

一种改进的 Nagel-Schreckenberg 交通流模型*

Investigation of an Improved Nagel-Schreckenberg Traffic Flow Model

朱留华,孔令江,刘慕仁**

ZHU Liu-hua, KONG Ling-jiang, LIU Mu-ren**

(广西师范大学物理与电子工程学院,广西桂林 541004)

(College of Physics and Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要:在 Nagel-Schreckenberg 交通流模型基础上,通过局域密度及当前车速两个参数来实现对减速概率的控制,同时考虑规则的不同运作次序可能会对系统的演化产生非凡的影响,提出一个改进的一维元胞自动机交通流模型,并进行数值模拟,将模拟结果与实测数据进行比较.结果显示,适当调节系统的相关参数,可以实现畅行相→低速同步相→宽幅运动阻塞相的转变.从系统中可以发现同步流和相分离的存在,弥补了 Nagel-Schreckenberg 交通流模型无法实现大尺度同步流的缺陷.

关键词:交通流 元胞自动机 局域密度 同步流 相变

中图分类号:O550 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2007)03-0253-04

Abstract: Based on the Nagel-Schreckenberg traffic flow model, an improved cellular automaton traffic flow model is developed by introduction of local density and current velocity to control stochastic slowdown probability. At the same time, it was considered that different evolution order will result in extraordinary effects for the system evolution. It was showed from numerical simulation that the transition from free flow to synchronized traffic flow to wide moving traffic flow can be realized via proper modification of the relevant parameters.

Key words: traffic flow, cellular automaton, local density, synchronized flow, phase transition

近年来,交通流问题由于其高度的非线性及实测中观察到的非平衡相变引起了物理学界普遍的关注,而逐渐成为当前科学研究的一个重要课题.到目前为止,在物理文献中常被讨论的交通流模型至少有以下三类^[1]:基于连续性描述的流体力学模型(Hydrodynamic Model),基于概率性描述的气体动力学模型(Gas-kinetics Model),基于离散性描述的跟车模型(Car-following Model)和元胞自动机模型(Cellular Automaton Model).其中元胞自动机模型更是一种描述非线性现象强有力的工具,同时由于交通流实际上是一个离散系统,采用本质上离散的元胞自动机来描述实际的交通现象具有独特的优越性.

最简单的元胞自动机交通流模型是 Wolfram 于 1986 年提出的 184 号规则模型^[2].在此基础上, Nagel 和 Schreckenberg 于 1992 年将 184 号规则模型推广到了最大速度大于 1 及考虑随机慢化影响的更一般的情况,提出了著名的 Nagel-Schreckenberg 模型,其基本思想是:在长为 L 的一维格点链上随机分布着 N 辆车,每个格点最多只能有一辆车,每辆车都期望以最大的速度行驶,但又不希望发生碰撞^[3]. Nagel-Schreckenberg 模型用车辆的确定性加速、确定性减速、随机减速、位置更新 4 个步骤模拟了许多实际交通现象,如时走时停交通波.以 $V_i(t)$ 、 $X_i(t)$ 和 $gap_i(t)$ 分别表示第 i 辆车在 t 时刻的速度、位置及其与前车之间的空格点数,用刹车概率 p 表示以一定的概率随机减速, V_{max} 是车辆的最大速度.

Nagel-Schreckenberg 模型的演化规则如下:

(1) 确定性加速: $v_i(t+1/3) \leftarrow \min(v_i(t)+1, V_{max})$;

收稿日期:2006-12-01

作者简介:朱留华(1974-),男,硕士研究生,主要从事交通流研究.

* 国家自然科学基金项目(10562001, 10362001, 10347001, 70371067)和广西自然科学基金项目(0447030)资助.

** 通讯作者.

(2) 确定性减速: $v_i(t+2/3) \leftarrow \min(v_i(t+1/3), gap_i(t))$;

(3) 随机减速: $v_i(t+1) \leftarrow \max(v_i(t+2/3) - 1, 0)$ 以概率 p

(4) 位置更新: $X_i(t+1) \leftarrow X_i(t) + v_i(t+1)$.

其中: $gap_i(t) = X_{i+1}(t) - X_i(t) - 1$.

虽然应用 Nagel-Schreckenberg 模型所进行的数值模拟与真实的交通行为符合得较好,但是在其流量密度基本图上却发现不了实际交通中所存在的同步流现象,此后有不少学者对这一模型进行了改进^[4],最近薛郁等人又提出了优先随机慢化模型,成功地再现了实际交通中的同步流现象^[5].

