

恶劣天气环境下的交通流数值模拟

祝会兵

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于 NaSch 模型提出了一个改进的元胞自动机交通流模型, 旨在反映雨雪天气时道路湿滑能见度差的情况下司机驾驶车辆更加谨慎的特点. 考虑谨慎司机的不同比例, 通过数值模拟得到了一组基本图, 发现含有不同比例的谨慎司机对交通流产生不同程度的影响. 并通过车辆的时空演化图, 从微观的角度对恶劣天气时交通流的非线性特性进行了细致的分析, 揭示了在雨雪等恶劣环境下更容易出现交通拥堵的机理, 与实际交通特征相吻合. 因此模型能够部分地反映恶劣天气时交通流的微观特性, 同时也证明了司机的驾驶行为对交通拥堵的形成确实具有重要的影响.

关键词: 交通流模型; 元胞自动机; 恶劣天气; 驾驶行为; 交通拥堵

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 02-0030-05

目前交通拥堵已经成为世界性的难题, 也引起了各个领域科研工作者的广泛关注. 交通拥堵经历拥堵的形成和传播的过程, 我们知道交通拥堵可以由车辆的换道行为和各种形式的瓶颈引起, 但是交通拥堵的传播特性还不是很清楚, 还在不断的探索中. 在过去的五十多年里, 开展了大量交通拥堵方面的研究^[1-2], 最近的研究显示, 时走时停交通波是与驾驶行为直接有关^[3], 此外, Yeo 和 Skabardonis 指出交通波的振荡或许是人为因素引起的^[4]. 值得关注的是, 除了 Kerner 在模型中考虑驾驶行为与交通流动力学特性之间的关系以外^[5], 大量的交通流模型中都没有提及此点.

在交通流研究的各种方法中, 元胞自动机模型是最有效的方法之一, 自从 1992 年, Nagel 和 Schreckenberg 提出了第一个元胞自动机交通流模型——NaSch 模型^[6], 这方面的研究得到了飞速的发展, 针对不同的交通现象涌现了大量改进的元胞自动机交通流模型^[7-11].

我们知道, 实际交通是个复杂的系统, 有着各种各样的情形, 经验告诉我们仅仅考虑正常天气

时的交通情况是不全面的, 还需进一步关注恶劣天气情况下的交通特点, 比如雨雪天气, 此时司机的心理与正常天气时会有所不同. 然而, 有关雨雪天气下结合驾驶行为特征对交通流动力学进行的研究还很少.

笔者基于 NaSch 模型, 考虑雨雪等恶劣天气情况和驾驶行为的特征, 提出一个改进的元胞自动机交通流模型, 来揭示恶劣天气情况下交通拥堵传播机理, 以及驾驶行为对交通流动力学特性的影响.

1 模型的提出

在雨雪天气时, 路面一般有积水积雪, 路面附着系数降低, 附着力明显减小; 机动车的制动稳定性、转向操纵稳定性都将变差, 车辆容易打滑、跑偏, 制动距离显著延长; 同时司机的视线也会受到很大影响. 这样, 车辆的刹车距离就会增大. 为了适应这些不利因素, 许多司机驾驶车辆时会更加谨慎, 会适当增加与前车的距离.

鉴于上述原因, 笔者在新模型中考虑了以下

收稿日期: 2013-08-25.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB725404); 国家自然科学基金 (11372147); 宁波市自然科学基金 (201401A6111022); 宁波大学王宽诚基金.

作者简介: 祝会兵 (1966—), 女, 浙江宁波人, 博士/副教授, 主要研究方向: 交通流动力学. E-mail: zhuhuibing@nbu.edu.cn

三个因素: 首先, 由于恶劣天气时司机常常会减慢速度, 所以在模型中选取的最大速度为 4 以代替通常情况下的 5. 其次, 考虑司机的驾驶行为特征, 引入一个新的参数 r , 即谨慎司机的比例, 取值的大小取决于天气的恶劣程度. 另外, 在恶劣天气时, 司机往往比平时更容易减速, 因此, 取随机减速概率为 0.35, 而正常天气时常常取 0.25.

