

A Cellular Automata Model for Mixed Traffic Flow Simulation

交通灯控制下基于元胞自动机的行人过街模型研究

段后利, 张 毅

(清华大学)

Duan Houli, Zhang Yi

(Tsinghua University)

摘要: 本文提出了一种交通灯控制下的基于元胞自动机的行人过街穿越模型, 该模型由行人元胞模型、机动车元胞模型及相互作用子模型三部分组成, 用于分析在带有人行横道的一维道路上, 由行人与机动车构成的混和交通流的特性。该模型着重考虑了行人的行为特性, 在考虑诸多实际影响因素的情况下, 研究了行人的产生概率、行人不遵守交通规则的概率、行人群效应等对于车流量、行人流量和等待时间的影响, 并据此提出混和交通流情况下城市交通管理方案, 以保证行人安全, 提高通行效率, 减少城市拥堵。

关键词: 元胞自动机, 行人过街, 微观仿真, 智能交通

Abstract: In this paper, a mixed traffic flow model is proposed based on Cellular Automata (CA). This model which consists of pedestrians sub-model, motor vehicles sub-model and interaction sub-model, is used to analyze the characteristics of mixed traffic flow including motor vehicles and pedestrians on a lane with pedestrian walkway. The focus of this paper is the behavior of pedestrians, and the influence of pedestrians' behavior on the vehicle flow, pedestrian flow and the waiting time of them. The proportion of the pedestrians not to abide by traffic rules, the group effect of the pedestrians and the expectation waiting time of pedestrians, regarded as the most important pedestrians' behavior, are taken into consideration in this model. Simulation results show the ability of this model to capture the most important feature of mixed traffic flow.

Key words: Cellular Automata, Pedestrian, Microscope Simulation, ITS

1. 引言

近年来, 一维元胞自动机交通流模型得到了广泛的研究^[1-5], 利用元胞自动机模型来描述实际的交通现象具有独特的优越性, 它算法简单, 易于实现并行计算; 灵活可调, 可以研究各种具体的交通现象; 处理方式适合计算机的工作原理, 适合大规模的计算机模拟; 统计方便, 易于与宏观数据对照分析。

1992年德国学者 Nagel 与 Schreckenberg 提出了一维的 N-S 模型, 用来模拟高速公路交通流, 它为更复杂的情况或者城市交通流提供了基本规则^[1]。许多学者对已有的 N-S 模型进行了改进和扩展, 增加了慢启动规则, 将单车道模型扩展到多车道模型, 增加换向规则, 使其更加接近真实的交通情况^[2-5]。

另外一些学者尝试利用元胞自动机对行人流进行微观仿真, 并取得了一系列的成果。J. Blue 与 L. Adler 于 1997 年提出了一种用于大型露天场所的行人运动模型^[6]。1999 年,

Muramastu 等研制了一种行人随机走动模型^[7]。Blue 和 Adler 在 2000 年设计了在人行道上具有四种方向的行人模型^[8], 并与 2001 年提出一种双向行人模型^[9]。

现阶段, 上述研究主要集中在考虑车辆与车之间的关系或者是行人和行人之间的关系, 研究道路上行人和车辆之间的相互影响关系的工作还很少。但是, 在中国很多城市, 行人过街交通几乎不受约束, 行人频繁穿越机动车流, 尤其是在信号灯的相位设置不合理的情况下, 机动车和行人抢占道路通行权的现象非常严重, 导致道路的通行效率大幅度地下降, 同时也造成了很大的安全隐患。

本文利用元胞自动机建立了混合交通流模型, 来分析行人过街处混合交通流的特性。混合交通流的元胞自动机的仿真模型由三个子模型组成, 子模型一是用来仿真机动车流的元胞自动机模型, 子模型二用来仿真人行横道上的行人流, 子模型三用来描述机动车流和行人流之间的相互影响。由于机动车和行人有着不同的特性, 子模型一和二在元胞大小、

