

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.07.019

结合改进跟驰模型的交通流元胞自动机模型

叶丽萍¹, 翁小雄², 刘 芹¹

(1. 仲恺农业工程学院自动化学院, 广东 广州 510225; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 为更好地分析交通流运行规律, 实现有效的交通控制和优化, 提出结合改进跟驰模型的交通流元胞自动机 (cellular Automata, CA) 仿真模型。首先在分析正比于速度的间距倒数模型和 Bierley 模型特点的基础上, 改进得到更符合实际的跟驰模型, 进而创建的 CA 模型结合改进跟驰模型计算并离散化得到的加速度, 进行车辆及整条车道的状态更新。通过模型仿真, 得到速度差灵敏度系数 λ 、车辆间距灵敏度系数 k 和安全距离参数 α 不同取值时的交通流基本图和 $X-t$ 时空状态图。通过仿真发现, λ , k 的取值很大程度影响图形形状, 而 α 的影响较小, 同时模型仿真再现了交通流状态的动态衍化过程。通过试验验证, 该模型仿真得到的 $Q-\rho$ 关系曲线和实际交通流一致, 且可模拟再现实际交通流的失稳、阻塞演化、走走停停等非线性交通流现象。

关键词: 交通工程; CA 模型; 改进跟驰模型; 城市交通流; 基本图

中图分类号: U495, U491.2+65

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2014) 07-0115-06

Cellular Automata Model of Traffic Flow Combined with Improved Car-following Model

YE Li-ping¹, WENG Xiao-xiong², LIU Qin¹

(1. School of Automation, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou Guangdong 510225, China;

2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: In order to better analyze operation rules of traffic flow to promote traffic control and optimization effectively, a cellular automata (CA) model of traffic flow is proposed combining with improved car-following model. First, based on comprehensive analysis of characteristics of proportional-to-velocity and reciprocal-spacing model and the Bierley model, the car-following model is improved accordingly. Then the CA model established later updated the states of vehicles and the whole lane in parallel, combining with discretized accelerations of cars, which calculated by the improved car-following model. Through simulations, a series of fundamental diagrams and diagrams of space-time state of $X-t$ are obtained, considering of different values of sensitivity coefficient λ of speed difference, sensitivity coefficient k of vehicle spacing and parameter α of safe distance. The result of simulation shows that the shape of curves will change greatly because of different values of λ and k , while it will not change much for changes of the parameter α . Model simulation reproduced the dynamic evolutionary process of traffic flow state. It proved experimentally that the curves of $Q-\rho$, obtained from simulations, is consistent with actual traffic flow. The last but not the least, the simulations show that some nonlinear phenomenon of traffic flow, such as instability, blocking evolution, stop-and-go, can be reproduced by the model.

Key words: traffic engineering; CA model; improved car-following model; urban traffic flow; fundamental diagram

收稿日期: 2013-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50778074); 广东省科技计划项目 (2012B031500020)

作者简介: 叶丽萍 (1982-), 女, 广东龙川人, 讲师. (zdxming@163.com)。

0 引言

交通拥挤、交通事故是制约我国城市发展和经济建设的重要因素。分析和模拟交通流运行过程和规律,是更好地进行交通控制和优化的有效途径。然而交通流系统是一类兼具强离散性、随机性,且伴有复杂相互作用的多体系统。因其复杂性,目前交通流理论的研究成果还远未达到可准确模拟交通流运行过程的目标。

跟驰模型是微观交通流仿真建模的理论基础。模型利用微分方程描述从驾驶员接受某种刺激后做出的反应来分析和考察车辆队列车与车之间的关系^[1-3]。元胞自动机是一个由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间,按照一定的规则,在离散的时间维度上,根据元胞间相互作用而演化的动力系统^[2,4-5]。1992年,Nagel和Schreckenberg提出了著名的NaSch模型,首次把基于个体行为学习的CA模型应用于交通流仿真,1996年,Ricket和Nagel等人提出简单的双车道CA模型,探究影响基本图形状的重要参数;2001年,KOZUKA等研究了非平衡环境的交通流CA模型^[6];2005年,LÁRRAGA改进了NaSch元胞机模型^[7],并分析安全距离参数对基本图形状的影响;2010年,LO等提出了4种基于先进车辆控制和安全系统的CA模型^[8]。