这样, 考虑恶劣天气的元胞自动机交通流模型的平行更新规则可以写成以下形式:

规则 1: 加速过程,

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

规则 2: 假设谨慎司机的比例为 r , 他们认可的安全间距为:

$$d_n \rightarrow \max(d_n - 1, 0).$$

规则 3: 为避免交通事故而采取的减速过程,

$$v_n \rightarrow \min(v_n, d_n).$$

规则 4: 概率为 p 的随机减速过程,

$$v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0).$$

规则 5: 位置更新,

$$x_n(t+1) \rightarrow x_n + v_n.$$

在 NaSch 模型的基础上, 本文模型增加了第二条规则, 反应了在恶劣天气时司机的心理和驾驶行为, 认为占比为 r 的谨慎司机会增加与前车的安全距离, 而那些心态平稳且驾驶技术过硬的司机会保持他平时的驾驶习惯. 所有车辆按照上述五项更新规则平行更新速度和位置.

2 模拟和结果

利用上述车辆更新规则开展数值模拟, 采用周期性边界条件, 取每个元胞格子的长度为 7.5 m, 格子可以是空的, 也可以被 1 辆车所占据, 并且模拟的道路长度取为 $L = 1000$, 对应于真实的道路长度 7 500 m. 1 个时间步长相当于 1 s 时, 这正好与人们的反应时间相当. 考虑到雨雪天气的影响, 取最大车速为 $v_{\max} = 4$, 这个极限速度对应于城市里的典型车速为 $108 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 车辆的速度值就在 0 与这最大速度之间取值. 而车辆的初始位置和速度都是随机分布的.

数值计算中用到的计算公式为:

$$J = \rho \cdot v, \quad (1)$$

式中, J 为平均流量; ρ 为总体车辆密度; v 为平

均速度. 而 ρ 和 v 分别表示如下:

$$\rho = N / L, \quad (2)$$

$$v = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{T+t_0-1} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n(t), \quad (3)$$

式中, N 为分布在所选路段上的车辆数; $v_n(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻的速度; T 为所选样本的总时间长度.

在数值计算过程中, 每次运行取 2×10^4 (指数 4 改成 5) 时间步进行数值模拟, 为了消除暂态影响, 前 1×10^4 (指数 4 改成 5) 时间步的结果不纳入统计计算中. 样本数取 30, 即基本图上的每个点都是 30 次运行后的平均值.

图 1 给出了雨雪环境下含有不同比例的谨慎司机时的基本图, 同时也给出了由 NaSch 模型得到的基本图, 即曲线 “curve1” 和 “curve2”, 分别表示最大速度为 5 和 4 时的情形, 为了便于比较, NaSch 模型与新模型一样, 随机减速概率都取为 0.35.

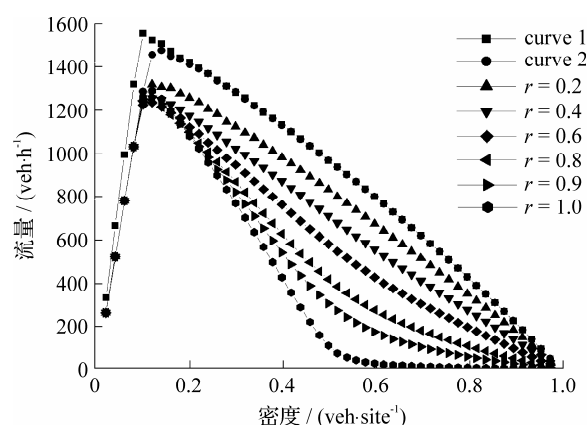


图 1 恶劣天气和正常天气时交通流的基本图

从曲线 “curve1” 和 “curve2” 中可以看到, 在密度较小的区域, 流量随着密度的增加而增加, 直达到最大值, 同时这 2 条曲线不互相重合. 最大值较大的那条曲线对应于最大速度是 5 的情形. 随着密度的进一步增大, 流量随之减小, 这 2 条曲线也互相重合. 这些现象分别表明, 最大速度的大小仅仅影响到了小密度区域的流量; 当密度增大时, 产生了交通拥堵, 车辆之间的影响和干扰也同时加剧, 因此, 车辆已不能达到最大速度, 使得最大速度分别为 4 和 5 的交通流得到的流量-密度关系几乎一致.

接着来研究雨雪天气时的基本图. 图 1 中从上往下第 3 条曲线开始, 依次表示谨慎司机的比例 r 为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9 和 1.0 时的情形, r 值越大, 表明谨慎司机的人数越多, 而谨慎司机碰到湿滑的路面和较差的能见度时, 往往增大车间距以避免发生交通事故.

