

信号灯控制下的交通流数值模拟

祝会兵¹, 何红弟², 徐永实¹

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 上海海事大学 物流航运中心, 上海 200135)

摘要: 为研究信号灯控制下的交通流特性, 利用先前提出的一个改进的 NaSch 模型对信号灯控制下的单车道交通流进行了建模和模拟, 模型中考虑了司机和车辆的敏感性. 模拟得到的流量-密度图包括 3 个不同的密度区域, 即畅通交通、饱和交通和拥挤交通. 结果显示: 当信号周期 T 小于某个值时, 饱和流量随着 T 的增大而增大, 这与大多数微观模型的模拟结果不同. 随后通过车辆演化时空图分析了其中的微观机理, 得出司机和车辆的敏感性对流量的变化起着重要的作用. 同时对交通拥堵特性也进行了研究, 表明当处于饱和交通时, 信号灯不仅会引起局部拥堵, 还会对整体交通造成影响.

关键词: 交通流; 信号灯; 元胞自动机; 交通拥堵; 数值模拟

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2011) 04-0087-05

近年来, 交通问题已经引起众多科学工作者的广泛关注^[1-6], 而交通拥堵是交通流复杂特性的一个集中体现. 人们通过建立交通流模型来研究交通拥堵现象, 如元胞自动机模型、车辆跟驰模型、气体动力论模型和流体力学模型, 通过这些模型的理论分析和数值计算, 不仅对这些模型本身的特点有了深入的了解, 同时也对日常观察到的交通现象有了更好的认识.

城市道路交叉口将道路互相联系起来构成路网, 是多向交通流集中的地方, 交叉口的交通运行状况直接影响到整个路网的效率, 而交通信号灯是管理交叉口交通运行的重要工具, 通常在交通信号灯的控制下, 交通流量都会有所增加. 基于它的重要性, 对交通信号灯控制的研究就从没有停止过, 在过去的几年中出现了大量的信号控制模型^[7-9]. 基本上可以分为两大类, 一类是针对处于自由流的交通, 这时车辆可以按照理想的速度行驶且没有出现拥堵; 另一类是针对拥挤交通, 这时出现了排队的车辆且不能完全疏散. 但是从自由流交通向拥挤交通的转变过程及其其中蕴含的动力学原理还有待进一步探讨, 这对于揭示大城市

高峰时段的交通流拥堵原因显得尤为关键.

黄定维^[10]和 Sasaki^[11]分别用元胞自动机模型和理想速度的车辆跟驰模型研究了这个问题, 他们都发现饱和流量不依赖于信号灯周期和控制策略. 姜锐等人^[12]用速度梯度连续模型研究了信号灯控制下的交通流, 他们得到了相反的结论, 饱和流量随着信号周期的增加而减少. 那么到底饱和流量与信号周期之间存在着怎样的关系呢?

在此笔者基于先前提出的一个修正的元胞自动机模型^[6]模拟了单车道上信号灯控制下的交通流, 揭示了信号灯控制下交通流的特性, 分析了司机和车辆的敏感性对交通流的影响; 并通过数值模拟, 得到了一些有意义的结论.

1 模型的提出

在提出信号灯模型之前, 简单描述一下我们提出的一个修正的 NaSch 模型, 即 DDR 模型^[6], 它是信号灯模型的基础. 在这个模型中, 认为随机减速概率 p 不再是 1 个常数, 而是依赖于密度的变化而变化, 其定义为:

$$p_n = (\rho_n)^r, \quad (1)$$

其中, p_n 为第 n 辆车的随机减速概率; ρ_n 为前一时刻的局部车辆密度, 可以表示为 $1/(d_n + 1)$; d_n 为当前车的车头间距, 可表示为 $d_n(t) = x_{n+1} - x_n - 1$. r 表示 ρ_n 与 p_n 之间关系的正指数, 在 DDR 模型中取值 1~10 以保证随机概率的值大小适中. 这样, 当前时刻车辆的运行状态可以通过前一时刻车辆的运行状态并行更新得到, 就像在 NaSch 模型中一样.

数值模拟的结果显示, DDR 模型能够揭示交通流的重要特征, 如均匀流、亚稳态、回滞现象和高密度区域的分相, 因此该模型是合理和符合实际的.

基于 DDR 模型的信号灯模型的平行更新规则定义如下:

第一步, 随机减速概率的确定: $p_n = (\rho_n)^r$.