跟驰模型和CA模型均是集中于实际交通流中,车辆间相互作用下的个体行为描述,但仿真的过程和效果却有差异。跟驰模型描述的车辆启动和车辆减速特性比较精细,但无法体现由一些随机因素引起的车辆速度波动。CA模型简单,计算机模拟易于实现,可模拟再现交通流许多复杂的非线性现象,然而建立真正切合实际的CA模型比较困难,其结果常与实际交通流有较大差别^[2]。本文从交通流中车辆个体行为及交通流运行机理出发,提出结合改进跟驰模型的交通流CA模型。该模型通过MATLAB仿真实现,得到各交通参量间的关系曲线,及交通流状态动态演化过程,其结果有助于揭示交通流特性及运行规律。此外,该模型可模拟再现很多非线性交通流现象,且具有单一的跟驰模型或单一的CA模型所不具有的综合优点。

1 跟驰模型的改进

1.1 正比于速度的间距倒数模型

线性跟驰模型很具代表性的一种模型是正比于速度的间距倒数模型。定义如下^[1]:

$$a_n(t+T) = \lambda_1 \frac{v_n(t+T)}{[x_{n-1}(t) - x_n(t)]^{\beta_1}} [v_{n-1}(t) - v_n(t)], \quad (1)$$

式中, λ_1 为反应灵敏度系数; β_1 为常数; $v_{n-1}(t)$, $x_{n-1}(t)$ 为 t 时刻前车速度和位置; $v_n(t)$, $x_n(t)$ 为跟驰车辆 n (即后车) t 时刻速度和位置。由式(1)可知,下一时刻后车的加速度正比于前一时刻其与前车的速度差,且当速度差一定时,还正比于后车下一时刻速度,因为车辆以较高速度行驶时,驾驶员对速度差的反应更为敏感。

1.2 Bierley 模型

Bierley提出了一种非线性跟车模型——Bierley模型,该模型更接近于现实交通流。定义如下^[9-10]:

$$a_n(t+T) = \lambda_2 [v_{n-1}(t) - v_n(t)] [x_{n-1}(t) - x_n(t)]^{-\beta} + k [x_{n-1}(t) - x_n(t)], \quad (2)$$

式中 k 为车辆间距灵敏度。下一时刻后车的加速度由2个部分构成:后车与前车速度差引起的反应;后车与前车的车头间距引起的速度波动。

1.3 改进跟驰模型

上述2种模型比较简单,但均有所不足。

(1)第1种模型没有考虑车头间距对后车加速度的正面影响。一般地,如果车辆间距允许,驾驶员均期望以较大速度行驶。而当前后车初始速度均为0时,即使其速度差为0,但只要有足够的间距,后车还是会加速往前,直至安全间距为止^[11]。

(2)Bierley模型忽略了后车当前速度对加速度变化的影响。

(3)驾驶员的加减速反应对与前车的车辆间距更为直接,而非车头间距。

因此,需要对上述模型进行改进:

$$a_n(t+T) = \lambda v_n(t) [x_{n-1}(t) - x_n(t) - l]^{-\beta} \cdot [v_{n-1}(t) - v_n(t)] + k [x_{n-1}(t) - x_n(t) - l] = \lambda v_n(t) (d_n)^{-\beta} [v_{n-1}(t) - v_n(t)] + k \cdot d_n, \quad (3)$$

式中, l 为标准车长度; d_n 为后车 n 与前车的车辆间距。

2 结合改进跟驰模型的交通流CA模型

模型假设有一股车流在单车道上行驶。该车道被格子化为一排大小相同且紧密排列的元胞空间。城市道路阻塞密度 ρ_{jam} 一般为133 veh/km,对应的最小车头间距为 $1/\rho_{jam}$ 为7.5 m^[12]。为细化单位元胞长度的刻度,使其更细致地描述车辆的加减速特性,

取单位元胞长度 $\Delta x = 2.5 \text{ m}$, 则车道上的每辆车同时占据 3 个元胞空间, 即车辆占据的 3 个元胞状态应同时更新, 车道长度 L 取 2.5 m 的整数倍。

一般城市道路最高限速 80 km/h (即 22 m/s), 极限加速度为 8 m/s^2 , 现将其离散化, 取 $v_{\max}$ 为每秒 10 个元胞 (对应于 25 m/s), $a_{\max}$ 为 3 个元胞每秒平方 (对应于 7.5 m/s^2), 则每个元胞的状态为: 空闲、或占据该元胞的车辆速度 $v = [0, 1, 2, \dots, 10]$ 。车辆加速度有 7 个可能值: $a = [-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$ 。每一时刻每辆车的初始加速度先采用改进跟驰模型进行计算, 再对计算结果离散化而得到。时间的更新步长 T 取驾驶员的反应时间 -1 s 。此外, 位移、停车时间等所有的参数均离散化为整数值。