对图 1 进行进一步分析后还可以看到, 密度较小的时候, r 从 0.2 增大到 1.0, 流量随密度的变化情况几乎相同, 曲线都互相重合, 并且与最大速度为 4 的 NaSch 模型重合. 这个现象表明, 在自由流阶段, 谨慎司机的存在对交通流的影响很小. 随后, 流量达到峰值, 但比正常天气时的峰值要小. 随着密度的进一步增大, 对应于不同 r 值的流量变化呈现出很大的不同, 尤其是在密度比较大的区域 ($0.4 < \rho < 0.8$), r 值越大, 流量随密度增加而下降的速度越快, 同时还发现, 当 $r \leq 0.4$ 时, 曲线的走

势与 NaSch 模型相同, 即向上突. 但是, 当 $r \geq 0.6$ 时, 曲线呈现出向下凹, 并且 r 值越大, 凹得越厉害, 表明当谨慎司机增加时, 流量下降迅速, 交通拥堵现象更加严重. 当所有司机都表现出谨慎, 即 $r = 1.0$ 时, 密度达到 0.6 时流量已几乎为 0, 表示此时交通已全线瘫痪.

为了深入了解交通流的动力学特征, 对车辆的时空演化规律进行了研究. 图 2 即为新模型在密度为 0.1 时车辆的时空演化斑图, 图 2(a) 是在雨雪天气时获得, 谨慎司机的比例设定为 0.8, 图 2(b) 图是在正常天气时获得的时空斑图.

从图 2(b) 中可以看到, 车辆的轨迹线除了一些小小的波动几乎是顺直的, 而这些小波动随后也马上消失了, 说明正常天气在密度为 0.1 时, 道路上没有交通拥堵. 从图 1 的密度-流量关系中也就可以看到, 正常天气在 0.1 密度时, 流量还处于上升