第二步, 加速: $v_n \rightarrow \min(v_n + 1, v_{\max})$.

第三步, 由于信号灯或其他车辆引起的刹车:

情形 1. 当前车辆的前方是红灯:

$$v_n \rightarrow \min(v_n, d_n, s_n);$$

情形 2. 当前车辆的前方是绿灯:

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

第四步, 以随机的减速概率 p 减速: $v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0)$.

第五步, 位置更新: $x_n(t+1) \rightarrow x_n + v_n$.

这里, v_n, x_n 分别表示第 n 辆车的当前速度和位置; s_n 是第 n 辆车与前方信号灯的间距; d_n, p_n, ρ_n 和 r 的定义同前, 文中 r 取值为 2.5.

由于在 DDR 模型中随机减速概率 p_n 是依赖于前一时间步的局部密度, 因此在模型中考虑了车辆的反应延迟, 这是符合实际交通情况的, 因为人们普遍认为来自于司机的反应延迟和车辆的运动延迟是不可避免的.

此外研究还发现, 交通网络中信号灯周期的最优选择问题可以化解为只含有 1 个信号灯的单条马路上同步信号灯的优化问题^[7]. 因此为了简便起见, 我们就对只含有 1 个交通信号灯的单车道马路进行研究. 假设整条马路有 L 个元胞格子, 采用周期性边界条件, 仅仅考虑沿一个方向运行的一种类型的机动车, 信号灯位于道路的末端且不占格子. 信号灯的设置规则是假定红绿灯的时间间隔相等, 都是 $T/2$, 而 T 为信号周期, 这里忽略黄灯

的时间.

2 数值模拟和分析

在数值模拟中, 为了保持与 NaSch 模型的一致性, 取每个元胞格子的长度为 7.5 m, 最大车速为 v_{\max} , 当 1 个时间步相当于 2 s 时, 这个极限速度对应于城市里的典型车速为 $67.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 车辆的速度值就在 0 与这最大速度之间取值. 我们模拟的道路长度取为 $L = 1000$, 也就是说, 2 个相邻信号灯的间距是 1000, 这对应于真实的道路长度 7500 m. 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:

$$J = \rho v, \quad (2)$$

其中, 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:

$$\rho = N / L, \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{T+t_0-1} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n(t), \quad (4)$$

其中, N 为分布在所选路段上的车辆数; $v_n(t)$ 为车辆 n 在时刻 t 的速度; T 为所选样本的时间间隔. 在数值计算过程中, 每次运行取 2×10^4 时间步进行数值模拟, 为了消除暂态影响, 前 1×10^4 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 给出了信号灯控制下的流量-密度曲线(实线), 从下往上的曲线对应的信号周期为 20, 60, 120, 180, 240 个时间步长, 即红绿灯转换的时间间隔是 10, 30, 60, 90, 120 个时间步长; 虚线表示没有信号灯时的基本图, 作为对比. 图 1(a)是基于 DDR 模型得到的流量-密度关系, 取 $r = 2.5$; 而图 1(b)是基于 NaSch 模型得到的流量-密度关系, 取 $p = 0.25$. 可以发现, DDR 模型的基本图与 NaSch 模型的基本图有很大的不同. 文献[6]对 DDR 模型进行了深入的研究, 得到了一些有意义的结论, 尤其是该模型能够呈现亚稳态和均匀流.

在图 1(a)和图 1(b)中都显示了相似的流量平台, 也就是出现了不依赖于密度的流量区域. 图中显示, 当密度比较小的时候, 流量随着密度的增加而增加, 此区域通常被称之为不饱和交通^[8], 在这里, 车辆可以自由地前行, 在信号灯前面也不会有太多的聚集现象. 当密度高于第 1 个临界密度时, 流

