚至有可能驶过本研究对象道路区段.

2.2 送学生上学机动车停与离开规则

对驾机动车送学生上学的家长, 驾驶车辆模型分为五个步骤: 1) 正常行驶. 2) 在自行车道寻找较理想位置停车. 3) 若停车位占满, 部分司机会驶离研究区段继续寻找停车位, 使得这些路段交通由于有部分送学生上学机动车慢速寻找停车位和停车而导致通行能力下降, 从而影响到研究对象的出口边界的具体出车. 但考虑到问题的复杂性本研究没有建立研究对象以外的模型, 无法描述其负面影响, 同时研究对象上学期间的局部瓶颈造成进入出口边界外(研究对象外区段)车流量减少, 造成正面影响, 另驶离研究区段继续寻找停车位的车辆相对较少, 本研究在模型中暂没有考虑该部分车辆对交通流的影响, 同时部分在邻自行车道的机动车道临时停车排队等待空停车位或直接让学生下车, 具体见 2.2.2 中模型规则. 4) 车辆汇入主线. 5) 继续正常行驶. 其中 1) 和 5) 的规则同 2.1; 在停车时间的确定方面, 本模型采用随机变量的处理方式, 即有的家长在学生离开汽车后迅速离开, 有的家长需要等学生过马路走向便道, 有的家长需要等学生走进学校后离开, 极个别还需再等一定时间.

2.2.1 在非非机动车道寻找较理想位置停车

车辆在到达学校门口附近(包括学校对面)时, 在自行车道寻找离学校最近且离车辆本身最近空的停车位置, 若存在则停车, 停 $\text{randperm}(10)+20$ s 时间, 对在学校对面停的车辆, 停后会出现一个从马路对面准备过马路去学校的学生.

若以上停车位置都被占用, 部分车辆会继续寻找研究对象范围以外较远距离的非机动车道停车

位停车, 此时会驶出本研究对象道路, 对在学校对面停的车辆在一个随机时间之后会产生一个从马路对面准备过马路去学校的学生.

2.2.2 邻自行车道的机动车道临时停车

若所有停车位置都被占用, 扣除到较远非机动车道停车的车辆, 部分在邻自行车道离学校最近距离的机动车道临时停车, 停 $\text{randperm}(10)+10$ s 时间; 剩余车辆会在邻非机动车道的机动车道上排队等待空停车位的出现, 伺机停车. 对在学校对面停的车辆, 停后会出现一个学生从马路对面过马路去学校.

2.2.3 停在自行车道的机动车汇入机动车道

自行车道停的送学生上学的私家车, 在送完学生后, 车辆汇入机动车道行驶, 汇入条件为

$$\textcircled{1} d(t)_{\text{front}} > d_{\text{safe}};$$

$$\textcircled{2} d(t)_{\text{back}} > d_{\text{safe}}.$$

汇入时, 车辆速度为

$$v(t+1) = \min(v(t), \max(d(t)_{\text{front}} - d_{\text{safe}}, 0)).$$

2.2.4 占用外侧车道停车送学生上学的机动车重新运行

当占用外侧车道停车送学生上学的机动车在满足停车时间后, 重新开始加速过程, 之后按照 2.1 中所述的规则正常行驶.

2.3 进学校机动车进校规则

设 240 为校门口左端所处的元胞数, 当车辆满足下列条件:

$$\textcircled{1} x(i, t) < 230;$$

$$\textcircled{2} d(i-1, t) > d_{\text{safe}}.$$

判断车辆是否在内侧机动车道上, 若是则将车辆换道至邻自行车道的外侧机动车道上; 当外侧机动车道上的学校教师机动车和校车抵达学校门口附近时, 且满足下列条件:

$$\textcircled{1} x(i, t) < 240;$$

$$\textcircled{2} x(i, t+1) > 240;$$

$$\textcircled{3} d(i-1, t) > d_{\text{safe}}.$$

该车辆驶进学校, 即从主线道路上消失. 对于可能从学校门口对面方向车道上的学校教师机动车和校车, 则会绕至道路前方(本研究范围以外)调头. 所以本研究中所涉及到的学校教师机动车和校车一律从邻学校方向道路驶入.

2.4 非机动车和机动车交织规则

过马路行人(包括学生及其家长等步行、推自行车,乘公交车或乘私家车下车后需要步行过马路等)与机动车会产生干扰冲突,用 $safelen$ 表示行人过马路时与机动车的最小安全距离. loc 表示行人所处的元胞位置,具体规则见图3所示:在图3(a)中,行人在道路边缘准备过马路时,相应车道上也存在机动车准备进入到交织区中,行人对即将驶来的机动车进行判断,当机动车与行人的距离 $d_1 \leq safelen$ 时,行人就要避让机动车,在道路边缘等待车辆过去;当机动车与行人的距离 $d_2 > safelen$ 时(见图3(b)所示),行人则开始以 $v = \min(v'_{max}, W - x'(i, t))$ 速度在交织区中行走;当行人左侧第一辆机动车判断有行人在交织区

中,则需要减速行驶, $v = \min(v(i, t), loc - x(i, t))$ 避让行人(见图3(c));当行人走出交织区后,车辆开始正常行驶(见图3(d)).同时随着车辆增多,等待过马路行人自行车数量的增加,会出现结伴行人过马路现象.即激进型行人和尾随的行人等,激进型行人(在等待过马路行人中以一定概率随机产生,本研究取20%)在交通流高峰时急于过马路,在交织区行走时不顾 $safelen$,以 $v = \min(v'_{max}, W - x'(i, t))$ 速度强行过马路,此时,机动车不得不避让行人;结伴行人是指当多个行人(多于一定数量,本研究取5人)在同一时刻处于同一道路边缘时,在下一时刻会采取同样的行为规则.推自行车过马路的规则与行人的类似,区别在于推自行车的行人纵向会占据三个元胞.