任一时刻, 车道上所有车辆的状态, 将严格依照模型规则进行更新。模型规则分 2 个部分, 第 1 部分规则 (S1 - S4) 用于车辆速度及位置更新; 第 2 部分规则用于车辆其他参数的确定 (R1 - R3)。

S1: 加速

$$v_n(t+1) = \min(v_n t + a_n, v_{\max})$$

式中, a_n 为第 n 辆车的加速度, 由改进跟驰模型计算, 并离散化得到, 详见 R3。

S2: 随机性减速

if $[\text{rand}() < p_a]$

$$v_n(t+1) = \max[0, v_n(t+1) - 1]$$

else if $[t_{g,n} < t_{sa} \text{ and } \text{rand}() < p_b]$

$$v_n(t+1) = \max[0, v_n(t+1) - 1]$$

else if $[t_{st,n} > t_s \text{ and } \text{rand}() < p_c]$

$$v_n(t+1) = \max[0, v_n(t+1) - 1]$$

S3: 确定性减速

$$\text{If } \text{round}[d_n + (1 - \alpha) \cdot v_n(t+1)] < v_{n-1}$$

$$v_n(t+1) = \min\{v_{n-1}(t), \text{round}[d_n + (1 - \alpha) \cdot v_n(t+1)]\} \quad \alpha \in [0, 1]$$

S4: 车辆移动

$$x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1)$$

式中, $v_n(t)$, $x_n(t)$ 为车辆 n 在 t 时刻的速度和位置; $v_{n-1}(t)$, $x_{n-1}(t)$ 为前车的速度和位置; d_n 为车辆 n 与前车的车辆间隔; $t_{g,n}$ 为对应的车辆时间间隔; t_{sa} 为安全时间间隔, 取 1 s ; $t_{st,n}$ 为车辆 n 静止时间; t_s 为慢启动参数, 取 $6 \text{ s}^{[13]}$; $\text{rand}()$ 为 $0 \sim 1$ 的随机数; α 是安全距离参数。随机参量依据经验设置: $p_a = 0.1$, $p_b = 0.25$, $p_c = 0.65$ 。规则说明如下。

(1) 加速规则

为较准确描述实际交通流中车辆启动和减速特

性, 且尽可能减少行驶过程中速度骤加骤减的现象, 本模型将采用式 (3) 计算, 并离散化而得到加速度的量化值, 依据此值进行速度更新, 具体计算方法如下面的 R3。

(2) 随机减速

造成车辆随机减速主要有 2 方面原因。

①一些不可预见的交通事故、施工等因素对司机驾驶的影响, 造成驾驶员驾驶行为的不确定性, 促使驾驶员制动减速。

②较长时间的怠速使得驾驶员的启动反应有些滞后。

(3) 确定性减速

车道上行驶的车辆必须保持一个最小安全距离, 当车辆间距太小时, 后车必须进行减速, 避免发生追尾。 $\alpha \in [0, 1]$, 是一个安全距离参数, 主要和驾驶员的技术、胆略、及道路的自动化水平有关, α 越趋近于 0, 表示驾驶员技术越好, 行为越果敢, 道路自动化性能越好。

此模型把确定性减速步置于随机减速步后面, 确保能较好地控制车辆行驶过程中的随机减速结果, 使车辆的速度变化更一致和连续。

除了上述规则外, 还要根据以下规则确定 d_n 、 $t_{g,n}$ 、 $t_{st,n}$ 及 a_n 等参数。

R1: 车辆间隔 d_n 和车辆时间间隔 $t_{g,n}$

$$d_n = x_{n-1} - x_n - 3,$$

$$t_{g,n} = d_n / v_n;$$

R2: 车辆静止时间 $t_{st,n}$

$$\text{if}(v_n t = 0) t_{st,n} = t_{st,n} + 1,$$

$$\text{if}(v_n t > 0) t_{st,n} = 0;$$

R3: 车辆加速度

$$a_n = \text{round}\{[\lambda v_n t \cdot (d_n)^{-\beta} (v_{n-1} t - v_n t) + k \cdot d_n] / 2.5\}.$$