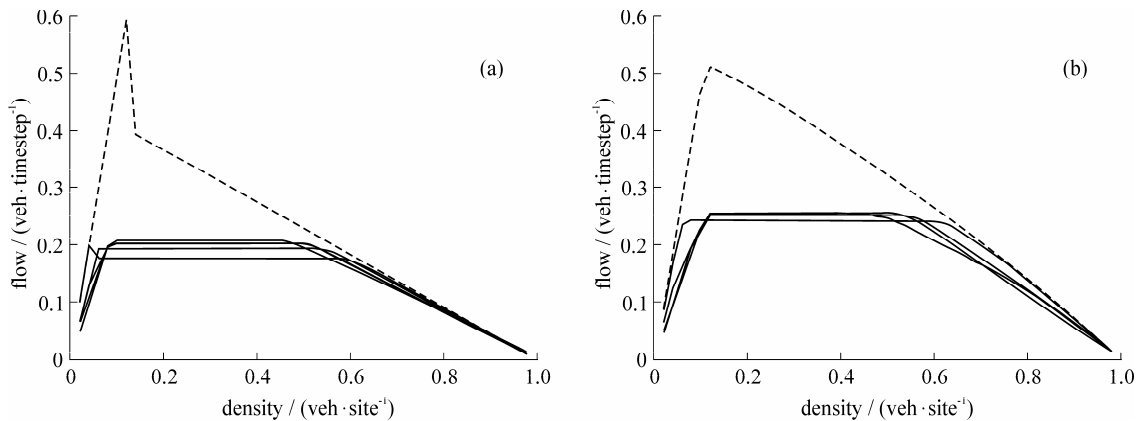


图 1 不同信号周期时的基本图

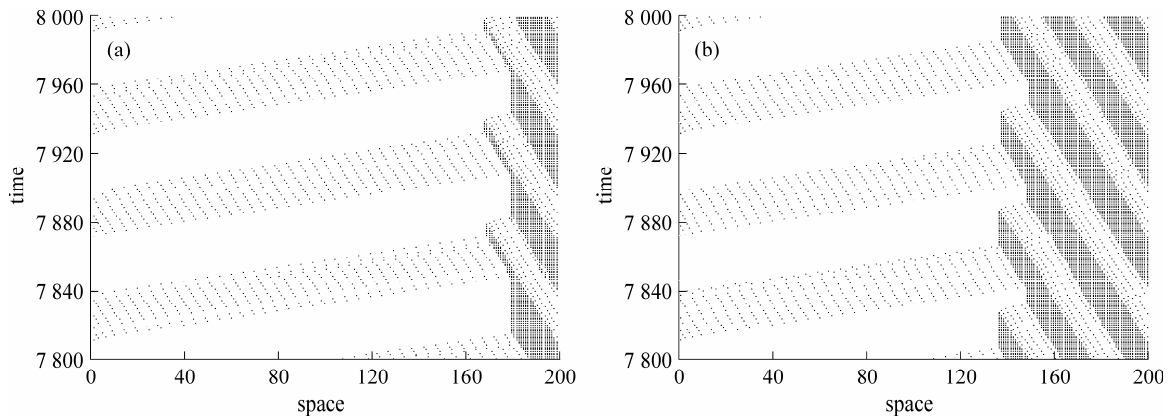


图 2 基于 DDR 模型的信号灯控制下交通流的时空演化图

量呈现出饱和状态, 曲线随着密度的进一步增加出现一个平台, 也就是这时的流量不再依赖于密度, 这个区域一般被称之为饱和区域. 也就是说, 信号灯会对整个交通流产生总体的影响, 当总密度超过某个数值时, 聚集的车辆导致了稳定的相分离, 使交通流在低密度和高密度区域之间呈现出宏观的相变. 然后, 当密度进一步增加并超过了第 2 个临界密度值, 流量就随着密度的增加而直线下降, 这个区域通常称之为过饱和区域; 在这个密度区域中, 信号灯前局部密度的增加已不能弥补速度的降低而使流量增加. 然而这个结果也是意料之中的, 因为当信号灯是红色时它就相当于一个路障, 就像道路上的交通瓶颈一样. 另外我们发现, 不管是在图 1(a)还是图 1(b)中, 临界密度都会随着信号周期而变化.

但是, 基于 DDR 模型与基于 NaSch 模型的信号灯模型还是存在不同. 首先, 基于 DDR 模型的信号灯控制下的饱和流量(图 1(a))低于基于 NaSch 模型的饱和流量(图 1(b)); 其次, 在图 1(a)中, 当信

号周期小于 120 时, 即红灯和绿灯的周期都是 60 时, 饱和流量随着信号周期的增加(或减少)而增加(或减少); 当信号周期大于 120 时, 饱和流量的大小就基本不变了, 而一般的信号周期不会达到这么大的值; 而在图 1(b)中, 饱和流量基本上与信号周期无关, 不同信号周期时的饱和流量曲线几乎重合.

