

# 公路隧道交通的元胞自动机模型及仿真\*

## Cellular Automaton Model and Simulation of Highway Tunnel Traffic

吕集尔, 朱留华, 郑容森

LV Ji-er, ZHU Liu-hua, ZHENG Rong-sen

(玉林师范学院电子与通信工程学院, 广西玉林 537000)

(College of Electronic and Communication Engineering, Yulin Normal College, Yulin, Guangxi, 537000, China)

**摘要:** 在 Nagel-Schreckenberg 交通流模型中, 用速度负补偿机制代替原有的随机减速机制, 建立公路隧道交通的一维元胞自动机交通流模型, 并进行数值模拟及模型解析. 数值模拟结果显示, 模型的最大流量点对应的平均速度低于系统的极限速度, 适当调节相关参数可以极大限度提高公路隧道通行能力. 模型的理论解析与数值模拟结果相一致.

**关键词:** 公路隧道 元胞自动机 同步流 相变

中图分类号: U491.1+12 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2012)02-0139-03

**Abstract:** Based on the Nagel-Schreckenberg traffic flow model, a one-dimension cellular automaton traffic flow model for highway tunnel traffic is established via using negative compensation of velocity as a substitute for stochastic deceleration. Followed by computer simulating and model analysis, the results show that the average speed occurring at the maximum flow point of the model is lower than the speed limit of the system. The capacity of the highway tunnel can be improved greatly by appropriate adjusting the relevant parameters. The theoretical analysis is in agreement with the results obtained from numerical simulation.

**Key words:** highway tunnel, cellular automaton, synchronized flow, phase transition

近年来, 我国高速公路建设发展迅猛, 公路建设逐步从经济发达的东部平原, 转向经济欠发达的西部山区. 隧道作为公路的特殊路段也得到了迅速发展. 我国已成为世界上隧道最多、最复杂、发展最快的国家. 因此, 对隧道通行能力的研究, 具有十分重要的现实意义<sup>[1~4]</sup>.

1992年, 德国学者 Nagel 等<sup>[5]</sup>建立了一维元胞自动机交通流模型, 他们通过引入随机减速机制来反映驾驶员在行车过程中的不确定性行为. 本文在 Nagel-Schreckenberg 交通流模型<sup>[5]</sup>中用速度负补偿机制代替随机减速机制, 来实现低密度下一个较长周期内的平均速度与驾驶员的期望速度一致<sup>[6]</sup>, 从而建立了

公路隧道交通的单车道元胞自动机交通流模型.

### 1 模型

隧道交通的相关部门规定: 隧道里的车距  $d$  应正比于车速  $v$  的平方与自身车长  $L$  的积<sup>[7]</sup>, 即  $d \propto v^2 L$ . 换句话说: 对于相同类型的车辆, 车速  $v$  应正比于车距  $d$  的算术平方根, 即  $v \propto \sqrt{d}$ . 我们建模时, 首先将道路视为一维离散格点链, 每一格点对应的实际道路长为 5m. 每一时刻, 格点可能被某一辆车所占据或为空. 设每一辆车只占据 1 个格点, 具有的速度极限  $V_{\max} = 5$ , 对应实际车速 90km/h. 车辆进行速度更新时不能超过自身的速度极限. 其次用  $x_i(t)$  表示第  $i$  辆车  $t$  时刻的位置, 用  $d_i(t)$  表示第  $i$  辆车  $t$  时刻与前方紧邻车辆间的空格点数, 则  $d_i(t) = x_{i+1}(t) - x_i(t) - 1$ . 另外  $w \in (0, \sqrt{5}]$  为速度期望因子. 隧道中运行的车辆的演化规则如下.

(1) 确定延迟概率:

如果  $w \cdot \sqrt{d_i(t)} < V_{\max}$ ,

收稿日期: 2011-09-19

修回日期: 2012-02-05

作者简介: 吕集尔 (1964-), 男, 高级实验师, 主要从事非线性动力学, 交通建模的研究.