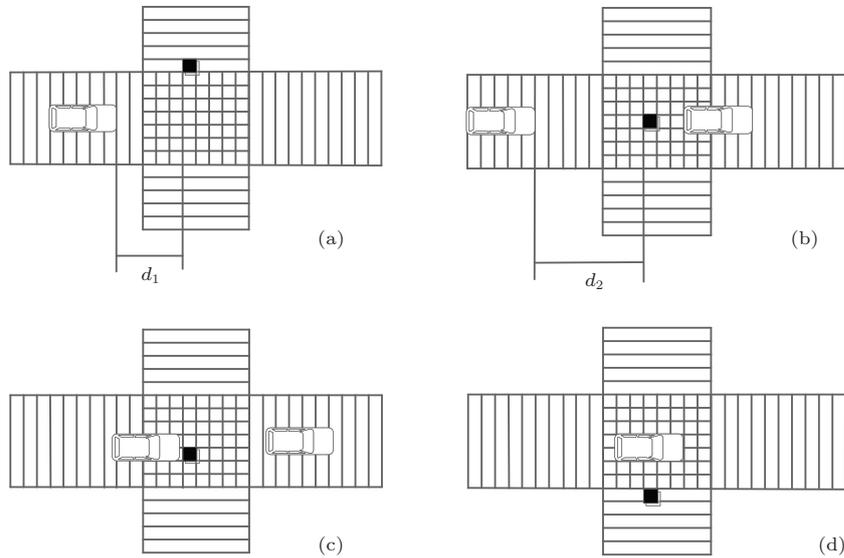


图3 行人和自行车过马路规则

2.5 边界条件

将上学前后时间设定为早上6:30—7:30间,该段细分为四个时间段,分别为6:30—6:50,6:50—7:10,7:10—7:20,7:20—7:30.实验仿真3600步,第1200步(早6:50)学校开大门,第3000步(早7:20)学校打上课预备铃声开始早读,7:30后进校门的都算迟到.

2.5.1 经过该段道路与学校无关的机动车

考虑到实际,本研究设定从该路段经过但与校无关的交通流早高峰发生在7:30之后,但随着7:30的逼近,交通量在不断增加.即经过该路段与学校无关的机动车数量在每个时间段内都服从不同均值(抵达率)的泊松分布,四个时间段的抵达

率依次为 sum_1 (veh/h), $2 \times sum_1$ (veh/h), $3 \times sum_1$ (veh/h), $4 \times sum_1$ (veh/h).在每个时间段的每个仿真步长,按照均值随机产生.其中 sum_1 (veh/h) 为在6:30—6:50间的抵达率.

按照上述抵达率采用开放边界条件产生从该路段经过但与学校无关的交通量,抵达上游入口边界,假定每个车道上最左端单位元胞对应为 $A = 1$,最左端的机动车标记为 A_{last} .机动车可以在元胞 $(1, 2, \dots, v_{max})$ 处进入车道.在每一次更新的开始,监测车道上最左侧与最右侧的车辆位置 A_{last} 以及 A_{lead} ,当 $A_{last} > v_{max} + l \times 2$,并且 $rand() > p_{in}$ (进车概率),则一辆车将以 $\min(A_{last} - (v_{max} + l), v_{max})$ 进入车道,在车道出口

采用完全开放边界条件, 如果 $A_{lead} > L$, 车辆 A_{last} 将驶出车道, 下一辆车则成为新的 A_{last} .

2.5.2 送学生上学的私家车

送学生上学的私家车总量由送学生上学的比例确定, 在四个时间段的每个时间段依据一定比例进行总数分配; 每个时间段总数确定以后, 在该时间段每个仿真步长均按照固定均值的泊松分布生成拟进入研究对象上游的车流量, 然后依据类同 2.5.1 规则决定能否进入研究对象. 所以整个仿真 1 h 时间段, 分为四个均值的泊松分布. 设 sum_2 为送学生上学私家车的总数, 四个时间段分配的私家比例分别为 $1/3, 1/2, 7/48, 1/48$, 则在每个时间段送学生上学私家车总数分别为 $1/3 \times sum_2, 1/2 \times sum_2, 7/48 \times sum_2, 1/48 \times sum_2$, 具体每个时间段服从泊松分布的均值分别为 $sum_2(\text{veh/h}), 3/2 \times sum_2(\text{veh/h}), 7/8 \times sum_2(\text{veh/h}), 1/8 \times sum_2(\text{veh/h})$, 使得在这 1 h 内送学生上学的私家车总量为

$$\begin{aligned} & sum_2(\text{veh/h}) \times 1/3h + 3/2 \times sum_2(\text{veh/h}) \\ & \times 1/3h + 7/8 \times sum_2(\text{veh/h}) \times 1/6 h \\ & + 1/8 \times sum_2(\text{veh/h}) \times 1/6 h = sum_2. \end{aligned}$$

2.5.3 送学生上学的校车以及教职工车辆边界条件

送学生上学的校车以及教职工车辆由乘校车学生比例和教师比例确定, 分别设为 sum_{31} 和 sum_{32} , 其中送学生上学的校车均在第二个时间段抵达研究对象邻学校门口道路上游入口处, 具体按照 $3 \times sum_{31}(\text{veh/h})$ 到达率的泊松分布产生, 进入研究对象的规则同 2.5.1.