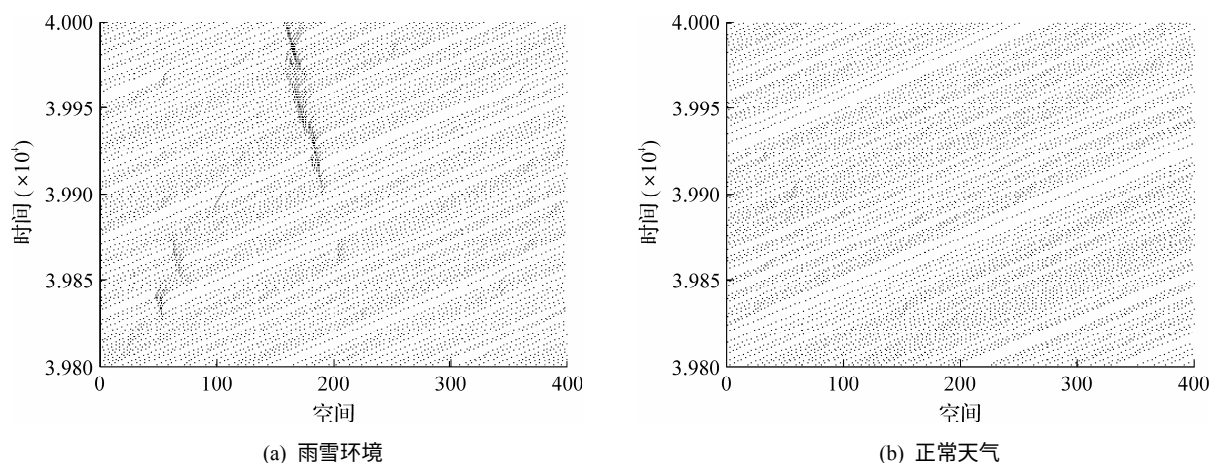


图 2 密度为 0.1 时, 由新模型得到的车辆时空演化图

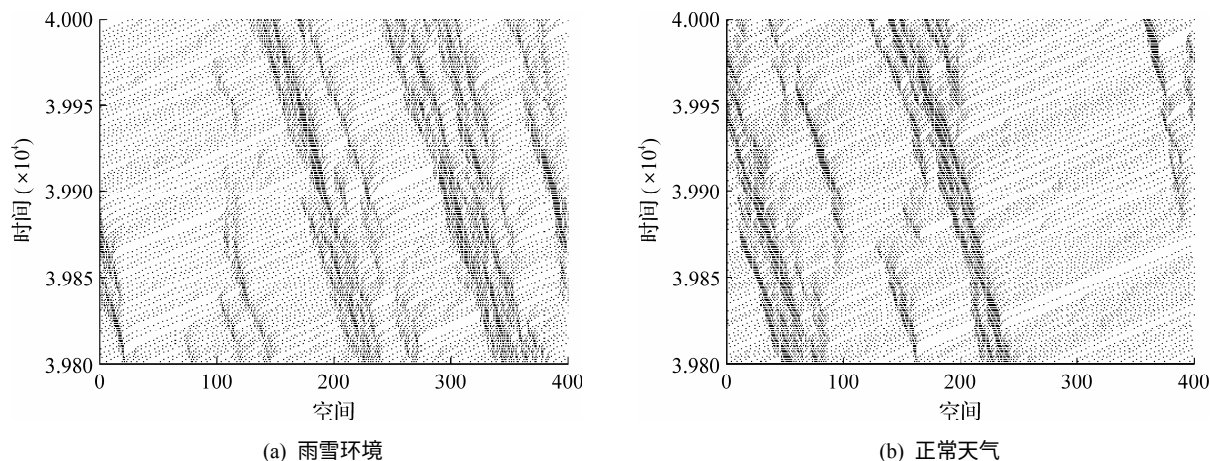


图 3 密度为 0.2 时, 由新模型得到的车辆时空演化图

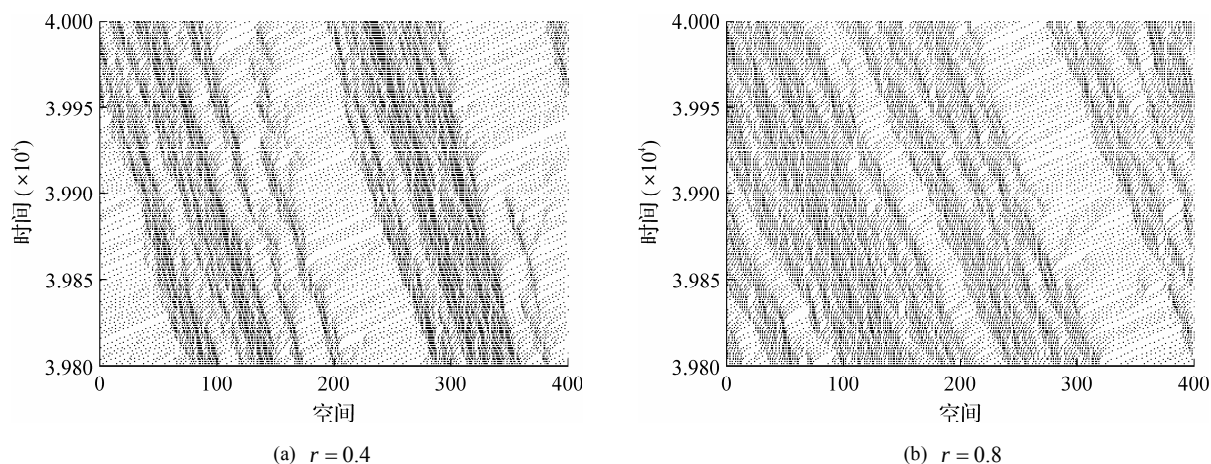


图4 密度为0.3时, 雨雪环境下的车辆时空演化图

阶段, 因此, 车辆之间的相互作用很微弱, 大部分车辆可以按照自己的意愿行驶。但是, 从图2(a)中可以看到一些自发的交通拥堵, 说明在雨雪天气时, 即使密度为0.1, 道路上已出现了时走时停波了。从基本图(图1)中可见, 此时流量已接近峰值, 因此车辆之间的相互影响已不可忽视, 以至于交通拥堵时有发生, 这得归结于司机在雨雪天气时比较谨慎。

接着比较当密度为0.2时新模型与NaSch模型的时空演化图, 图3(a)显示的是雨雪天气时的情形, 图3(b)显示的是正常天气时的情形。从图中可以很清楚地看到, 在上述两种情况下, 都已经出现车辆的成簇现象, 自由流被这些成簇的车辆分割开来, 出现了相分离和时走时停交通波, 使得车辆减速、流量下降。但是, 同时还能发现在雨雪天气时, 这种成簇现象更为普遍, 如果说在正常天气0.2密度时的道路上偶有成簇车辆, 那么在雨雪天气时交通拥堵已经遍布整条车道。从基本图(图1)上可以看到, 当密度为0.2时, 正常天气时的车流量是每小时1400辆, 而雨雪天气时只有1100辆。也就是说在恶劣天气情况下, 每小时的流量要下降300辆, 表明恶劣天气下更易出现交通拥堵。