\* 国家自然科学基金项目 (11162019, 11047003), 广西教育厅基金项目 (200807LX401, 200911LX361), 广西教师教育 2010 年度基金项目 (桂教育师范 [2010] 60 号), 玉林师范学院青年基金项目 (2009YJQN25, 11YJJG16) 资助.

$$p = \lceil w \cdot \sqrt{d_i(t)} \rceil - w \cdot \sqrt{d_i(t)};$$

否则  $p = 0$ ;

(2) 速度更新:

$$v_i(t + 1/2) = \min(V_{\max}, d_i(t), \lceil w \cdot \sqrt{d_i(t)} \rceil);$$

(3) 速度补偿(以概率  $p$  发生):

$$v_i(t + 1) = \max(v_i(t + 1/2) - 1, 0);$$

(4) 位置更新:

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1).$$

其中车辆密度  $\rho$ 、平均速度  $\bar{v}$  的计算公式分别为

$$\rho = \frac{N}{L}, \quad (1)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(t). \quad (2)$$

## 2 数值模拟与结果分析

数值模拟时,初始时刻所有车辆以给定的密度  $\rho$  随机分布在一维格点链  $L$  上. 为消除暂态影响,每次运行对最初的  $5 \times 10^4$  时步不做统计. 以后的  $1 \times 10^4$  时步进行时间平均,这样就得到了每一次运行的结果. 为了减小初始分布对结果的影响,取样本数为 30.

### 2.1 本文模型与实测数据比较

图 1 是  $V_{\max} = 90\text{km/h}$ ,  $w = 2.0$  时的模拟结果, 其中的每个数据点都是 30 次运行的平均值. 从图 1 结果可以看出,模型在  $w = 2.0$  时的最大流量约为  $2800\text{veh/h}$ ,比较接近于文献[8]中加利福尼亚一条高速公路上的最大流量值  $2600\text{veh/h}$ (图 2).

由于模型所设定的最大速度  $V_{\max} = 90\text{km/h}$ ,低于高速公路的速度上限  $V_{\max} = 120\text{km/h}$ ,所以模拟得到的最大流量点的车辆平均速度偏小. 在低密度的自由流阶段,所有的车辆都以期望的最大速度行驶,因此系统的平均速度等于车辆的极限速度. 当道路上的车辆密度低于临界密度时,随着车辆密度的增加,系统中的车辆不发生相互关联,车辆的平均速度保持不变,车流量继续增加,所以在此阶段的速度流量关系曲线为水平直线. 当道路上的车辆密度高于临界点时,随着车辆密度的增加,车流状态逐渐由自由流转变为拥挤流,局部车流段将开始出现堵塞区域,导致车流量的迅速下降,表现为:曲线从最大流量点向速度、流量都为零的原点快速回归(图 1). 这说明,新建模型的最大流量点对应的平均速度低于系统的极限速度. 这相对于先前的交通流模型有了极大的改进<sup>[9-10]</sup>.

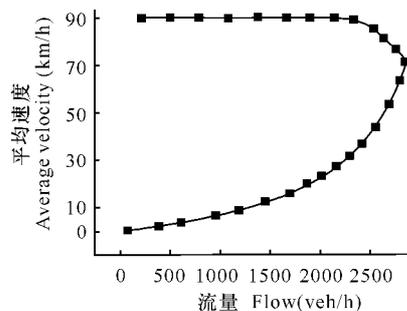


图 1 模拟速度与流量关系

Fig. 1 Relation between average velocity and flow obtained from numerical simulation

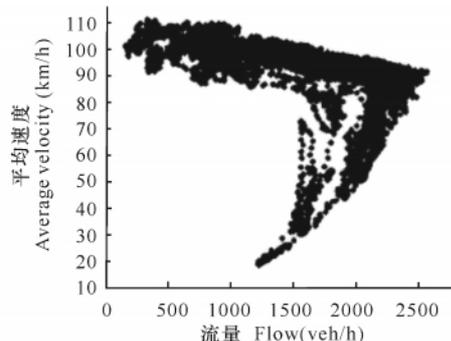


图 2 实测平均速度与车流量关系

Fig. 2 Relation between average velocity and flow obtained from a real measurement

### 2.2 车流时空演化

为了形象地描述车流随车道上车辆密度增加而出现由畅行相向宽幅运动阻塞相的演化过程,我们模拟了车辆运动过程中车辆位置与运动时间的关系(图 3). 取参数  $V_{\max} = 5\text{cells/s}$ ;  $w = 2.0$ ,模拟的空间位置为  $1000 \sim 1500$ ,时间为  $50000 \sim 50400$ . 图中黑点表示车辆,白色表示空白区域.

由图 3(a)可以看出,此时车道上车辆密度低于临界密度,车流处于自由流状态,所有的车辆都以期望的最大速度行驶,随着时间的增加,车辆位置增大,位置与时间的关系是线性的,车辆位置分布是均匀变化的;图 3(b)黑色区域是速度和间距都为 4 的车辆快速行驶区,俗称高速同步流,此时道路上的车辆完全同步,道路上的所有车辆以同一种方式进行位置更新;由图 3(c)可以看出,此时系统中还没有出现静止的车辆,灰色区域是速度和间距都为 1 的车辆慢速行驶区,俗称低速同步流,系统中还出现了高速同步流与低速同步流相分离的现象;由图 3(d)可以看出,此时车道上车辆密度较大,行驶车辆受到其它车辆的影响,自由运动的进程明显减小,车辆位置分布的变化是不均匀的. 此时系统中出现了低速同步流与阻塞相的分离,从而导致了交通流量的急剧下降.