元胞数目、演化规则等各个方面都有所不同。但是两个子模型之间又有着十分密切的联系,子模型三用于建立两个子模型之间的这种联系。通过计算机仿真,考察了机动车和行人之间的相互影响关系,以及这种影响对于道路通行效率的影响。依据上述的结果,最终提出在混合交通流条件下的交通管理方案,以提高道路通行效率,缓解城市的交通拥堵。

本文按照如下的形式组织,第二部分提出了基于元胞自动机的混和交通流模型,定义了其三个子模型;第三部分给出了计算机仿真的结果,并对结果进行了分析,指出了各种影响因素对于道路通行能力的影响;最后给出全文的结论。

2. 行人过街模型

行人过街穿越系统如图1所示,系统由双向单车道以及中间的人行横道组成。两条反向的车道可以分别记做车道1与车道2。在车道的中部有垂直于车流方向的人行横道。车道与人行横道的交叉处设置有红绿灯,红绿灯周期由T个时步组成。

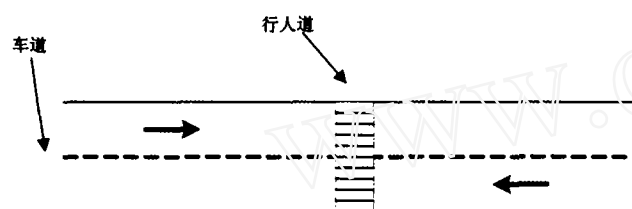


图1 行人过街穿越系统图

行人过街模型分为三个子模型,即:机动车元胞自动机子模型、行人元胞自动机子模型和相互作用子模型。

2.1 机动车元胞子模型

机动车元胞子模型用于仿真车道1和车道2上车辆的演化和运行规律。每条车道被视为长度为L的一维离散格点链,格点链上每个格点或为空或只能被一辆车占据。每个格点的长度一般取为7.5m,是车辆严重拥堵时一辆小车当量的长度。车道1和车道2采用周期性的边界条件,仿真开始随机在每个车道上放置N辆车,则该路段的车流密度为N/L。

设 X_n, v_n 表示第n辆车的位置和速度,假定所有的车辆具有最大速度 v_{max} , $d_n = x_{n+1} - x_n$ 表示第n辆车与第n+1辆车之间的车头时距。时间从t到t+1时,所有元胞的状态按照一维N-S模型的规则并行刷新一次^[1]。

一维N-S模型更新规则分为四步^[1]:

(1) 加速:司机都有以尽可能快的速度行驶的一般趋势,但不能超过最高车速。即:

$$v_n \mapsto \min(v_n + 1, v_{max})$$

(2) 减速:由于在单车道中不能超车车辆行驶要收到前车的约束,即 $v_n \mapsto \min(v_n, d_n - 1)$ 。

(3) 随机慢化:以随机减速概率p令 $v_n \mapsto \max(v_n - 1, 0)$,表示由于偶然因素,驾驶员过度反应使得车辆以一定概率减速。

(4) 位置更新:在t+1时刻,依据(1)~(3)步骤得到的新速度值来刷新车辆的位置,即 $x_n \mapsto x_n + v_n$ 。

2.2 双向行人元胞子模型

双向行人元胞子模型用于仿真人行横道上行人的运动和演化规律。参照V.J.Blue在文献[6]中的表示方法,标记每个元胞为 1×1 的正方形,人行横道的宽度表示为W,长度表示为G,则人行横道可以被表示为 $W \times G$ 的网格,每个格点代表一个元胞。这样,每个元胞都可以被标记为 $L(i, j)$,其中 $1 < i < W, 1 < j < G$ 。行人元胞子模型采用开放性的边界条件,在人行横道的两端行人以二项分布产生,每个时步以一定的概率P在行人道的两端产生一个行人。每个行人朝着车道的另一端前进,并按照V.J.Blue的双向行人模型的规则进行元胞速度和位置的更新^[9]。V.J.Blue的模型采取平行进化的方法,避免了时序进化方式的所引起的个体之间的独立性问题。其中最核心的变换行道规则是:

