

基于微观变量的交通流算法研究

卫小伟 巨永锋

(长安大学电子与控制学院 西安 710000)

摘要 中国城镇化发展迅速,伴随而来的城市交通状况也日益恶化,早日建成现代化的交通运输系统和交通信息管理系统成为了城市交通战略的首要任务。寻找能够正确描述交通流基本规律的交通流算法,更好地指导局部交通的优化管理和控制,是交通流研究的期望目标。基于微观变量和元胞自动机理论提出交通流算法模型。通过对微观交通流算法的设计及数值模拟,预测理想的交通流及出行分布情况,从而加深了对交通流中各种现象内在机理的认识,使其可以预测出最接近实际情况的交通流,为交通流的仿真和实时交通控制做了基础性的工作。

关键词 微观交通流模型,元胞自动机模型,双通道决策模型

中图分类号 F407.67 **文献标识码** A

Algorithm for Traffic Flow Based on Micro-variables

WEI Xiao-wei JU Yong-feng

(School of Electronics and Control, Chang'an University, Xi'an 710000, China)

Abstract With rapid development of urbanization in China, traffic condition has become even worsening, therefore, it is the primary task of the urban transport strategy to build up the modern transportation systems and traffic information management system earlier. It is desired aims of traffic flow research to find out the algorithm for traffic flow which could properly represent the fundamental laws of traffic flow so as to better guide the management and control of optimizing local traffic. Based on the theories of micro-variables and cellular automaton, the model of algorithm for traffic flow was put forward, after designing and numerically modeling the algorithm for traffic flow, the paper predicted the ideal traffic flow and trip distribution situation, deepened the understanding of the internal mechanism of traffic flow in various phenomenon and predicted the most actual situation of traffic flow and made fundamental work for traffic flow simulation and real-time traffic control as well.

Keywords Micro-traffic flow model, Cellular automaton model, Dual-route decision-making model

1 研究交通流的意义

交通流理论是基于应用数学、动力学、交通工程等多学科的交叉研究,使人们对多体系统远离平衡态时演变规律的认识更加深入。建立能够正确描述交通流基本规律的交通流模型,更好地优化城市交通管理与控制,是研究交通流的重要价值。

现今,由于城市的大规模发展,早日建成现代化的交通运输系统和交通信息管理系统成为了首要任务。中国城镇化发展迅速,城市规模也在不断扩大,伴随着城镇化进程的加剧,城市人口和私家车数量的高速增长,与城市落后的交通系统的矛盾在不断加剧。仅仅依靠道路修建,并继续沿用传统交通管理模式来解决城市交通的新问题,根本达不到良好的效果。所以,能够建立适合中国交通实际情况的交通流模型,对缓解城市交通拥堵及伴生的环境、安全等问题有着非凡的意义。

2 交通流模型分析

非线性学和统计物理学的高速发展,尤其是一些新理论的提出,极大地促进了交通流系统的研究。交通流的模型主要包括:宏观连续模型、微观跟驰模型、介观气体动理论模型、元胞自动机模型。我们主要研究宏观交通流模型和微观交通流模型。

2.1 宏观交通流模型

在宏观交通流模型中,主要考虑车辆集体的综合平均行为。车辆的平均速度 $V(x, t)$ 、平均密度 $\rho(x, t)$ 和速度方差 $\theta(x, t)$ 是宏观交通流模型研究的主要变量,与车辆数量基本无关。宏观交通流模型基于这种离散特性被广泛应用于实时交通仿真,宏观方程和数值积分法可以保证模拟结果的正确性和可靠性。流体动力学模型和流体运动学模型是宏观交通流模型的代表^[3]。

2.2 微观交通流模型

交通流微观模型主要包括跟驰模型和元胞自动机模型。

到稿日期:2012-12-06 返修日期:2013-01-29 本文受国家自然科学基金(60806043)资助。

卫小伟(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为交通智能控制, E-mail: 915991606@qq.com; 巨永锋(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为交通控制与管理 and 智能测控技术及应用。

跟驰模型在力学上是质点系动力学模型,研究单个车辆及前后车之间的作用,用以描述交通流特性。从 20 世纪 90 年代开始,元胞自动机理论被应用于交通流研究中,元胞自动机交通流理论基于离散的时空和状态变量,给出一定的车辆运动规则,来进行仿真模拟,从而得出交通规律。元胞自动机属于离散非线性模型,与交通系统在本质上是相同的,所以用它描述交通系统非常适合,并且元胞自动机能在计算机上进行有效、高速的数值模拟,是研究交通系统非常先进的模型。