虽然部分教职工需稍提前抵达学校, 但很多教职工第一节没有课程, 本研究将驾驶机动车教职工抵达研究对象的分布类同于送学生上学的私家车分布, 即四个时间段分配的比例分别为 $1/3, 1/2, 7/48, 1/48$, 在每个时间段抵达研究对象上游教职工机动车总数分别为 $1/3 \times sum_{32}, 1/2 \times sum_{32}, 7/48 \times sum_{32}, 1/48 \times sum_{32}$, 每个时间段服从泊松分布的均值分别为 $sum_{32}(\text{veh/h}), 3/2 \times sum_{32}(\text{veh/h}), 7/8 \times sum_{32}(\text{veh/h}), 1/8 \times sum_{32}(\text{veh/h})$, 使得在这 1 h 内抵达研究对象上游教职工机动车总量为 $sum_{32}(\text{veh/h}) \times 1/3h + 3/2 \times sum_{32}(\text{veh/h}) \times 1/3 h + 7/8 \times sum_{32}(\text{veh/h})$

$\times 1/6h + 1/8 \times sum_{32}(\text{veh/h}) \times 1/6 h = sum_{32}$. 进入研究对象的规则同 2.5.1.

2.5.4 行人(含自行车)边界条件

学校师生总数减去确定的送学生上学的私家车数量(假定每辆车仅载一名学生)和校车等所载教师学生数量, 即为乘坐公交、步行或骑自行车的行人总数. 将该数额除以 2 即为需要确定的乘坐公交、步行或骑自行车后抵达学校门口横穿马路行人(含自行车)数量(假定有一半抵达学校对面道路需要过马路), 设为 sum_4 . 该数量与 2.5.2 中产生的乘私家车下车后需要过马路的行人(含自行车)数量即为总的横穿马路数量.

该部分抵达研究对象的分布类同于送学生上学的私家车分布, 在四个时间段依据一定比例进行总数分配, 设为 $1/3, 1/2, 7/48, 1/48$, 则在每个时间段乘坐公交、步行或骑自行车后抵达学校门口横穿马路行人(含自行车)数量分别为 $1/3 \times sum_4, 1/2 \times sum_4, 7/48 \times sum_4, 1/48 \times sum_4$, 具体每个时间段服从泊松分布的均值分别为 $sum_4(\text{veh/h}), 3/2 \times sum_4(\text{veh/h}), 7/8 \times sum_4(\text{veh/h}), 1/8 \times sum_4(\text{veh/h})$, 使得在这 1 h 内的横穿马路总量为

$$\begin{aligned} & sum_4(\text{veh/h}) \times 1/3h \\ & + 3/2 \times sum_4(\text{veh/h}) \times 1/3h \\ & + 7/8 \times sum_4(\text{veh/h}) \times 1/6 h \\ & + 1/8 \times sum_4(\text{veh/h}) \times 1/6h = sum_4. \end{aligned}$$

3 数值模拟与结果分析

采用 2 所述模型来具体表述如图 1 所示的研究对象——天津市南口路一重点中学门口区段的交通流过程. 模拟中取长度 $L = 500 \text{ m}$, 宽度 $W = 3.5 \text{ m}$, 学校规模初高中 6 个年级, 每年级 5 个班每班 60 人共 1800 人, 学校门口在道路 240—260 m 处. 每个元胞长度为 1 m, 道路由 500 个元胞组成. 车辆最大速度为 14, 对应为 50 km/h. 每标准小汽车占 5 个元胞, 校车占 12 个元胞. 仿真步长为 1 s. 同时为排除非稳态影响, 所有实验均将前 2000 个时间步舍去, 即为 2000 步后的 3600 步实验, 显示的第一步对应 6:30.