### 2.3 车流速度演化

取参数  $V_{\max} = 5\text{cells/s}$ ;  $w = 2.0$ ,模拟的空间位置

为 1000 ~ 1045 时间为 50000 ~ 50020. 图 3 中数字表示车辆速度, 黑点表示未被车辆占据的空格点.

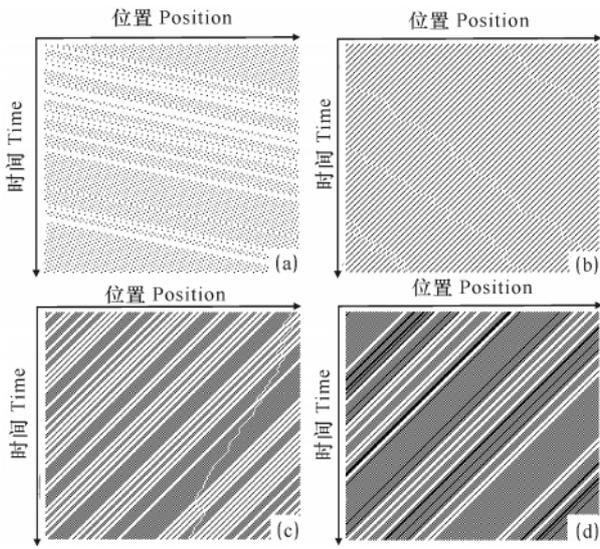


图 3 车辆位置与运动时间关系

Fig. 3 Relation diagram between position and time

(a)  $\rho = 0.10$ ; (b)  $\rho = 0.20$ ; (c)  $\rho = 0.30$ ; (d)  $\rho = 0.50$ .

由图 4(a) 可以看出, 此时车道上车辆密度较低, 车流处于畅行状态, 所有的车辆都以期望的最大速度  $V_{\max} = 5$  高速行驶, 甚至某些区域出现了较大范围的空白带. 由图 4(b) 可以看出, 此时道路上的车辆完全同步, 车辆的速度和间距都为 4. 由图 4(c) 可以看出, 一方面, 排在后一队列前方的高速车辆在遇到前一队列车辆时, 受到单车道条件的制约, 无法完成超越逐渐演变为慢车; 另一方面, 排在前一队列前方的慢车, 由于前方出现较多的空白区域, 突然加速脱离队列, 因此图中的低速同步流宽度保持恒定. 图 4(d) 结果

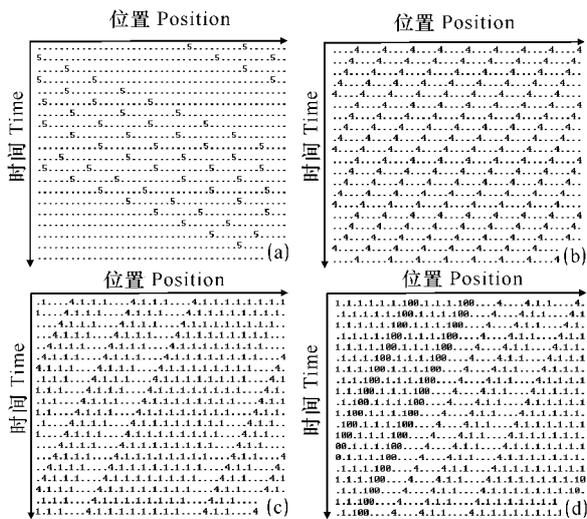


图 4 车辆速度与运动时间关系

Fig. 4 Relation diagram between velocity and time

(a)  $\rho = 0.10$ ; (b)  $\rho = 0.20$ ; (c)  $\rho = 0.30$ ; (d)  $\rho = 0.50$ .

显示: 此时车流密度较大, 车道上出现了零星静止的车辆, 以首先静止的车辆为凝结核形成堵塞带, 并迅速向后蔓延.