3 微观交通流解析与算法研究

3.1 元胞自动机理论

这里为了研究微观交通流,我们引入元胞自动机(Cellular Automata,简称 CA)的理论。元胞自动机是数学模型的一种,实质上是定义在一个由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上,并按照一定的局部规则,在离散的时间维度上演化的动力学系统^[2]。元胞是元胞自动机的基本单位,是指将空间以一定的规则分割成的单个单元,元胞的取值范围是有限的离散状态集。元胞的作用和更新都依循同样的作用规则,大量元胞之间的相互作用完成系统的动态演化,元胞自动机是由一系列的演变规则构成,而不是如同其他动力学模型由物理方程或函数来确定。

元胞自动机由 4 个基本单位——元胞、元胞空间、近邻和规则组成^[6]。

目前对元胞自动机研究比较深入的是一维和二维元胞自动机。在一维空间,元胞排列成线性,如图 1 所示;二维表示包括 3 种格子:三角形格子、正方形格子、六边形格子,如图 2 所示^[2];在三维的情况下,格子式样有多种可能,其中立方格子最易掌握,最易进行几何表述。

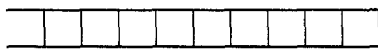


图 1 一维元胞自动机

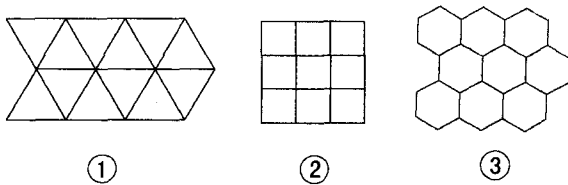


图 2 二维元胞自动机

元胞自动机类似于物理学中的“场”的概念,它的原理是使大量元胞依循一定的简单规则进行持续运行来模拟复杂现象^[5]。在计算机上无法实现无限延伸的模拟,所以要定义边界条件。20 世纪 80 年代提出将元胞自动机的理论应用于交通流,90 年代元胞自动机交通流模型迅速发展。与其他交通流模型相比,元胞自动机模型保留了非线性行为,通过定义离散车辆运动规则,借助大量样本平均来揭示交通规律。元胞自动机模型的另一优势是便于在计算机上操作,可以通过修改各种演化规则来模拟各种真实交通效应,如上下匝道的影响、瓶颈效应等。

3.2 基于元胞自动机的算法设计

我们使用 NS 元胞自动机理论设计模型,利用格点占据

状态的力学方法进行解析研究。接着,将相邻车距作为变量,来计算不同长度车距之间的跃迁概率,利用稳态条件,研究在 FI 加速规则下的 NS 元胞自动机模型,模拟车辆密度在不同随机延迟概率下的平均速度和车流量的关系^[2]。最后得到一维平均场方程,为复杂的交通流系统提供了基本理解^[3]。

NS 模型是一个随机 CA 交通流模型,速度 v_n 和位置 x_n 决定了每辆车的状态, v_n 的取值范围为 $\{0, 1, 2, \dots, v_{\max}\}$ 的 $v_{\max}+1$ 个值内任取一,第 n 辆车与前面第 $n+1$ 辆车的间距由 $d_n = x_{n+1} - x_n$ 表示。 N 为在长度为 L 的道路上分步的车辆数,时间步为 $t \rightarrow t+1$,按周期性边界确定边界条件,车辆状态的演化规则为:

- (1) 加速过程: $v_n \rightarrow \min(v_n + 1, v_{\max})$;
- (2) 安全刹车过程: $v_n \rightarrow \min(v_n, d_n - 1)$;
- (3) 随机慢化过程(以随机慢化概率 ρ): $v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0)$;
- (4) 位置更新: $x_n \rightarrow x_n + v_n$ 。

在 NS 模型中,考虑 FI 模型的加速规则为每辆车在 1 个时步加速到最大速度 v_{\max} (前方有足够多空格)。令 $\rho = N/L$ 为公路上的车辆密度,其中: L 为一维元胞自动机链长,表示高速公路的长度; N 为一维链上粒子总数,表示公路上汽车的总数。假设汽车的行驶方向为从左向右,将汽车由左至右编号为: $n=1, 2, \dots, N$ 。周期性边界条件即模型中的公路为环形,此条件下汽车总数守恒。

$C_n(t)$ 表示 t 时刻第 n 辆车前方(右方)的空格数,即第 n 辆和第 $n+1$ 辆车之间的间距。 $v_n(t)$ 表示第 n 辆车 t 时刻的速度。则最大车辆速度 $v_{\max} = M$ 的 FI 加速规则的模型方程为:

$$C_n(t+1) = C_n(t) + v_{n+1}(t) - v_n(t)$$

作为车辆间距的函数车辆速度 $v_n(t)$ 为:

$$v_n(t) = F_M(C_n(t))$$

其中:

$$F_M(f, C) = \begin{cases} 0, & \text{若 } C=0 \\ C-1, & \text{概率为 } f \\ C, & \text{概率为 } 1-f \end{cases}, \quad \text{若 } 0 < C < M$$

$$F_M(f, C) = \begin{cases} M-1, & \text{概率为 } f \\ M, & \text{概率为 } 1-f \end{cases}, \quad \text{若 } C \geq M$$