(4)

若计算的加速度 $a_n > 3$, 将对其进行修正, 使 $a_n = 3$ 。而由于系列的速度更新规则的约束, 一般不会出现 $a_n < -3$ 的情况, 使得最终得到的加速度 a_n 不会超出极限加速度。

3 模型仿真

3.1 仿真试验

模型采用周期性边界, 将 $1 \sim 333 \text{ veh}$ 车随机地分布在由 $L = 999$ (取 3 的整数倍) 个紧密相连的元胞空间组成的单车道上。仿真时间为 $1 \times 10^4 \text{ s}$ 。为保证任一时刻车辆不会发生碰撞, 车辆的速度均初始

化为0, 密度 $\rho = N / (L \cdot 2.5)$ (N 为车辆数)。对于行驶在车道上的头车, 当其位移 $x_{\text{lead}} > L$ 时, 该车就从车道前端驶出, 并从车道尾端驶入车道, 成为车道上的尾车, 其位移更新为 $x_{\text{last}} = x_{\text{lead}} - L$ 。

进行仿真时, R3 中参数 $\beta = 2$ [1]。考虑到不同驾驶员, 不同道路交通环境等差异, S3 中的安全距离参数 α 取 5 个不同的值: $\alpha = [0, 0.2, 0.5, 0.75, 1]$; 改进跟驰模型 (即 R3) 的灵敏度系数 λ 和 k 取 4 种不同的组合: $[\lambda, k] = [(0.5, 0.5), (0.75, 0.25), (1, 0.5), (2, 1)]$ 。

模型仿真可得到任一时刻通过车道某断面的所有车辆位置、瞬时车速、加速度等参量。在仿真初始时段, 存在一些制约参量内在演化的外在因素 (如状态的初始设定方式)。模型仿真分为 2 个时段, 第 1 个 $5 \times 10^3 \text{ s}$ 是消除外在因素制约状态演化的过渡时段, 其结果不用于总体的状态参量计算。第 2 个 $5 \times 10^3 \text{ s}$ 是车辆状态内在演化阶段, 其仿真结果用于区间流量、断面流量、区间平均速度、地点平均速度等状态参量的计算。然后再根据计算得到的状态参量考察各参量之间的关系图, 分析交通流特性及运行规律。其中, 流量、速度和车流密度是表征交通流特性的 3 个基本参数, 任意 2 个参数的关系特性曲线是描述交通流基本特性的交通流基本图。

3.2 仿真结果

3.2.1 断面流量-密度关系图

(1) 仿真的流量-密度关系图

断面流量 Q 是指在单位时间内, 通过车道某断面的车辆数。如图 1 所示, 纵横坐标均取相同的刻度, R3 的灵敏度系数分别取 $\lambda, k = (0.5, 0.5)$, $\lambda, k = (0.75, 0.25)$, $\lambda, k = (1, 0.5)$, $\lambda, k = (2, 1)$ 时的 $Q-\rho$ 关系图, 代表参数 $\alpha = 0, 0.2, 0.5, 0.75, 1$ 的曲线。

如图 1 所示, 在每个 $Q-\rho$ 关系曲线图中, 均可分为 5 个区域: ①随密度增大, 断面流量线性上升的自由流区域; ②小幅振荡的亚稳态区域。 ρ 约为 $0.018 \sim 0.03 \text{ veh/m}$, 此时断面流量上升到较高阶段, 出现亚稳态阶段, 系统处于特殊敏感状态, 微小的扰动会被扩大, 甚至会出现崩塌现象, 流量急剧下降, 此时也是自由流演变为拥挤流的过渡阶段 [14]; ③时走时停的拥挤流区域, ρ 约为 $0.025 \sim 0.12 \text{ veh/m}$; ④振荡堵塞区域, 在接近于堵塞阶段, 将出现振荡堵塞态, ρ 约为 $0.12 \sim 0.13 \text{ veh/m}$, 系统尤其敏感, 外界微小的扰动可能会瞬间引发交通流的完全堵塞。⑤绝对堵塞态, 此时断面流量 $Q = 0$ 。