(1) 冲突避免机制:两个侧面相邻的步行者不能选择侧向移动。两个步行者之间的空位对于两个人各有50%概率可以占据。

(2) 选择前进或者左右变换路线的选择因素是最有利于行人加速到最大速度,由一个最优速度的子结构负责计算。

(3) 为了躲避元胞网格之内的逆向行人,可能向邻道规避。

(4) 如果超过前方速度较慢的行人的行动受到相反方向行人的干扰,则选择跟在前方速度较慢的行人身后。

(5) 邻道变换的概率为:相邻的两条邻道各有50%的概率,包括本车道的在内的不受干扰下的选择概率是80/10/10,如有一车道不可达则概率为80/20。

2.3 相互作用子模型

相互作用子模型用于考虑行人流和车流之间的相互作用,着重考虑了行人的行为特性,包括行人不遵守交通规则的可能及行人效应等。

基本的规则如下:

(1) 如果信号灯为红灯,并且车辆的速度大于车辆和人行横道之间的距离,车辆减速,即 $v_n \mapsto \min(v_n, d_n - 1)$, d_n 为车辆和人行道的之间的距离。车辆经过人行道后,距离 d_n 为无穷大。

(2) 如果人行道上有人,并且车辆的速度大于车辆和人行横道间的距离,车辆减速,即 $v_n \mapsto \min(v_n, d_n - 1)$ 。

(3) 以一定概率p产生不遵守交通规则的行人。在行人信号灯为红灯时,一般的行人会选择等待,而不遵守交通规则的行人会选择冒险穿越,冒险穿越的条件为

$$\min\left(\frac{d_n}{v_n}\right) < \alpha \frac{N \cdot D}{v_p} + R$$

(4) d_n 表示车辆与人行道的间距, v_n 表示对应车辆的速度,N表示车道数,D表示车道宽度, v_p 表示该行人的速度, α 为比例系数,R为时间裕量。

(5) 考虑行人效应, 若 3 个以上的行人选择冒险穿越, 则其余的行人会以很大的概率 P_1 选择冒险穿越。

(6) 当行人的等待时间超过 40 秒以后, 行人以很大的概率 P_2 选择冒险穿越。

3. 计算机仿真结果与分析

计算机仿真过程中, 选取每个车辆元胞长度为 4.5m, 每条车道由 400 个元胞构成, 对应的实际道路长度为 1.8 千米。行人元胞的大小为 $0.5 \times 0.5\text{m}^2$, 人行横道面积为 4×14 , 对应的实际人行横道宽度为 2 米, 长度为 7 米。车道上车辆的最大速度取为 3, 对应的实际车速为 48.6km/h。行人的最大速度取为 3, 对应于实际速度为 1.5m/s。仿真时步取为 $t=1$ 秒, 仿真时间取为 15000 个时步, 即 15000 秒, 从 5000 个时步以后开始取数据进行统计。为了消除随机因素的影响, 仿真过程共运行了十次, 取十次运行结果的平均值作为最终的仿真结果。

为了考察行人和车流之间的相互作用, 选取仿真周期内人行道和车道的交叉口通过的车流量和行人流量作为通行能力的指标, 选取车辆通过交叉口的平均等待时间和行人过街的平均等待时间作为服务能力的指标。分别考察行人产生概率、不遵守交通规则行人比例以及信号灯的绿信比对于交叉口通行能力和服务能力的影响。