车距所占的比例可以由 $P_i(t) = N_i(t)/N$ 表示,其中: $N_i(t)$ 表示 t 时刻车距为 i 的车辆数。某时步中向前运动 i 格的概率用 Q_i 代表。某一时刻发现某一车距为 i ,在下一时刻变为 j 的概率称为“跃迁概率” $W_{i \rightarrow j}$ 。最大车辆速度 $v_{\max} = M$ 时,模型可建立为:

$$W_{0 \rightarrow j} = P_0 Q_j, 1 \leq j \leq M$$

$$W_{i \rightarrow 0} = P_i (1-f) Q_0, 1 \leq i \leq M-1$$

$$W_{i \rightarrow j} = P_i [Q_{j-1} + (1-f) Q_j], 1 \leq i \leq M-1, 1 \leq j \leq M, i \neq j$$

$$W_{i \rightarrow M+1} = P_i f Q_M, 1 \leq i \leq M-1$$

$$W_{i \rightarrow i-M} = P_i (1-f) Q_0, i \geq M$$

$$W_{i \rightarrow i-(M-j)} = P_i [f Q_{j-1} + (1-f) Q_j], i \geq M, 1 \leq j \leq M-1$$

$$W_{i \rightarrow i+1} = P_i f Q_M, i \geq M$$

$$W_{i \rightarrow j} = 0, \text{其他}$$

当系统趋于稳态时,各个 P_i 不再随时间变化,系统的稳态条件为:

$$\sum_{i \neq m} W_{i \rightarrow m} = \sum_{i \neq m} W_{m \rightarrow i}, \forall m$$

从而解出系统稳态的平均速度为:

$$\begin{aligned} \langle v(t \rightarrow \infty) \rangle &= \sum_{i=1}^M P_i [(M-1)f + M(1-f)] \\ &= \sum_{i=1}^M P_i i + \sum_{i=M+1}^{M+N} P_i M - \sum_{i=1}^{L-N} P_i f \\ &= \sum_{i=1}^M P_i i + \sum_{i=M+1}^{L-N} P_i M - f(1-p_0) \end{aligned}$$

基于以上结果,我们可以求得稳态的流量为:

$$J(t \rightarrow \infty) = \rho \langle v(t \rightarrow \infty) \rangle$$

3.3 算法分析

在此模型基础上选取度 $M=2, L=1000$ 的情况进行数值模拟。此时系统有稳态方程:

$$[Q_0 + (1-f)Q_1 + fQ_2]P_2 = Q_2 P_0 + P_1 [(1-f)Q_2 + fQ_1] + [(1-f)Q_1 + fQ_0]P_3 + (1-f)P_4, m=2$$

对于给定的密度 ρ ,可求解该方程组,得 $P_i, i=0, 1, \dots, L-N$,进而可以得到稳态平均速度和稳态流量。对算法进行计算机仿真,研究不同延迟概率下的平均速度和不同延迟概率下的流量和密度得出下图(图3为不同延迟概率 f 稳态时的平均速度和密度的基本图,图4为不同延迟概率 f 稳态时的流量和密度的基本图)。

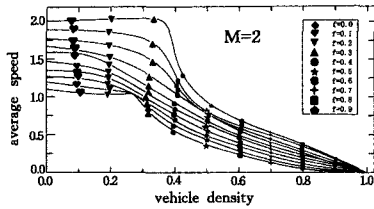


图3 不同延迟概率 f 稳态时的平均速度和密度的基本图

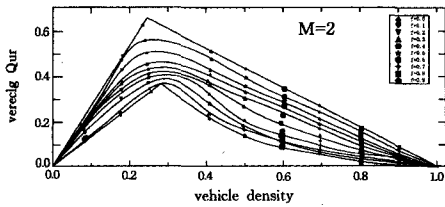


图4 不同延迟概率 f 稳态时的流量和密度的基本图

图3和图4所模拟的是 $M=2$ 的基本图。两图中车辆密度同为横坐标,不同的是在图3中稳态的平均车辆速度为纵坐标;而在图4中稳态的车流量为纵坐标。理论分析结果在图中显示为离散点,数值模拟结果是实线。