Nagel-Schreckenberg 模型的演化规则(3)引入了随机减速概率 p 来反映驾驶行为的不确定性,使得这一模型较贴近实际交通.但我们进一步观测发现:随机减速概率 p 设定为一固定的值,具有很大的局限性^[6].随机减速概率 p 往往受驾驶员视野范围内车辆密度(即局域密度)及当前车速的影响,同时考虑到规则的不同运作次序可能会对系统的演化产生非凡的影响.据此我们提出了一改进的元胞自动机交通流模型.

1 模型

借鉴文献[7]的研究经验,假设 p 与 ρ 以及当前速度 $v_i(t)$ 成指数关系,改进的 Nagel-Schreckenberg 交通流模型的演化规则如下.

(0) 确定随机减速概率: $p = \rho_i^\alpha (v_i(t)/V_{\max})^\beta$,

其中局域密度^[8]: $\rho_i = \frac{1}{\delta} \sum_{r=i+1}^{i+\delta} \eta(r)$.

这里 $\eta(r)$ 是布尔变量,假如格点被车辆占据,则 $\eta(r) = 1$,反之 $\eta(r) = 0$.

(1) 随机减速: $v_i(t+1/3) \leftarrow \max(v_i(t) - 1, 0)$ 以概率 p ;

(2) 确定性加速: $v_i(t+2/3) \leftarrow \min(v_i(t+1/3) + 1, V_{\max})$;

(3) 确定性减速: $v_i(t+1) \leftarrow \min(v_i(t+2/3), gap_i(t))$;

(4) 位置更新: $X_i(t+1) \leftarrow X_i(t) + v_i(t+1)$.

其中: $gap_i(t) = X_{i+1}(t) - X_i(t) - 1$.

采用周期性边界条件,取 $L = 5000$ cells 组成一维格点链,每个格点对应的实际道路长为 7.5m,整个格点链对应的实际道路长为 37.5km. 驾驶员的视野范围 δ 取 150m,相当于 20 个格点. 设道路上车辆总数为 N ,车辆最大速度取 $V_{\max} = 5$ cells/s,对应的实际车速为 135km/h. 其中车辆密度 ρ 、平均速度 \bar{v} 和平均

车流量 J 的计算公式如下:

$$\text{车辆密度: } \rho = \frac{N}{L}, \quad (1)$$

$$\text{车辆平均速度: } \bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(t), \quad (2)$$

$$\text{平均车流量: } J = \rho \bar{v} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N v_i(t). \quad (3)$$

2 数值模拟与分析

数值模拟时,初始时刻所有车辆以给定的密度 ρ 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 5×10^4 时步不做统计.以后 1×10^4 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. 图 1~7 中的每个点是 30 次运行的平均值.

2.1 本文模型与实测数据的比较

从图 1 可以看出本文模型在 $\alpha = \beta = 0.4$ 时的最大流量约为 2500veh/h,非常接近于图 2 所给出的加利福尼亚一条高速公路上的最大流量值(2500veh/h)^[9].图 2 中 Nagel-Schreckenberg 模型的最大流量明显偏小.由于本文模型所设定的最大速度(135km/h)大于实测的速度上限(120km/h),所以模拟得到的最大流量点的平均速度也偏大.在低密度的自由流阶段,所有车辆都以期望的速度值行驶,因此系统的平均速度大致等于最大允许速度.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,车流量则继续增加,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,在图 1 上表现为:曲线从最大流量点向速度、流量都为零的原点快速回归.

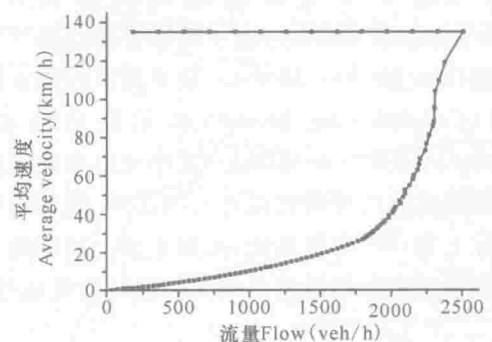


图 1 指数参数 $\alpha = \beta = 0.4$ 时,数值模拟得到的速度流量关系

Fig. 1 The relation of average velocity and flow obtained from numerical simulation ($\alpha = \beta = 0.4$)