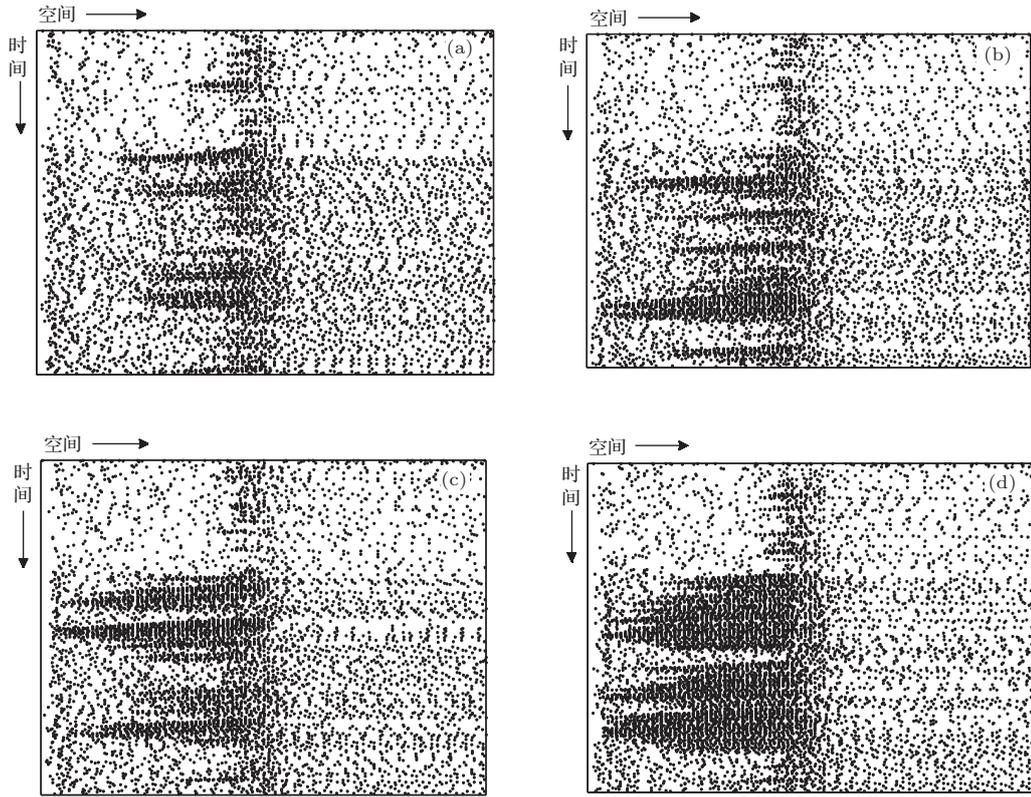


图 4 不同比例学生乘坐私家车上学的时空斑点图 (a) 10%; (b) 20%; (c) 30%; (d) 40%

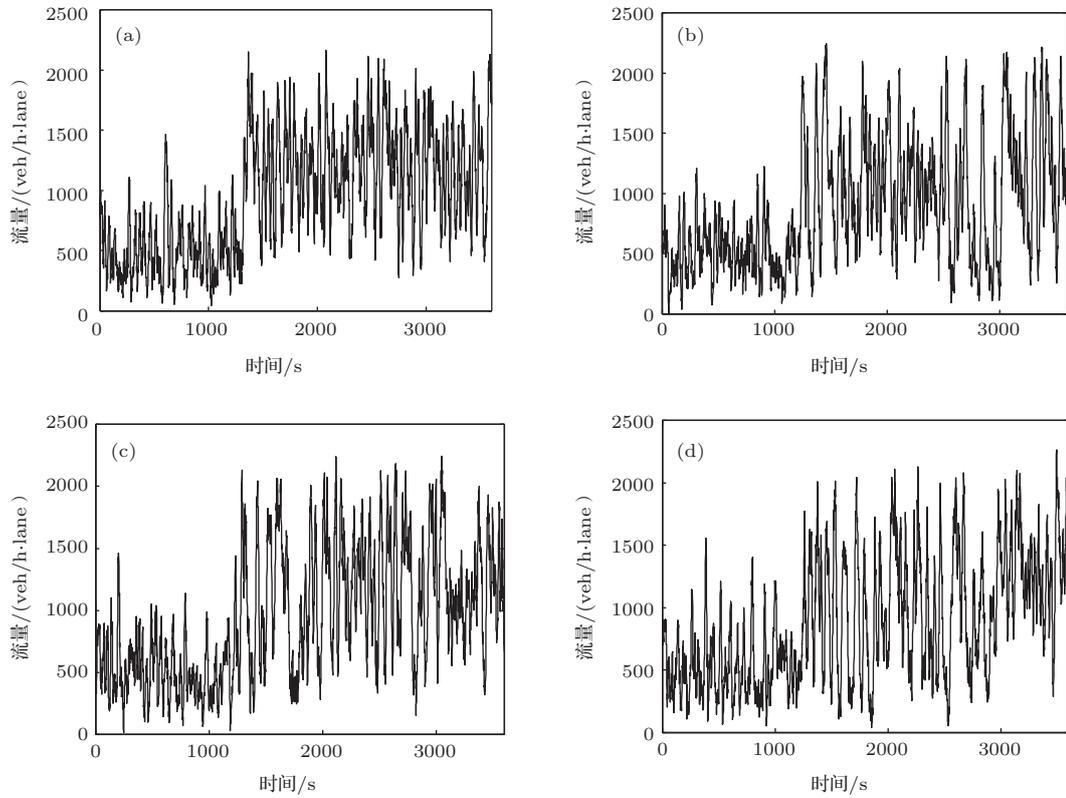


图 5 不同比例学生乘坐私家车上学的流量变化图 (a) 10%; (b) 20%; (c) 30%; (d) 40%

3.1 送学生上学比例对交通流的影响

部分家长驾机动车送学生上学, 送完孩子后离开, 比较该部分不同比例(乘坐的学生与学生总数之比)造成道路不同的交通状况, 实验中其他学生中有占总数20%的乘校车上学, 其余学生乘公交、步行或骑自行车等方式上学. 其中邻学校门口最近机动车道时空斑点图见图4. 可以看出: 在上学时段, 道路上产生了不同程度的拥堵, 且随学生乘坐私家车上学比例的增大拥堵越来越严重. 而这一现象可从图5所示的道路流量随时间变化中得到进一步证明. 显然在第二个时间段, 由于送孩子上学的机动车的增加, 道路车流量明显增大; 这些机动车在非机动车的停靠和部分在机动车道的临时停靠以及送完孩子后汇入机动车道, 使得交通流量波动很大; 随着送孩子的私家车比例的增加, 低流量的时间在明显增多.