最后, 需弄清在相同的密度下, 当谨慎司机的比例不同时交通流的情况会如何。

图4给出了密度为0.3时雨雪环境下的车辆时空演化图, 图4(a)和图4(b)分别对应于 $r=0.4$ 和 $r=0.8$ 的情况, r 是谨慎司机所占的比例。我们发现, 当 $r=0.4$ 时, 道路上已出现了一系列的交通拥

堵; 当 r 值继续增大, 达到0.8时, 车辆成簇的现象更加频繁, 说明谨慎司机的比例越大, 越容易引发交通拥堵, 这与交通流的基本图(图1)相吻合, 也与恶劣天气时的实际交通状况相一致。

3 结论

基于NaSch模型, 提出了一个修正的元胞自动机交通流模型来模拟司机在湿滑、能见度差的道路上行驶时更加谨慎的特点。模拟得到的交通流基本图显示, 谨慎司机的存在使某个特定的密度区域内的流量降低; 车辆的时空演化图表明, 雨雪天气时比正常天气情况下更容易引发交通拥堵, 并且谨慎司机所占的比例越高, 交通拥堵就越严重。可以看到, 司机的驾驶行为特征对交通拥堵机理有很大的影响, 这与实际交通现象相符合。因此, 笔者提出的新模型部分地反应了雨雪环境中交通流的微观特性。

参考文献:

- [1] Bando M, Hasebe K, Nakayama A, et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation[J]. Phys Rev E, 1995, 51(2):1035-1042.
- [2] Chowdhury D, Wolf D E, Schreckenberg M. Particle hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: Effects of lane changing rules[J]. Physica A, 1997, 235:417-439.
- [3] Jorge A L, Ludovic L. A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic[J]. Phil Trans R Soc A, 2010, 368:4519-4541.

- [4] Yeo H, Skabardonis A. Understanding stop-and-go traffic in view of asymmetric traffic theory[C]//Lam W, Wong S C, Springer H L. 18th Int Symp Traffic Theory and Transportation, Hong Kong, China, 2009:99-116.
- [5] Kerner B S. The physics of traffic[M]. Germany, Berlin: Springer Presses, 2004.
- [6] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. J Phys I, 1992(2):2221-2233.
- [7] Jiang Rui, Hu Maobin, Jia Bin, et al. Enhancing highway capacity by homogenizing traffic flow[J]. Transportmetrica, 2008(4):51-61.
- [8] Zhu Huibing. Numerical study of urban traffic flow with dedicated bus lane and intermittent bus lane[J]. Physica A, 2010, 389:3134-3139.
- [9] Zhu Huibing., Ge Hongxia, Dong Liyun, et al, A modified NaSch model with density-dependent randomization for traffic flow[J], The European Physical Journal B, 2007, 57:103-108.
- [10] Zhu H B, Lei L, Dai S Q. Two-lane traffic simulations with a blockage induced by an accident car[J]. Physica A, 2009, 388:2903-2910.
- [11] 祝会兵, 何红弟, 徐永实. 信号灯控制下的交通流数值模拟[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2011, 24(4):87-91.

Numerical Simulation of Traffic Flow in Inclement Weather Condition

ZHU Hui-bing

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on the NaSch model of traffic flow, a modified cellular automaton traffic model is proposed. The model is attempted to reflect the characteristics of discreteness found in vehicle drivers under rain or snow weather condition. In the modeling process, the special driving condition of wet, slippery road and poor visibility are taken into account. The fundamental diagrams of traffic flow are obtained based on the numerical simulation, in which different percentage of discreet drivers is sampled. It is found that the percentile value of discreet drivers has effect on the traffic flow. By presenting the spatial-temporal profiles, the nonlinear properties of traffic flow in the inclement weather condition are analyzed thoroughly. It can be noted that traffic jams occur more frequently in rainy or snowy weather. It is in agreement with the actual traffic characteristics, so the presented model can also partly describe the microscopic characteristics of traffic flow in the inclement environment. The results demonstrate that the driver behavior has significant effect on the occurrence of traffic congestion.

Key words: traffic model; cellular automaton; inclement weather condition; driving behavior; traffic congestion

(责任编辑 章践立)