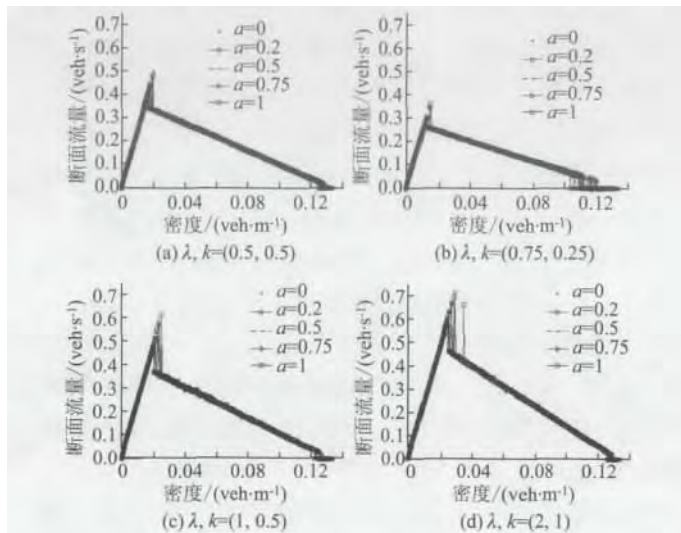


图1 仿真的 $Q-\rho$ 关系图

Fig.1 Relation of $Q-\rho$ form simulation

由图 1 可知, α 的变化对曲线形状影响较小, 而 λ, k 取值不同, 曲线形状变化较大。当 λ, k 取值相同时, 随着 α 的变化, $Q-\rho$ 曲线的大部分区域几乎重合, 只在亚稳态区域和振荡堵塞区域有些差别。 λ, k 取值不同, 曲线形状将发生显著的变化。一是可达的断面最大流量的不同; 二是振荡区域的波动程度。在图 1 中, $\lambda, k = (0.75, 0.25)$ 时, 断面可达的最大流量最小, 为 0.35 左右, 较之亚稳态区域的振荡, 振荡堵塞区域的振荡更为显著; 而 $\lambda, k = (2, 1)$ 时, 亚稳态区域的振荡更为明显, 断面可达的最大流量最大, 为 0.7 左右, 此种现象类似于高速路或城市快速路的交通流, 因为道路交通环境较为简单, 一定条件下, 所有车辆均能快速行驶, 从而可通过较高的流量。

此外, 自由流区域的斜率不会随 α, λ 或 k 的变化而有明显区别, 因为车流密度较低时, 车辆跟驰现象不明显, 前后车辆的相互影响较小, 所有车辆均能以较大速度行驶。由于 α 的变化对关系曲线形状影响甚小, 为简单起见, 后面的仿真均取 $\alpha = 1$ 。

(2) 结合试验数据的综合分析

结合广州天河 CBD 的实时交通流数据, 进行仿真结果与实际交通流的综合比较分析。试验数据采集点有 2 个: ①天河北某路口东进口直行车道, 采集时间为 11 月 8 日; ②广园东某段快速路的中间直行车道, 距离路口 400 m, 采集时间为 11 月 18 日。实际交通流的密度 ρ 不易采集, 一般以时间占有率 o 替代 [15]:

$$\rho = o \times \rho_{\text{jam}}. \quad (5)$$

如图 2 (a) 所示, 黑色曲线为 $\lambda, k = (0.5, 0.5)$ 时, 模型仿真的 $Q-\rho$ 关系曲线, 分布的散点

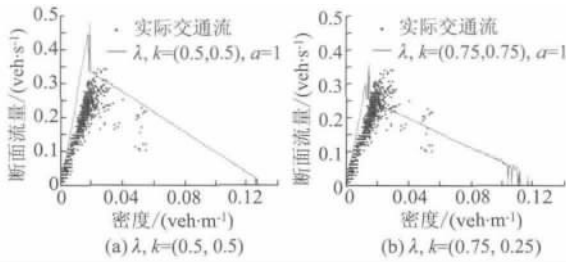


图2 与实际城市道路路口交通流的比较

Fig. 2 Comparison with traffic flow at intersection of urban road

为采集点①的1 032组实际交通流数据;而图2(b)的黑色曲线是 $\lambda, k=(0.75, 0.25)$ 时的 $Q-\rho$ 关系曲线,分布的散点同为采集点①的实际交通流数据。可见图2(a)的散点所代表的实际交通流被紧密包围在仿真的 $Q-\rho$ 关系曲线里。而图2(b)中有部分散点落在仿真的曲线之外,但自由流区域的斜率更为切合。