图6为学生乘私家车上学不同比例流量密度比较图, 显然随着乘坐私家车上学比例的增加, 分界点-临界密度在下降, 实际通过道路流量在显著下降, 而这一趋势可以从图7所示的道路实际通行能力的变化中得到更加精确的验证: 不同比例学生乘坐私家车上学时, 均产生局部瓶颈, 降低了道路实际通行能力; 随着学生乘坐私家车上学比例从10%增加到40%, 对道路的影响越来越大, 道路通行能力从0.867下降到0.837, 越来越低. 因此适

当减少学生乘坐私家车上学的比例, 是有效的缓解学校门口交通拥堵现象的基本条件.

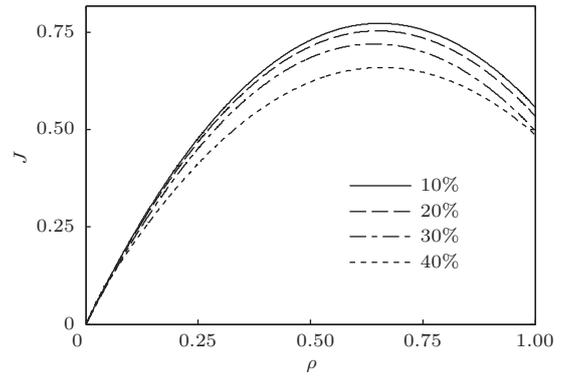


图6 私家车送学生上学不同比例流量密度图

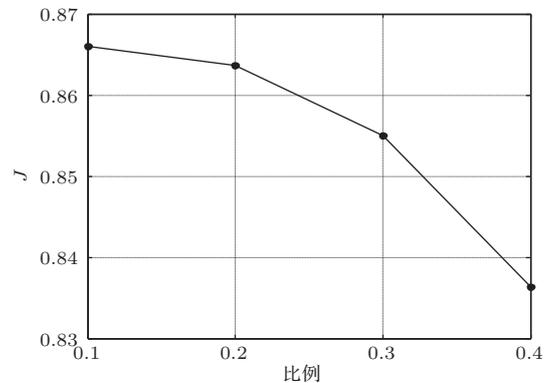


图7 私家车送学生上学不同比例道路实际通行能力图

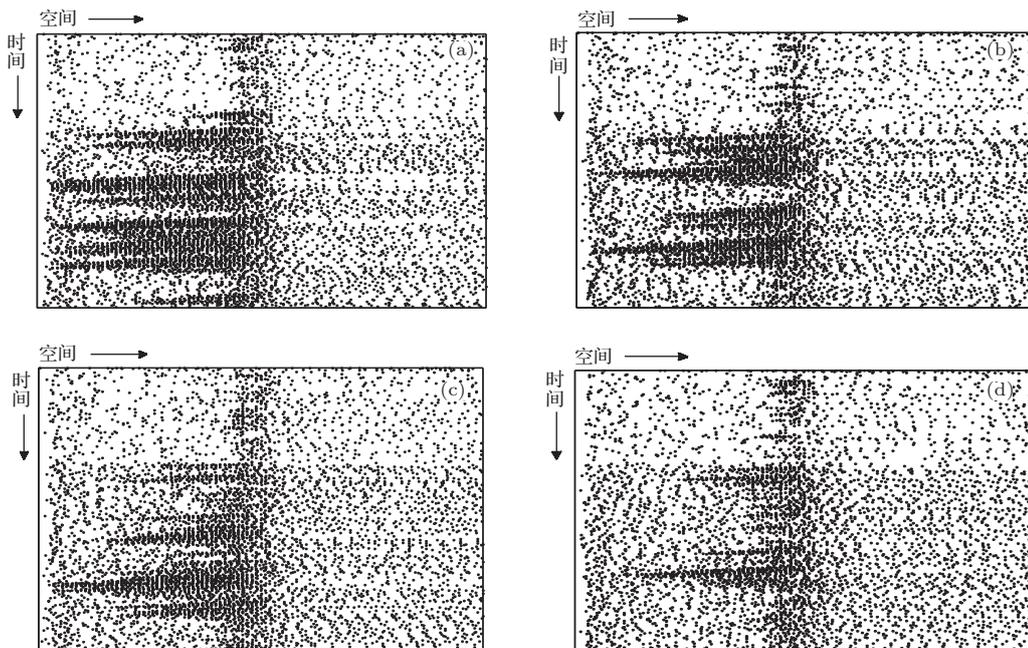


图8 乘坐校车上学的不同比例时空斑点图 (a) 10%; (b) 30%; (c) 50%; (d) 70%

3.2 乘校车上学学生比例对交通流的影响

实验采用3.1的实验条件, 比较乘校车上学学生的不同比例(乘坐校车学生数量与学生总数之比)造成道路不同的交通状况, 实验中其他学生中有20%的乘坐私家车上学, 其余乘坐公交、步行或骑自行车等上学. 其中邻学校门口最近机动车道时空斑点图见图8. 可以看出: 在上学时段, 道路上产生了不同程度的拥堵, 但随学生乘校车比例的增大拥堵越来越轻微. 而这一现象可从图9所示的道路流量随时间变化中得到进一步证明, 显然在第二个时间段, 由于有送学生上学的机动车, 道路车流量增大且波动很大, 但随着乘校车比例的增加, 低流

量的时间在明显减少.