3.1 行人产生概率的影响

选定控制参数为: 车流密度 $c=0.9$, 不遵守交通规则的行人比例为 $P_1=0.3$, 信号灯周期选择为 $T=120$, 绿信比为 $S=2/3$ 。图 2 (a), (b), (c) 表示在如上控制参数下, 交叉口的通行能力以及车辆和行人平均等待时间随行人产生的概率变化的情况。从图 2 (a) 中可以看到, 随着行人产生概率的增加, 车流量逐渐下降, 行人流量逐渐上升。行人产生概率 $P \approx 0.6$ 时是曲线拐点, 在拐点之前, 车流量的下降比较平缓, 在拐点之后, 车流量下降速率明显加快, 行人流量则急剧增加。这说明行人产生的概率大于 0.6 之后, 就需要考虑其他的一些措施 (如地下通道和天桥) 来解决行人过街的问题。

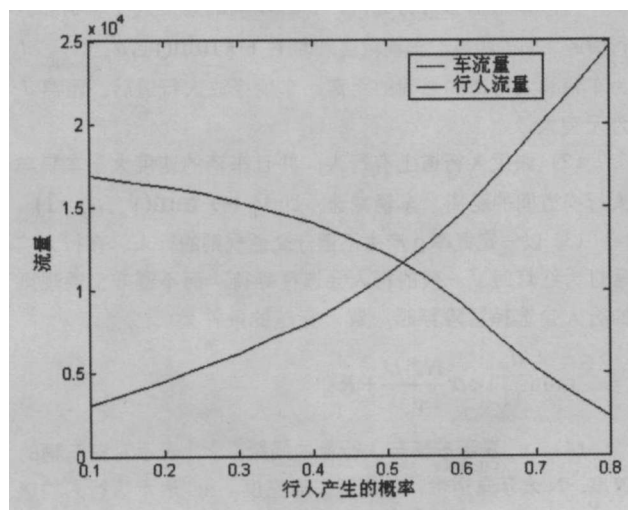


图 2 (a) 通行能力随行人产生概率的变化曲线

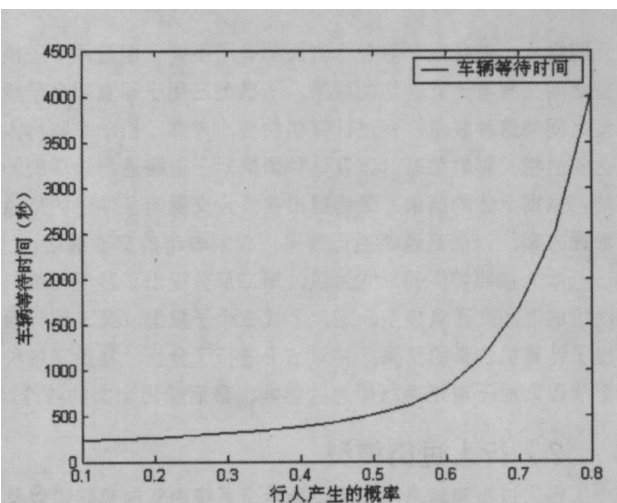


图 2 (b) 车辆平均等待时间随行人产生概率的变化曲线

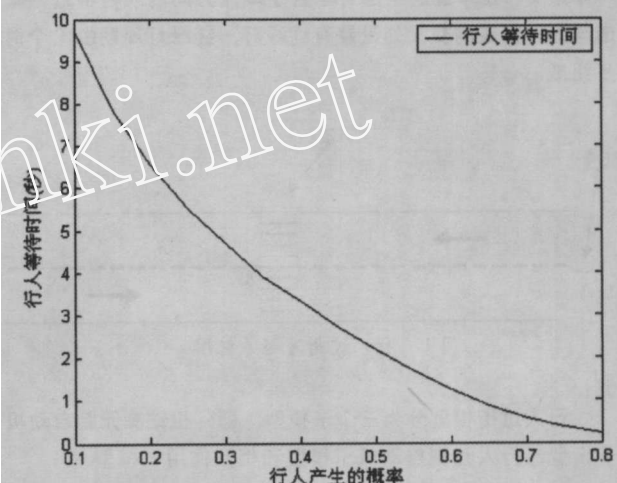


图 2 (c) 行人平均过街等待时间随行人产生概率的变化曲线

从图 2 (b) 和图 2 (c) 中可以看到, 同样在行人产生概率 $P \approx 0.6$ 时是曲线拐点, 在拐点之前, 车流等待时间上升比较平缓, 在拐点之后, 车流等待时间急剧上升加快, 行人等待时间则趋近于 0。这进一步论证了行人产生概率在 0.6 以后需要其他措施来解决行人过街问题。