如图3所示,黑色曲线为 $\lambda, k=(2, 1)$ 时仿真的 $Q-\rho$ 关系曲线,分布的散点为采集点②的438组实际交通流数据,图中所有的散点分布在仿真的曲线周围,虽有小幅的波动,但也较好地拟合实际交通流。可见,CA模型仿真得到的 $Q-\rho$ 变化规律和实际交通流比较一致,适当改变R3的参数,曲线可较好地拟合城市道路和快速路的交通流。然而现实交通流的数据更为离散,因为现实中交通流的干扰因素很多,如相邻车道车辆、红绿灯、行人等影响,此外,在车型混杂的交通流中,密度和占有率的线性关系较差。

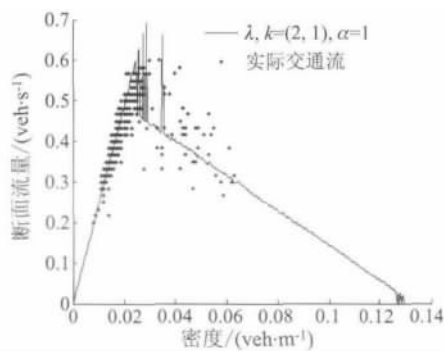


图3 与快速路交通流的比较

Fig. 3 Comparison with traffic flow on urban freeway

3.2.2 区域流量-密度图与速度-密度图

区域流量 F 是指在一段时间内,某段区域的流量。如图4所示是 λ, k 不同取值时的 $F-\rho$ 关系曲线图。从图4可知 $F-\rho$ 关系曲线与 $Q-\rho$ 关系曲线极其相似,且当 λ, k 取值不同时,相应自由流区域的斜

率一致,即在自由流阶段,区域平均速度大致相同。同样地, $\lambda, k=(2, 1)$ 时,可达的区域流量最大。

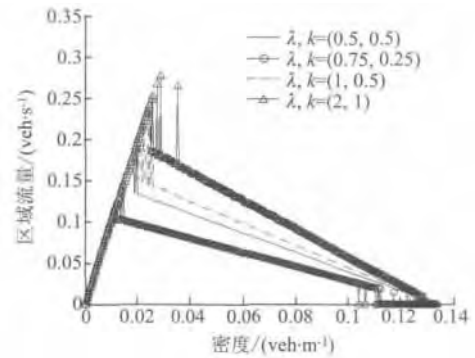
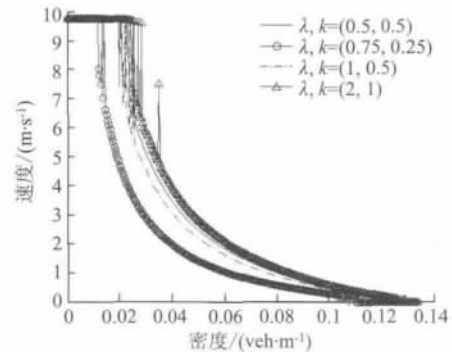
图4 $F-\rho$ 图Fig. 4 Diagram of $F-\rho$

图5所示是 $v-\rho$ 关系图,其中 v 是区域平均速度。密度很低时,即使 λ, k 取值不同,区域平均速度仍然一致,因为前后车辆的相互影响很小,所有车辆均能以很大速度行驶。在密度一定时,所有曲线均出现速度振荡区域,对应于亚稳态交通流的速度。