## 2.4 理论解析

借助于平均场理论, 首先分析最大流量出现应满足的条件: 一方面, 车辆以自身期望的速度行驶, 但是受到单车道条件的制约  $v = 2\sqrt{d} \leq d$ , 即  $d \geq 4$ , 而  $v = 2\sqrt{d}$ , 因此  $v \geq 4$ ; 另一方面, 车辆进行速度更新时不能超过自身的速度极限. 综合以上分析, 最大流量出现的条件为  $v \in [4, 5]$ . 车辆的期望行驶速度为

$$v = 2\sqrt{d}, \quad (3)$$

相邻车辆间的车头间距为

$$l = 1 + d, \quad (4)$$

每小时通过某一观察窗口的车辆数为

$$J = 3600/t = 3600v/l. \quad (5)$$

综合 (3) ~ (5) 式及最大流量点的发生条件, 解得

$$J = \frac{3600v}{1 + v^2/4}, \quad v \in [4, 5]. \quad (6)$$

对 (6) 式时间求一阶导数得

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{900(4 - v^2)}{(1 + v^2/4)^2}. \quad (7)$$

当  $v \in [4, 5]$  时,  $dJ/dt < 0$ , 所以流量的峰值为  $J(4) = 2880$ , 此时系统的平均速度为  $v = 4 \text{ cells/s} = 72 \text{ km/h}$ . 这表明, 理论解析与数值模拟结果相一致.

## 3 结束语

本文基于 Nagel-Schreckenberg 交通流模型, 引入速度负补偿机制, 并代替原有的随机减速机制, 建立了公路隧道交通的元胞自动机模型, 并通过计算机数值模拟, 探究公路隧道的最大通行能力及相关的交通流特性. 数值模拟结果表明, 新建模型的最大流量点对应的平均速度低于系统的极限速度; 相关参数的适当调节, 可以最大限度的提高公路隧道的通行能力. 该结果可以为交通管理与控制提供理论和技术支持.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部. 2010 年公路水路交通行业发展统计公报 [R]. 2010, 6(25): 1-4.
- [2] 韩直. 公路隧道交通控制策略 [J]. 公路交通技术, 1999(3): 36-41.

(下转第 146 页 Continue on page 146)

- 统的功率平衡方程[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 118-124.
- [5] Whalley R, Ebrahimi M, Abdul-Ameer A A. Machine tool axis dynamics. Proc. IMechE Part C [J]. J Mechanical Engineering Science, 2006, 220: 403-418.
- [6] 丁文正, 黄筱调, 王木兰. 面向大型机床再制造的进给系统动态特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(3): 135-140.
- [7] 夏军勇, 胡友民, 吴波, 等. 热弹性效应分析与机床进给系统热动态特性建模[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 191-198.
- [8] Wu C H, Kung Y T. Thermal analysis for the feed drive system of a CNC machine center [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003(43): 1521-1528.
- [9] Erkorkmaz K, Altintas Y. High speed CNC system design. Part II: modeling and identification of feed drives [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, (41): 1487-1509.
- [10] Kordonowy D N. A power assessment of machining tools [B]. Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [11] Jeong Y H, Min B K, Cho D W, et al. Motor current prediction of a machine tool feed drive using a component-based simulation model [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2010, 11(4): 597-606.
- [12] Senjyu T, Kuwae Y, Urasaki N, et al. Accurate parameter measurement for high speed permanent magnet synchronous motors [C]. 2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, Vancouver, Canada, 2001: 772-777.
- [13] Urasaki N, Senjyu T, Uezato K. A novel calculation method for iron loss resistance suitable in modeling permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(1): 41-47.
- [14] 段卫国, 杨飞中, 程智, 等. 交流伺服电动机的电势系数和转矩系数一样本数据的解读[J]. 伺服控制, 2007, 3: 20-22, 26.
- [15] 王成元, 夏加宽, 杨俊友, 等. 电机现代控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [16] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会. 机械工程手册[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 1996.

(责任编辑: 陈小玲)

(上接第 141 页 Continue from page 141)

- [3] 冯勇. 论高速公路隧道交通安全性管理对策[J]. 科学之友, 2008(7): 36-37.
- [4] 裴玉龙. 道路交通系统仿真[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [5] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic [J]. J Phys I France, 1992, 2: 2221-2229.
- [6] 陈时东, 朱留华, 郑容森, 等. 自动巡航混合交通系统的能耗研究[J]. 物理学报, 2009, 58(4): 2271-2275.
- [7] 任福田. 道路通行能力手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [8] Wagner P. Traffic and granular flow [M]. Singapore: World Scientific, 1996.
- [9] 朱留华, 孔令江, 刘慕仁. 一种改进的 Nagel-Schreckenberg 交通流模型[J]. 广西科学, 2007, 14(3): 253-256.
- [10] 李启朗, 邝华, 谭惠丽, 等. 驾驶员的驾驶特性对交通的影响[J]. 广西科学, 2006, 13(1): 27-30.

(责任编辑: 尹 闯)