3.2 不遵守交通规则行人比例的影响

选定控制参数为: 车流密度 $c=0.9$, 行人产生服从参数为 $P_2=0.5$ 的二项分布, 信号灯周期选择为 $T=120$, 绿信比为 $S=2/3$ 。图 3 (a), (b), (c) 表示在如上控制参数下, 交叉口的通行能力以及车辆和行人平均等待时间随着不遵守交通规则的行人比例变化的情况。

由图 3 (a), (b), (c) 可以看到, 随着不遵守交通规则的行人比例的上升, 路段的通行能力急剧下降, 下降的速度甚至超过由于行人产生概率增加而带来的通行能力的下降。同时, 由于行人效应效应的存在, 行人的通过流量大幅度增加, 行人等待时间则趋向于 0, 相反车辆的等待时间急剧增加, 平均达到 30 分钟, 明显出现了堵车。这说明不遵守交通规则行人的存在对于路段的效率和通行能力存在着极大的影响, 必

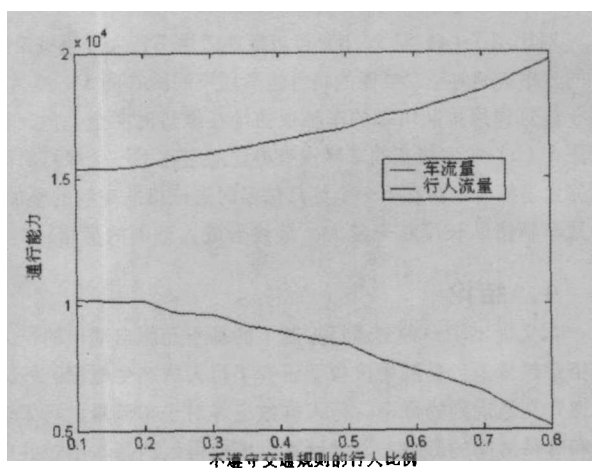


图 3 (a) 通行能力随不遵守交通规则行人比例的变化曲线

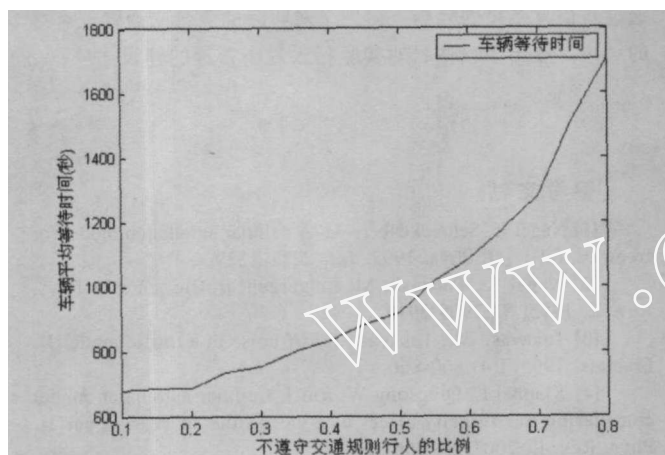


图 3 (b) 车辆平均等待时间随不遵守交通规则行人比例的变化曲线

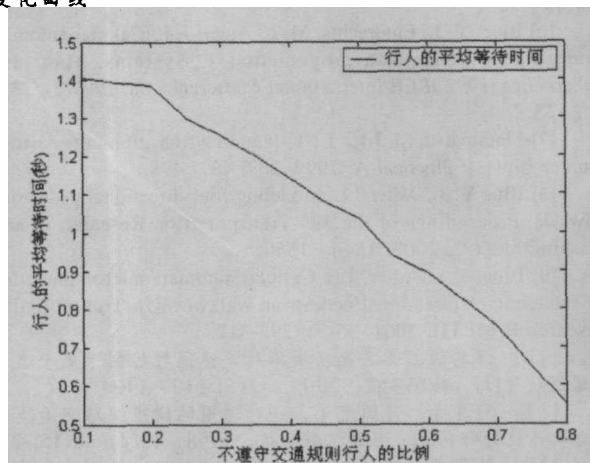


图 3 (c) 行人平均等待时间随不遵守交通规则行人比例的变化曲线

须通过必要的手段对此类行人进行约束。

3.3 绿信比的影响

选定控制参数为：车流密度 $c=0.9$ ，行人产生服从参数为 $P_2=0.5$ 的二项分布，不遵守交通规则的行人比例为 $P_1=0.3$ ，信号灯周期选择为 $T=120$ 。图 4 (a)，(b)，(c) 表示在如上