图10为学生乘校车不同比例的流量密度比较图, 显然随着乘坐校车上学比例的增加, 分界点-临界密度在上升, 实际通过道路流量在显著上升, 而这一趋势可以从图11所示的道路实际通行能力的变化中得到更加精确的验证: 不同比例学生乘校车上学时, 由于有一定比例学生由家长驾车送上学, 产生局部瓶颈降低了道路实际通行能力; 随着学生乘坐校车上学比例从10%增加到70%, 对道路的影响越来越轻, 道路通行能力从0.837上升到0.88, 越来越高. 因此增加学生乘校车上学的比例, 是缓解学校门口交通拥堵现象的有效条件.

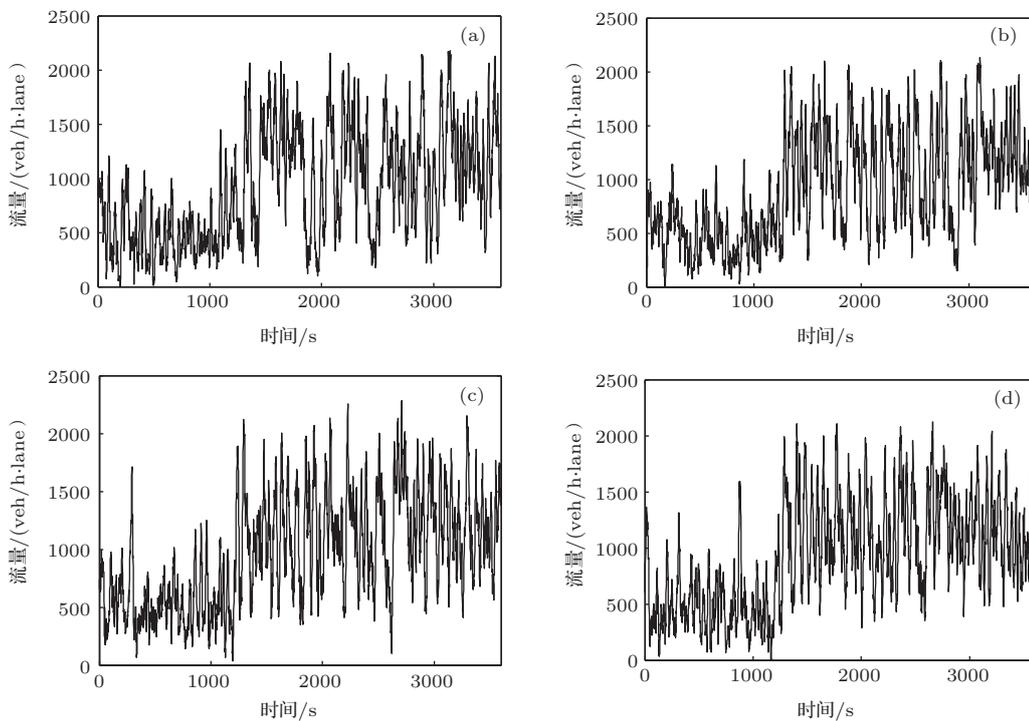


图9 乘坐校车上学不同比例流量变化图 (a) 10%; (b) 30%; (c) 50%; (d) 70%

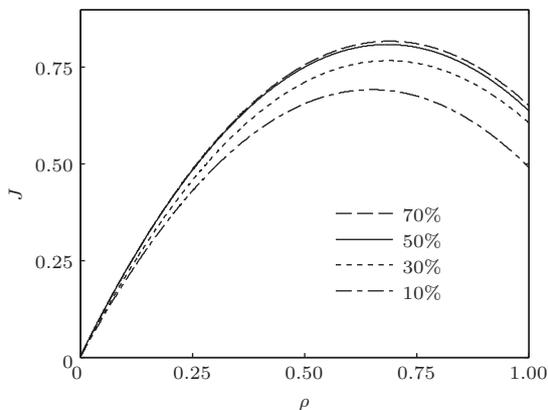


图10 乘校车不同比例流量密度图

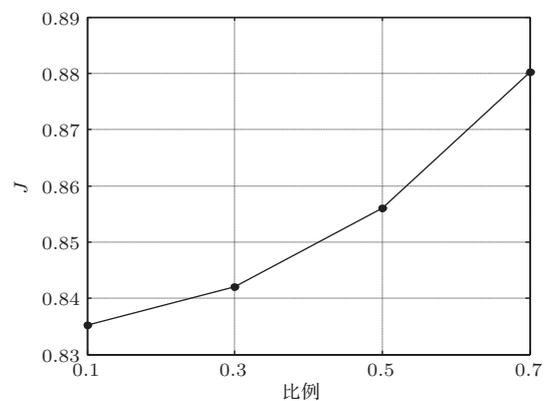


图11 乘坐校车不同比例道路实际通行能力图

3.3 交警现场指挥的影响

若交警现场指挥, 禁止车辆在机动车道上临时停放, 且现场指挥在 240—260 m 处允许行人和自行车穿越道路, 其他条件同 3.1. 在该条件下不同乘坐私家车上学学生比例的交通状况见图 12 所示. 可以看出: 在交警的指挥下, 机动车道上禁止车辆的停放和行人过马路有序, 道路交通拥堵减轻, 没有非常严重的拥堵现象发生, 只有因车辆的汇入以及