综上所述,本文研究解析了FI加速规则的NS元胞自动机模型。模型中,以车距长度作为切入点,定义了“跃迁概率”,建立稳态方程,得到了 $P_i, i=0, 1, \dots, L-N$,进而可以得到稳态平均速度和稳态流量。

3.4 改进算法——双通道决策

在双通道决策算法中,可以将系统看作一条公路先分叉出两条支路后又合并为一条公路。这样驶入的车辆有两个选择来进行行驶——走通道A或通道B。按道路选择方式可将车辆分为静态车和动态车,静态车和动态车的区别在于驶入道路的选择依据,静态车选择道路不考虑实时信息的反馈而随机进入;动态车选择道路依据实时的交通信息^[6]。车辆进入通道后,则以基本CA模型行驶直至驶离该条道路。车辆选择驶入的道路依据通过通道的耗费时间,优先选择用时较短的通道,如果两者时间相等,车辆随机进入一条通道。信息有一定的滞后性,两条道路拥挤的差异并不能完全由在两条道路上行驶的时间差反映,所以基于时间对道路的选择并不

能完全有效避免拥堵。

用FI元胞自动机模型来模拟上述情形, p 代表随机延迟概率, M 代表车辆最大速度。 S_{FC} 表示可发布信息车辆占车辆总数的比例, S_d 代表动态车占总车数的比例, L 表示两条通道的格点数。假设模拟前A、B道路上无车辆,将路况信息设置为缺省值 $t_A = t_B = L/(M-p)$ 。系统初期静态车和动态车随机进入道路A、B,直至有流动车驶出并将耗费时间反馈至系统,随着路况信息不断更新,动态车也根据两条道路的不同信息进行新的选择。

图5显示了双通道决策交通流在参数为 $M=3, S_d=0.5$ (动态车、静态车各占总车数的50%), $S_{FC}=1$ (所有车辆均可发布信息), $L=2000, p=0.5$ 时的模拟结果。

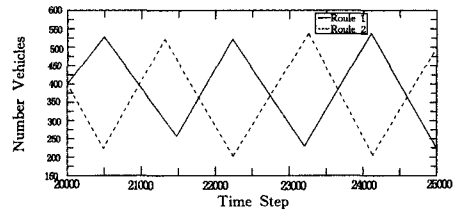


图5 双通道决策交通流的模拟结果

数值模拟的结果表明,仅机械利用反馈信息会出现不稳定现象,系统的利用效率下降,合理利用信息可显著提高系统效率。

结束语 交通流研究是一个欣欣向荣的学科,根据研究方法的不同,本文主要针对微观交通流提出了元胞自动机模型,并针对模型设计算法模拟交通流状况,提出了改进的双通道决策算法。通过这样的算法可以显著提升交通流分析系统的效率,对我们更好地制定交通管理策略有着重要的意义。

参考文献

- [1] 张庆良,赵树国. 交通流模型的建立[J]. 邯郸职业技术学院学报, 2009(03)
- [2] 贾斌. 交通流瓶颈处车流复杂动态特性的元胞自动机模拟[D]. 安徽:中国科学技术大学, 2002
- [3] 华雪东,王炜,王昊. 考虑驾驶心理的城市双车道交通流元胞自动机模型[J]. 物理学报, 2011(08)
- [4] 杨奕,施帮利,徐鹏. 基于选择性随机减速的元胞自动机交通流模型[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2011(7)
- [5] Fu Chuan-ji, Wang Bing-hong, Yin Chuan-yang, et al. Analytical studies on a modified Nagel-Schreckenberg model with the fukui-Ishibashi acceleration rule[J]. Chaos, Solitons & fractals, 2007, 31(3)
- [6] 杨文杰,白云霄,贾宏恩. 基于车辆跟驰模型的交通流动力学模型[J]. 陕西科技大学学报:自然科学版, 2010(4)
- [7] Zheng Xian-qing, Wu Zheng, Xu Shi-xiong, et al. Video-based measurement and data analysis of traffic flow on urban expressways[J]. Acta Mechanica Sinica, 2011, 27(3):346-353
- [8] Sun Di-hua, Peng Guang-han, Fu Li-ping, et al. A continuum traffic flow model with the consideration of coupling effect for two-lane freeways[J]. Acta Mechanica Sinica, 2011, 27(2):228-236
- [9] 温坚,田欢欢,康三军,等. 混合交通流元胞自动机FI模型的能耗研究[J]. 物理学报, 2010(11)
- [10] 李新刚. 基于元胞自动机模型的交通系统微观建模与特性研究[D]. 北京:北京交通大学, 2010
- [11] 陈义华,晏承玲. 基于FAHP和模糊综合评判的交通状态判别模型[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2012, 26(11):109-114