控制参数下，交叉口的通行能力以及车辆和行人平均等待时间随绿信比变化的情况。图中利用红灯相位的时间长度 T_{red} 作为横轴，它和绿信比的关系为

$$S = \frac{120 - T_{red}}{120}$$

由图 4 (a)，(b)，(c) 可以看到，随着红灯相位时间的增加，车流量的下降曲线存在着一个明显的拐点 $T_{red} \approx 10$ ，对

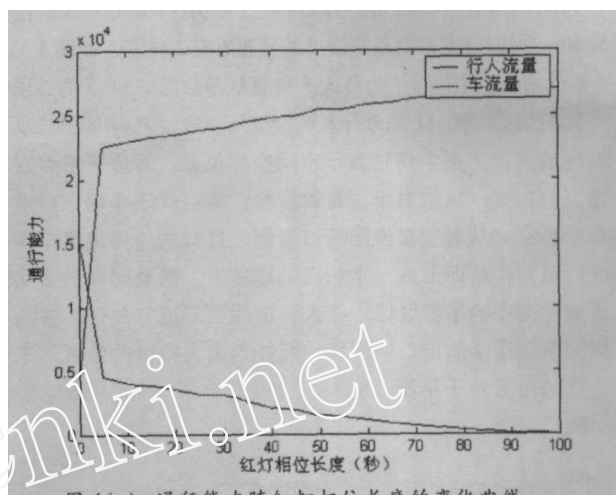


图 4(a) 通行能力随红灯相位长度的变化曲线

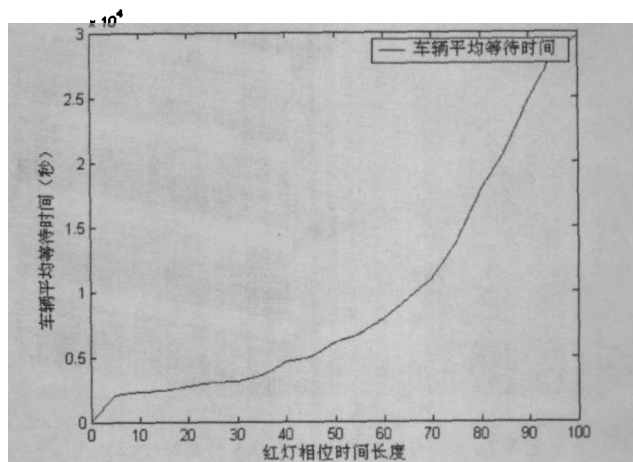


图 4(b) 车辆平均等待时间随红灯相位长度的变化曲线

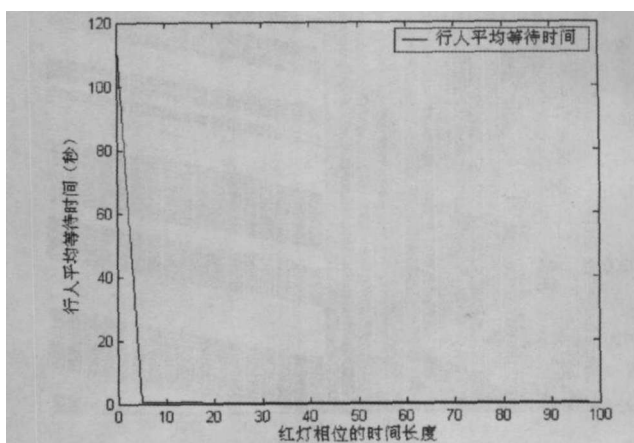


图 4(C) 行人平均等待时间随红灯相位长度的变化曲线

应的行人流量的上升曲线也存在着一个拐点 $T_{red} \approx 10$ 。这说明在红灯信号时间长度小于 10 秒, 会给车辆的通行带来很大便利, 但行人的通行能力却大幅度下降。一般建议红灯信号的时间长度取拐点稍后的一点的位置, 在本仿真案例则取 $T_{red}=20$, $S=5/6$ 。

3.4 时空二维图

选定控制参数为: 车流密度 $c=0.9$, 不遵守交通规则的行人比例为 $P_1=0.3$, 信号灯周期选择为 $T=120$, 绿信比为 $S=5/6$, 可以绘图得到单车道上的局部时空二维图, 如图 5 (a), 5 (b) 所示, 图 (a) 为行人产生服从参数为 $P_2=0.5$ 的二项分布时的情况, 图 (b) 为行人产生服从参数为 $P_2=0.8$ 的二项分布时的情况。图中横轴表示空间坐标位置, 对应于格点在车道上的位置, 纵轴表示仿真时间步, 黑点代表车辆, 白点代表空格点。从时空二维图可以看到, 红灯的作用使得车辆在人行道前排队而形成一定长度的堵塞带, 随着时间的演化就形成了图中的堵塞区域; 在人行道后则形成空白带, 并随着时间演化逐渐向出口处推移。而在远离人行道的地方, 车辆密度较小且趋于平稳。