为了对第一个不同点背后的动力学原理有更深入的了解, 需着手研究它们的微观机理.

首先, 来研究基于 DDR 模型的信号灯控制下的交通流流量在饱和阶段的时空演化图(图 2). 为图形清晰, 我们截取信号灯前长度为 200 的路段来分析. 这里信号周期 $T = 60$, 即红灯信号和绿灯信号间隔都是 30, 相当于 60 s. 图 2(a)中的密度 $\rho = 0.1$, 图 2(b)中的密度 $\rho = 0.2$. 从图 2(a)和图 2(b)的比较中可以发现, 随着密度的增加, 车辆拥堵区域的宽度越来越大, 而能够保持车辆自由运行的区域在缩小. 同时当密度增加的时候, 不但在信号灯前面出现了排队的车辆, 拥堵的区域还会向后

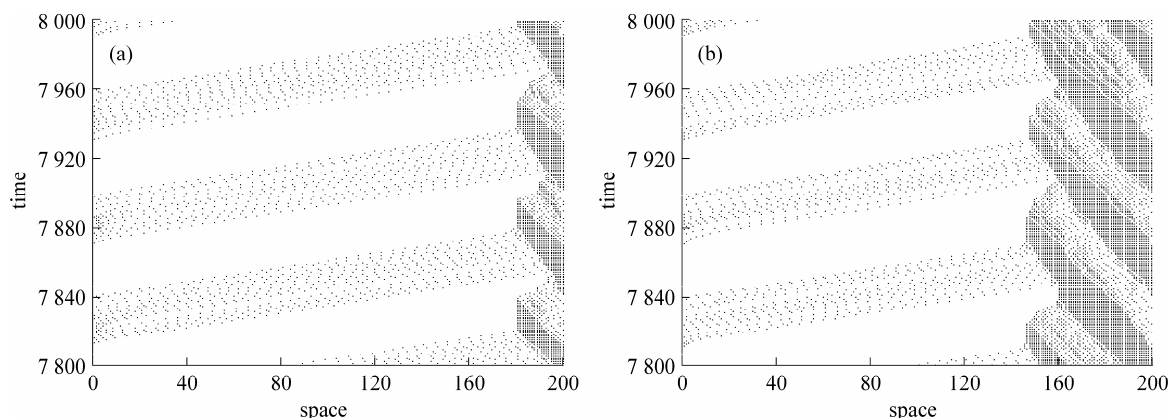


图3 基于 NaSch 模型的信号灯控制下交通流的时空演化图

传播,也就是说,信号灯不仅能产生局部的拥堵,而且会对交通流产生总体的影响.另外还可以看到高密度与低密度区域之间的相分离现象,一些车辆由于局部的高密度而不能保持理想的车速,导致刹车,这种速度的波动以及车辆之间的相互影响致使有些车辆停下来,以至于产生了拥堵现象,自由流区域被这些拥堵区域分隔开来,这也是在基本图中出现平台的部分原因.不过在远离信号灯的地方还是可以看到自由流区域.

为了比较,图3展示了基于 NaSch 模型的信号灯控制下的交通流流量在饱和阶段的时空演化图,同样取信号周期 $T=60$,密度分别取 $\rho=0.1$ (图3(a))和 $\rho=0.2$ (图3(b)).可以看到与图2中类似的车辆拥堵和相分离现象,但是也存在着区别,图2中显示的在信号灯前面由于车辆的集簇导致的交通拥堵要比图3中显示的严重得多,这正是在基本图中反应出来的基于 DDR 模型的饱和流量小于基于 NaSch 模型的饱和流量的原因.

最后,我们来考察一下基本图中表现出来的第二个不同点,即在我们的模拟中,饱和流量随着信号周期的增加(或减少)而增加(或减少),而基于 NaSch 模型的信号灯控制下的饱和流量不随信号周期的变化而变化,就像大多数的微观模型的模拟结果一样^[10-11].姜锐等人^[12]在基于速度梯度连续模型的研究中发现,当信号周期小于某个数值时,饱和流量随着信号周期 T 的增加而减少,他们认为这个区别是因为他们在模型中考虑了司机敏感度的不同,而在其他微观模型中没有考虑这一点.我们的结果部分地验证了他们的猜测,因为 DDR 模型也考虑了司机和车辆的敏感度,只是饱

和流量的变化趋势与姜锐等人的结果正好相反.但是,两种结果都表明了,不管是微观的角度还是宏观的角度,司机和车辆的敏感度在饱和流量的变化中都起着重要的作用.