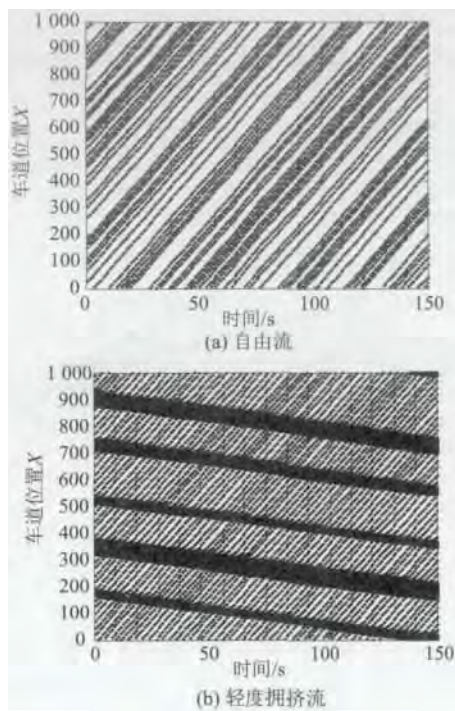
图5 $v-\rho$ 图Fig. 5 Diagram of $v-\rho$

3.2.3 时空状态图

图6是 $\lambda, k=(0.5, 0.5)$ 时的 $X-t$ 时空状态图。图中横坐标是抽取 1×10^4 s仿真时间的片段,纵坐标为车辆在车道的位置 X ,黑色点为车辆的时空序列。图6(a)为自由流行驶的片段,车道上车流顺畅,随着时间的推演车辆没有停滞地线性前进。而图6(b)为轻度拥挤流的演化过程。过程中车辆走走停停,并随着时间推演,前车运行状态改变的效应(如车辆停驶)会一辆辆往后传递,这种状态的传递具有延迟性,且状态的传递并不平滑连续。

4 结论

在对正比于速度的间距倒数线性模型和Bierley模型综合分析比较的基础上,改进得到更符合实际的跟驰模型,并进一步创建结合该跟驰模型的交通

图6 $X-t$ 时空状态图Fig. 6 Space-time Diagram of $X-t$

注：模型中，车道格式化为一排元胞空间，车道位置 X 表示车辆所在元胞空间位置。如 $X=100$ ，表示车辆行驶至第100个元胞的位置。

流 CA 模型。模型仿真得到速度差灵敏度系数 λ 、车辆间距灵敏度系数 k 和安全距离参数 α 不同值的交通流基本图和 $X-t$ 时空状态图。模型仿真结果及分析为揭示交通流运行特性及规律，进而实现交通有效控制和优化提供有力的依据。由仿真过程、结果及其分析，可得到以下结论：

(1) 产生的仿真交通流再现了交通流从自由流到小幅振荡的亚稳态，再到时走时停的拥挤，然后是振荡堵塞，以至绝对堵塞态这一动态转化过程，揭示了交通运行特性及规律。

(2) 通过试验验证，仿真得到的 $Q-\rho$ 基本图和实际交通流非常符合，且可模拟再现实际交通流的交通失稳、阻塞演化、走走停停等复杂的非线性交通流现象。

(3) 所提出的模型结合改进跟驰模型进行速度更新，很大程度地减少速度的频繁振荡。几乎所有的 CA 模型中，车辆均以 $v_{\max}$ 或趋近于 $v_{\max}$ 行驶，从而引起过多的车速骤加骤减现象，这是不现实的。

(4) 该模型基于车辆个体行为及交通流运行机理，既具有跟驰模型准确描述车辆启动和减速过程的特性，又具有 CA 模型再现实际交通流随机特性，及高效的并行计算能力。

文中建立的改进 CA 模型是在周期性单车道交通流背景下的仿真，而现实中交通流因为众多的干扰因素，如相邻车道车辆、红绿灯、行人等，会更为复杂，更为离散，今后应深入研究适用于多干扰的开口边界多车道的交通流 CA 模型，揭示更为普遍的交通流运行规律。

参考文献：

References:

- [1] 王殿海. 交通流理论 [M]. 北京：人民交通出版社，2002.
WANG Dian-hai. Traffic Flow Theory [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [2] 吴清松, 姜锐, 李晓白, 等. 微观宏观方法相结合推进交通流理论新发展 [J]. 交通系统工程与信息, 2005, 5 (3): 108-115, 126.
WU Qing-song, JIANG Rui, LI Xiao-bai, et al. Combining Macroscopic Method with Microscopic Method and Promoting New Development of Traffic Flow Theory [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2005, 5 (3): 108-115, 126.
- [3] 贺国光, 王东山. 交通流的有序运动与混沌运动相互转化现象的仿真研究 [J]. 土木工程学报, 2003, 36 (7): 53-56.
HE Guo-guang, WANG Dong-shan. Simulation Study on the Transition between Chaos and Order Motion in the Traffic Flow [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36 (7): 53-56.
- [4] WAHLE J, NEUBERT L, ESSER J, et al. A Cellular Automaton Traffic Flow Model for Online Simulation of Traffic [J]. Parallel Computing, 2001, 27 (5): 719-735.
- [5] 刘有军, 田聪. 改进的两车道交通流格子模型及扰动分析 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (11): 131-137.
LIU You-jun, TIAN Cong. Improved Two-lane Traffic Flow Lattice Model and Perturbation Analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (11): 131-137.
- [6] KOZUKA I, MATSUI Y, KANO H. Traffic Flow Simulation using Cellular Automata under Non-equilibrium Environment [C] // 2001 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Tucson, AZ: IEEE, 2001: 1341-1345.
- [7] LARRAGA M E, DEL R J A, ALVAREZ-LCAZA L. Cellular automata for One-lane Traffic Flow Modeling [J]. Transportation Research, 2005, 13 (1): 63-74.