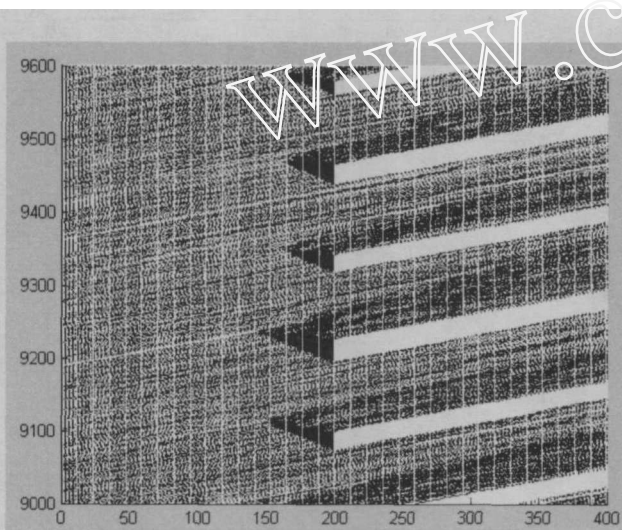


图 5 (a) 行人产生概率为 0.5 时的时空二维图

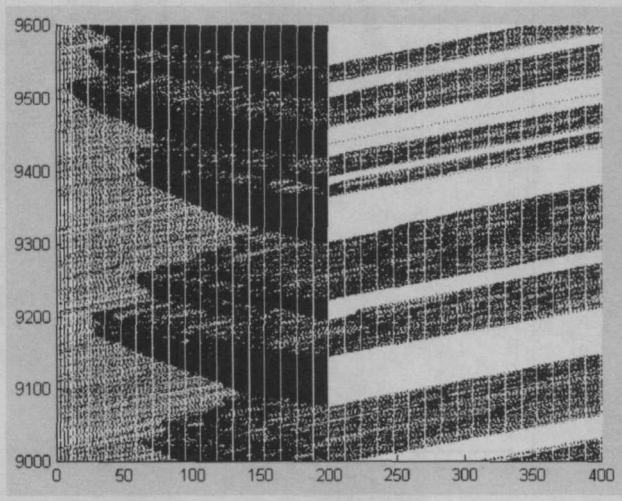


图 5 (b) 行人产生概率为 0.8 时的时空二维图

对比图 5 (a) 和 5 (b) 可以发现, 由于行人产生概率的不同, 相应的时空二维图的特性也有所不同。在图 5 (a) 中, 由于红灯作用排队堵塞的车辆很快地在绿灯时完全消散, 而在图 5 (b) 中, 堵塞的车辆没有办法完全在下一个绿灯时间内完全消散, 则会在下一个红灯信号时形成排队车辆的叠加, 导致车辆排队长度越来越大, 最终形成大范围的拥堵。

4. 结论

本文提出了一种交通灯控制下的基于元胞自动机的行人过街穿越模型, 并利用该模型研究了行人的产生概率、行人不遵守交通规则的概率、行人效应等对于车流量、行人流量和等待时间的影响。通过计算机模拟得到的基本图较好地反应了交通灯控制下混和交通流系统的运行和演化实际情况。通过对仿真结果的分析, 得到了对实际的混合交通管理有益的结果, 提出了一些针对实际行人过街管理的建议。

参考文献:

- [1] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Phys, 1992, 1-2: 2221-2229.
- [2] Nagel K., Paczuski M. Emergent traffic jams[J]. Phys. Rev. E, 1995, 51:2909-2918.
- [3] Takayasu M., Takayasu H. 1/f noise in a traffic model[J]. Fractals, 1993, 1(4):860-866.
- [4] Xiaobai L, Qingsong W, Rui J. Cellular automaton model considering the velocity effect of a car on the successive car[J]. Phys. Rev. E, 2001, 64:066128.
- [5] Rickert M., Nagel K., Schreckenberg M., Latour A. Two lane traffic simulation using cellular automata[J]. Physica A. 1996, 231:534-550.