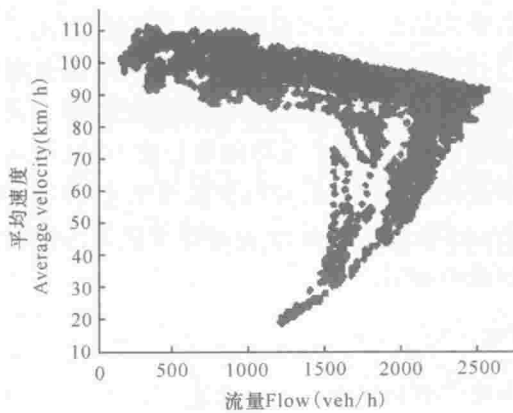


图2 加利福尼亚一条公路上实测数据得到的平均速度与车流量关系

Fig. 2 The relation of average velocity and flow obtained from a real measurement of a freeway of California

2.2 指数参数 α 与 β 对基本图的影响

从图3可以看出,随着 α 与 β 的增加,对应的随机减速概率 p 的值将减小,车流就会延迟进入拥挤状态.换句话说,随着 α 与 β 的增加,系统的临界密度将逐渐增加,相应的最大流量的值也随之提高.当 $\alpha = \beta = 0.20$ 时,系统的全局密度超过了临界点,此时系统并没有出现预料中的自由运动相与窄幅运动阻塞相的分离,而是出现了一流量平台,即流量保持一恒定的值.通过后面的时空斑图我们可以确认此时系统中开始出现同步流.

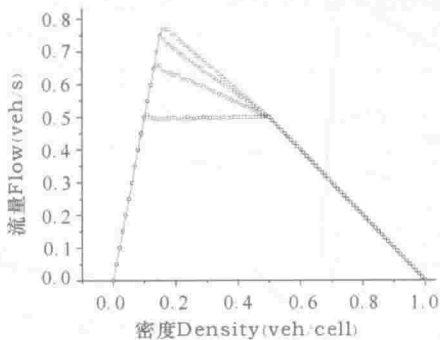


图3 不同参数条件下的基本图

Fig. 3 The fundamental diagrams for different values of parameters.

□: $\alpha = \beta = 0.2$, ○: $\alpha = \beta = 0.4$, ◇: $\alpha = \beta = 0.6$, △: $\alpha = \beta = 0.8$.

2.3 车流状态演化 ($\alpha = \beta = 0.2$)

为了具体的描述车流随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.取参数,模拟的空间位置为2100~2600,时间为50000~50400.

图4为 $\rho = 0.08$ 时的车辆位置与时间关系,此时车道上车辆密度低于临界密度,车流处于自由状

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5为 $\rho = 0.20$ 时车辆位置与时间关系,此时系统中没有出现静止的车辆,大片的灰色区域是速度和间距都为1的车辆慢速行驶区,俗称为同步流区域;图6为 $\rho = 0.50$ 时车辆位置与时间关系,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,此时的更新规则退化为184规则;图7为 $\rho = 0.60$ 时车辆位置与时间关系,此时车辆密度较大,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,位置与时间的关系是非线性的,此时系统出现低速运动相与阻塞相的分离,从而导致了交通流量的急剧下降.

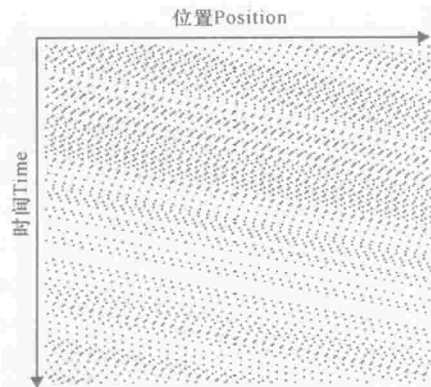


图4 $\rho = 0.08$ 时的位置与时间关系

Fig. 4 The relation diagram of position and time ($\rho = 0.08$)

黑点表示车辆,白色表示空白区域. Black dots indicate vehicles, and white indicates blank areas.