行人和自行车穿越马路对道路产生的干扰. 将该图与图 4 对比, 可以看到拥挤现象有了明显地改善且在乘坐私家车上学比例较小时, 道路只有轻微拥挤现象. 道路实际通行能力比较见图 13 所示, 可以看出: 随着学生乘坐私家车上学的比例增加道路的实际通行能力在变小, 但与图 7 进行对比可知, 相同比例下, 交警现场指挥道路流量即实际通行能力提高很多.

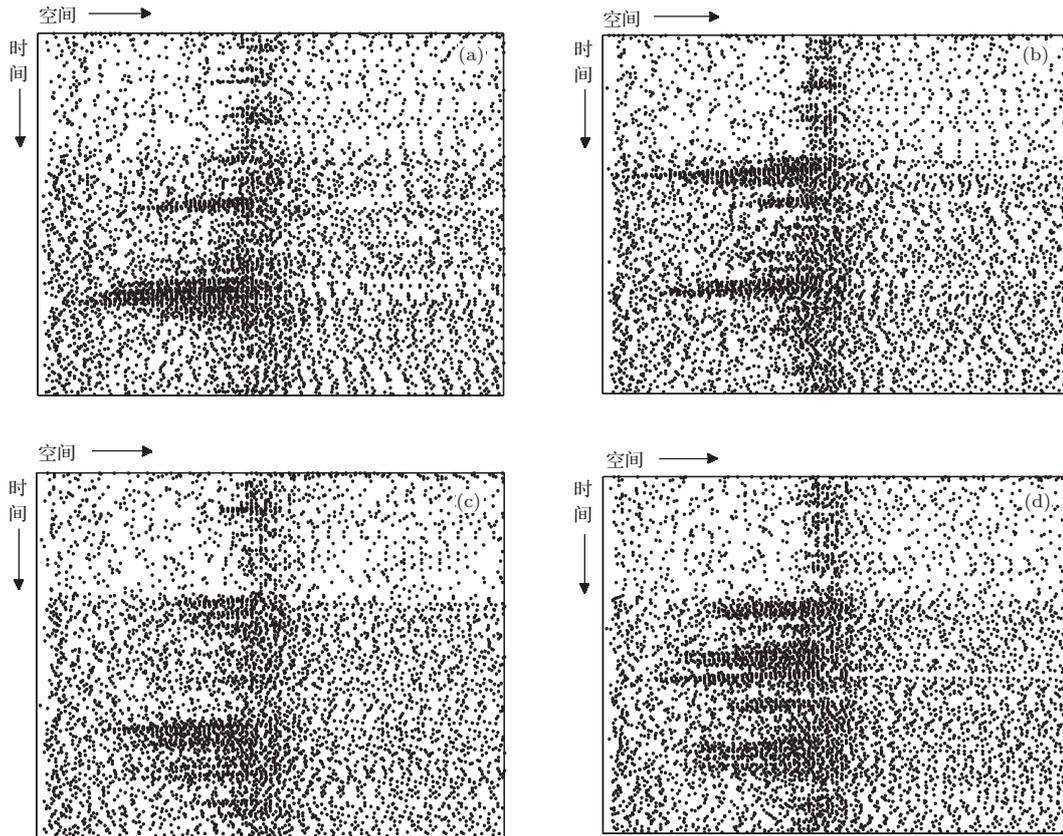


图 12 交警现场指挥不同比例学生乘坐私家车上学的时空斑点图 (a) 10%; (b) 20%; (c) 30%; (d) 40%

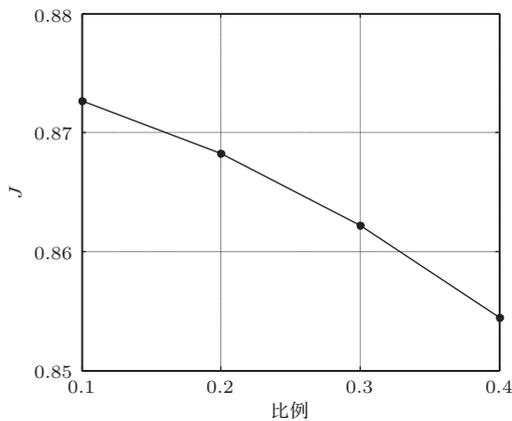


图 13 交警现场指挥道路实际通行能力图

4 结 论

在已有交通流瓶颈、交织区交通流和混合交通流研究的基础上建立一个中小学门口道路区段上学期间的元胞自动机模型, 对上学期间的交通流特性进行模拟, 对驾私家车送学生比例、乘校车学生比例和交警现场指挥对道路交通流的影响进行分析. 本研究仅是中小学门口道路区段上学期间交通流特性的初步研究, 尚需要在理论模型建立方面加入自行车与停车道的具体混合交通流行为, 在时间段上就放学期间的元胞自动机模型的修改与交通流特性进行深入研究, 以此为依据为具体交通工程

实践提供决策支持.