- [6] Blue, V. J., Embrechts, M. J., Alder, J. L. Cellular automata modeling of pedestrian movements[J]. Systems, Man, and Cybernetics, 1997 IEEE International Conference on, 1997(3): 2320-2323.
- [7] Maramatsu, M, Irie, T., T. Jamming transition in pedestrian counter flow[J]. Physical A. 1999, 267: 487- 498.
- [8] Blue V. J., Adler J.L. Modeling four-directional pedestrian flows[J]. Proceedings of the 79th Transportation Research Board. Washington D C, 2000: 1546 - 1550.
- [9] Blue, V.J., Adler, J.L. Cellular automata micro-simulation for modeling bi-directional pedestrian walkways[J]. Transportation Research B-METH, 2001, 35(3): 293-312.
- [10] 谭惠丽、黄丘花、李华兵, 交通灯控制下主干道的交通流研究[J], 物理学报, 2003, 52(5):1127-1131.
- [11] 马寿峰、贺国光等, 一种通用的城市道路交通流微现仿真系统的研究[J], 系统工程学报, 1998, 13(4). -8-15, 24.
- [12] 杨晓光、陈白磊、彭国雄, 行人交通控制信号设置方法研究[J], 中国公路学报, 2001, 14(1): 73-80.
- [13] 任福田等译, 道路通行能力手册, 美国交通研究委员会专题报告 209 号, 北京, 中国建筑工业出版社, 1991 年, 312-316.

作者简介:

段后利: 博士生, 清华大学自动化系系统工程研究所,
电子邮箱: duanhouli00@mails.tsinghua.edu.cn
张 毅: 教授, 清华大学自动化系