3 结语

利用一个修正的 NaSch 模型(DDR 模型)研究了在信号灯控制下单车道交通流的特性,模型中考虑了司机和车辆的反应延迟.数值模拟结果显示,这个信号灯模型能够部分地反应出信号灯控制下交通流的特性,在流量-密度图中显示了3个不同的区域,即自由流区域、饱和区域和过饱和拥堵区域.通过对基于 DDR 模型和 NaSch 模型的信号灯控制下交通流的基本图的比较,发现了一些区别,通过比较车辆时空演化图,我们发现在饱和流动区域信号灯不仅可以产生局部的交通拥堵,还会对交通流产生整体的影响,按照我们提出的模型,在信号灯前集簇的车辆引起的拥堵比基于 NaSch 模型得到的结果严重得多,这正是在基本图中反应出来的基于 DDR 模型的饱和流量小于基于 NaSch 模型的饱和流量的原因.另外,在流量-密度图中显示,当信号周期小于某个数值时,饱和流量随着信号周期的增加而增大,这有别于其他大多数微观模型的数值计算结果.分析表明,司机和车辆的敏感度对饱和流量的变化有重要的影响.

参考文献:

- [1] 田欢欢,薛郁,康三军,等.元胞自动机混合交通流模型的能耗研究[J].物理学报,2009,58(7):4506-4513.
- [2] 王永明,周磊山,吕永波.基于弹性安全换道间距的元胞自动机交通流模型[J].系统仿真学报,2008,20(5):

- 1159-1162.
- [3] Chowdhury D, Santen L, Schadschneider A. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems[J]. Phys Rep, 2000, 329:199-329.
- [4] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. J Phys I (France), 1992, 2:2221-2233.
- [5] Zhu Huibing. Numerical study of urban traffic flow with dedicated bus lane and intermittent bus lane[J]. Physica A, 2010, 389:3134-3139.
- [6] Zhu Huibing, Ge Hongxia, Dong Liyun, et al. A modified NaSch model with density-dependent randomization for traffic flow[J]. Eur Phys J B, 2007, 57:103-108.
- [7] Brockfeld E, Barlovic R, Schadschneider A, et al. Optimizing traffic lights in a cellular automaton model for city traffic[J]. Phys Rev E, 2001, 64(5):56132-56143.
- [8] Jiang R, Wu Q S. A stopped time dependent randomization cellular automata model for traffic flow controlled by traffic light[J]. Physica A, 2006, 364:493-496.
- [9] 梅超群, 黄海军, 唐铁桥, 等. 信号灯和公交车站对 T 形路口交通流的影响研究[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1497-1503.
- [10] Huang Dingwei, Huang Weineng. Traffic signal synchronization[J]. Phys Rev E, 2003, 67(5):56124-56130.
- [11] Sasaki M, Nagatani T. Transition and saturation of traffic flow controlled by traffic lights [J]. Physica A, 2003, 325: 531-546.
- [12] Jiang Rui, Wu Qingsong. The traffic flow controlled by the traffic lights in the speed gradient continuum model[J]. Physica A, 2005, 355:551-564.

Numerical Simulation of Light Controlled Traffic Flow

ZHU Hui-bing¹, HE Hong-di², XU Yong-shi¹

(1.Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

Abstract: In order to investigate the properties of light controlled traffic flow, the traffic flow on a single-lane roadway is studied based on a modified NaSch model proposed by the authors, in which the sensitivity of drivers and vehicles have been taken into account. The flow-density diagrams are obtained and three regions with different traffic density, i.e., the undersaturated traffic, the saturated traffic and the oversaturated traffic, are observed. It is shown that the saturated capacity increases with the increase of cycle time T when T is less than a certain value. This result is different from most microscopic simulations. Then the underlying mechanism is analyzed by taking a deeper probe into the microscopic structure, and the spatial-temporal profiles are described on the basis of the numerical simulation. It is found that the sensitivity of drivers and vehicles plays an important role in the capacity variance. Also the jam transition is investigated, which indicates that traffic lights not only cause the local jam, but also have global effect on the traffic flow when the traffic is in the saturated region.

Key words: traffic flow; traffic lights; cellular automaton; jamming transition; numerical simulation

(责任编辑 章践立)