参考文献

- [1] Fred Mannering 2009 *Transportation Research Part F* **12** 99
- [2] Li S B, Wu J J, Gao Z Y, Lin Y, Fu B B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050701 (in Chinese)[李书彬, 吴建军, 高自友, 林勇, 傅白白 2011 物理学报 **60** 050701]
- [3] Nikolas Geroliminis, Daganzo C F 2008 *Transportation Research Part B* **42** 759
- [4] Soyoung Ahn, Sravani Vadlamani, Jorge Laval 2013 *Transportation Research Part C* **34** 138
- [5] Sheng P, Zhao S L, Wang J F, Zuo H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3831 (in Chinese)[盛鹏, 赵树龙, 王俊峰, 左航 2010 物理学报 **59** 3831]
- [6] Jia B, Li X G, Jiang R, Gao Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6845 (in Chinese)[贾斌, 李新刚, 姜锐, 高自友 2009 物理学报 **58** 6845]
- [7] Li Q D, Dong L Y, Dai S Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7584 (in Chinese)[李庆定, 董力耘, 戴世强 2009 物理学报 **58** 7584]
- [8] Ding J X, Huang H J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3093 (in Chinese)[丁建勋, 黄海军 2010 物理学报 **59** 3093]
- [9] Mei C Q, Huang H J, Tang T Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4786 (in Chinese)[梅超群, 黄海军, 唐铁桥 2008 物理学报 **57** 4786]
- [10] Sun Z, Jia B, Li X G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 100508 (in Chinese)[孙泽, 贾斌, 李新刚 2012 物理学报 **61** 100508]
- [11] He Z C, Sun W B, Zhang L C, Xu F F, Zhuang L J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 168901 (in Chinese)[何兆成, 孙文博, 张力成, 许菲菲, 庄立坚 2013 物理学报 **62** 168901]
- [12] Dong C F, Ma X, Wang B H 2012 *Physics Letters A* **374** 1326
- [13] Wang M, Zeng J W, Qian Y S, Li W J, Yang F, Jia X X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 070502
- [14] Yang W D, Wang T 2012 *Physics Procedia* **25** 917
- [15] Teng Y F, Gao Z Y, Jia B, Li F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1365 (in Chinese)[腾亚帆, 高自友, 贾斌, 李峰 2008 物理学报 **57** 1365]
- [16] Hua X D, Wang W, Wang H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084502 (in Chinese)[华雪东, 王伟, 王昊 2011 物理学报 **60** 084502]
- [17] Takashi Nagatani 2010 *Physics Letters A* **374** 2823
- [18] Zhang J J, Pang M B, Ren S S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 244503 (in Chinese)[张晶晶, 庞明宝, 任沙沙 2012 物理学报 **61** 244503]
- [19] Li F, Zhang X Y, Gao Z Y 2007 *Physica A* **374** 827
- [20] Li S C, Kong L J, Liu M R, Zheng R S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2276 (in Chinese)[李盛春, 孔令江, 刘慕仁, 郑容森 2009 物理学报 **58** 2276]
- [21] Jiang J S, Dong L Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 214503 (in Chinese)[江金胜, 董力耘 2012 物理学报 **61** 214503]
- [22] Jia B, Gao Z Y, Li K P, Li X G 2007 *Models and Simulations of Traffic System Based on the Theory of Cellular Automaton* (Vol.1) (Beijing: Science Press) p113 (in Chinese) [贾斌, 高自友, 李克平, 李新刚 2007 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟 (第一卷) (北京: 科学出版社) 第113页]
- [23] Xiang Z T, Xiong L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 028901
- [24] Yang X F, Mao W, Fu Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 240511 (in Chinese)[杨晓芳, 茅威, 付强 2013 物理学报 **62** 240511]
- [25] Zhang X Q, Wang Y, Hu Q H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 010508 (in Chinese)[张兴强, 汪滢, 胡庆华 2014 物理学报 **63** 010508]
- [26] Zhao X M, Xie D F, Li H O 2012 *Physics Procedia* **24** 1052
- [27] Wang Y M 2010 *Journal of System Simulation.* **22** 2149 (in Chinese) [王永明 2010 系统仿真学报 **22** 2149]

A cellular automaton model for the road in front of elementary and middle school gates during students going to school*

Chen Jing Pang Ming-Bao[†] Yang Min

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

(Received 4 November 2013; revised manuscript received 18 December 2013)

Abstract

Based on the studies on traffic bottleneck of road, interference area, and mixed traffic flow, a cellular automaton model for the roads in front of elementary and middle school gates during students going to school is established. Characteristics of traffic flow are discussed via the simulation experiment. Effects of the traffic flow and the traffic volume are analyzed including the proportion of student driving private cars, the proportion of school buses, and the command giving by traffic policeman on the scene. Results of examples given in this paper show that traffic safety can be ensured, the traffic jams can be suppressed, and the goal of achieving largest traffic flow and decreasing the passing time of vehicles can be realized by decreasing the proportion of student driving private cars, increasing the proportion of school buses, and assisting the traffic policeman to command on the scene.

Keywords: cellular automaton model (CAM), intelligent transportation system (ITS), arrival of elementary and middle school, mixed traffic flow

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

DOI: [10.7498/aps.63.094502](https://doi.org/10.7498/aps.63.094502)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50478088), and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. E2011202073).

[†] Corresponding author. E-mail: pmbpgy@sohu.com