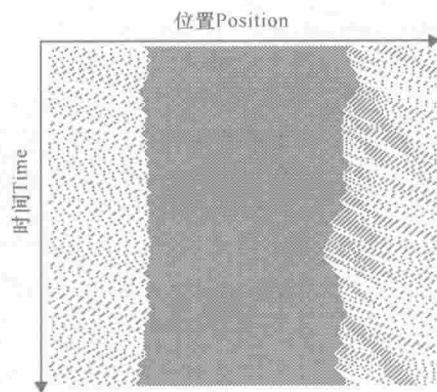


图5 $\rho = 0.2$ 时的位置与时间关系

Fig. 5 The relation diagram of position and time ($\rho = 0.2$)

黑点表示车辆,白色表示空白区域. Black dots indicate vehicles, and white indicates blank areas.

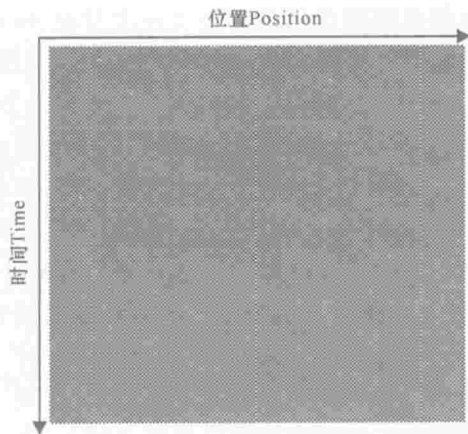


图 6 $\rho = 0.5$ 时的位置与时间关系

Fig. 6 The relation diagram of position and time ($\rho = 0.5$)

黑点表示车辆,白色表示空白区域. Black dots indicate vehicles, and white indicates blank areas.

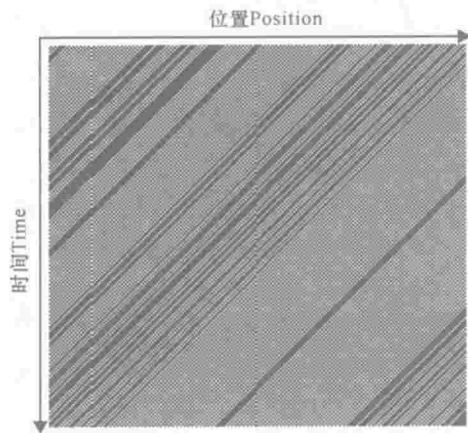


图 7 $\rho = 0.6$ 时的位置与时间关系

Fig. 7 The relation diagram of position and time ($\rho = 0.6$)

黑点表示车辆,白色表示空白区域. Black dots indicate vehicles, and white indicates blank areas.

3 结论

本文在 Nagel-Schreckenberg 交通流模型的基础上提出了一个新的一维元胞自动机交通流模型,考虑了局域车辆密度及当前车速对随机减速概率的影响,

将数值模拟结果与实测数据进行了比较,证实了该模型的可行性.当全局密度超过临界点,车流会出现与实际交通更为吻合的缓慢行驶的同步相,而不是完全的阻塞相,从而提高了道路的通行能力,同时从系统的时空演化斑图中可发现同步流和相分离的存在.弥补了 Nagel-Schreckenberg 交通流模型无法实现大尺度同步流的缺陷.

参考文献:

- [1] 刘慕仁,薛郁,孔令江.城市交通问题与交通流模型[J].力学与实践,2005,27(1):1-6.
- [2] WOLFRAM S. Statistical mechanics of cellular automaton[J]. Rev Mod Phys,1983,55(3):601-644.
- [3] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. J Phys I France, 1992,2:2221-2229.
- [4] HUANG DINGWEI. Analytical results for a threephase traffic model[J]. Phys Rve E,2003,68:1-6.
- [5] XUE YU, DONG LIYUN, LI LEI, et al. Effects of changing orders in the update rules on traffic flow[J]. Phys Rve E,2005,71:1-6.
- [6] XUE YU, CHEN YANHONG. Study on effects of the stochastic delay probability for 1D CA model of traffic flow [J]. International Journal of Modern Physics C, 2004,15(5):721-727.
- [7] 薛郁,董力耘,戴世强.一种改进的一维元胞自动机交通流模型及减速概率的影响[J].物理学报,2001,50(3):445-449.
- [8] LUBECK S, SCHRECKENBERG M, USADEL D K. Density fluctuations and phase transition in the Nagel-Schreckenberg traffic flow model[J]. Phys Rve E,1998,57(1):1171-1174.
- [9] WAGNER P. Traffic and granular flow[M]. Singapore: World Scientific,1996.

(责任编辑:邓大玉)