(下转第128页)

- [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41 (8): 87-92.
- [15] 唐小勇, 王伟, 程琳. 交通网络旅行时间可靠度估计 [J]. 土木工程学报, 2007, 40 (6): 84-88.
TANG Xiao-yong, WANG Wei, CHENG Lin. Travel Time Reliability Assessment for Traffic Networks [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (6): 84-88.
- [16] 徐旭, 付蓉. 基于畅通可靠度的道路网络结构可靠度 [J]. 上海大学学报, 2012, 18 (5): 448-453.
XU Xu, FU Rong. Road Network Structural Reliability Based on Mobility Reliability [J]. Journal of Shanghai University, 2012, 18 (5): 448-453.
- [17] 徐旭, 付蓉. 道路网络结构可靠度的研究 [J]. 中外公路, 2013, 33 (1): 72-76.
XU Xu, FU Rong. Research of Reliability of Road Network Structure [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33 (1): 72-76.
- [18] 张雄飞, 李瑞敏, 李宏发, 等. 基于 Monte Carlo 的行程时间可靠性研究 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2012, 36 (4): 667-670.
ZHANG Xiong-fei, LI Rui-min, LI Hong-fa, et al. Study on Travel Time Reliability Based on Monte Carlo Method [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology: Transportation Science & Engineering Edition, 2012, 36 (4): 667-670.
- [19] 刘建荣. 基于行程时间可靠性的路网通行能力研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
LIU Jian-rong. Research on Network Capacity Based on Travel Time Reliability [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [20] 付蓉. 基于网络的路面结构可靠度及优化分析 [D]. 上海: 上海大学, 2013.
FU Rong. Analysis on Reliability and Optimization of Asphalt Pavement Structure Based on Network [D]. Shanghai: Shanghai University, 2013.

(上接第 120 页)

- [8] LO S C, HSU C H. Cellular Automata Simulation for Mixed Manual and Automated Control Traffic [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2010, 51 (7/8): 1000-1007.
- [9] 王晓原, 杨新月, 张敬磊. 交通流微观仿真与驾驶员行为建模理论及方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
WANG Xiao-yuan, YANG Xin-yue, ZHANG Jing-lei. Theory and Method of Traffic Flow Microcosmic Simulation and Driver Behavior Modeling [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [10] 李松, 贺国光. 跟驰模型的交通流混沌转化现象的仿真 [J]. 系统工程, 2005, 23 (10): 34-38.
LI Song, HE Guo-guang. Simulation on the Transition of Chaos in Traffic Flow Based on the Car-following Model. [J]. Systems Engineering, 2005, 23 (10): 34-38.
- [11] 许伦辉, 罗强, 吴建伟, 等. 基于最小安全距离的车辆跟驰模型研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (10): 95-100, 106.
XU Lun-hui, LUO Qiang, WU Jian-wei, et al. Study of Car-following Model Based on Minimum Safety Distance [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (10): 95-100, 106.
- [12] 叶丽萍, 翁小雄, 张文峰. 改进交通流元胞机模型及其安全距离参数分析 [J]. 陕西科技大学学报: 自然科学版, 2010, 28 (4): 108-112.
YE Li-ping, WENG Xiao-xiong, ZHANG Wen-feng. Cellular Automata Modeling For Urban Traffic and Safety Distance Parameter Analysis [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2010, 28 (4): 108-112.
- [13] NASSAB K, SCHRECKENBERG M, QUASKIT, et al. 1/f Noise in a Cellular Automaton Model for Traffic Flow with Open Boundaries and Additional Connection Sites [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2005, 354 (15): 597-605.
- [14] KERNER B S. Three-phase Traffic Theory and Highway Capacity [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications 2004, 333 (15): 379-440.
- [15] 贾斌, 高自友, 李克平, 等. 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
JJIA Bin, GAO Zi-you, LI Ke-ping, et al. Modeling and Simulations of Traffic System Based on the Theory of Cellular Automaton [M]. Beijing: Science Press, 2007.