

# 改进的元胞自动机交通仿真模型研究

林 颢<sup>1</sup>, 师 卫<sup>1</sup>, 孔宪娟<sup>2</sup>, 刘李霞<sup>3</sup>

(1. 太原理工大学信息工程学院, 山西太原 030024; 2. 北京清大仿通科技有限公司, 北京 100084;  
3. 北京林业大学, 北京 100083)

**【摘 要】** 交通问题是非线性的, 很难用解析的方法求解, 因此, 交通仿真就成为研究和解决交通问题的重要工具。但传统的元胞自动机(CA)模型由于模型本身的原因, 只能适用于较大尺度的交通仿真研究。文章对传统的 CA 模型进行改进, 提出了时间和空间划分粒度可控的 CA 模型。新的模型保留了 CA 并行性的特点, 因而模拟效率高。此外, 新模型的时空结构使得任何微观仿真新模型的研究成果方便的加入元胞自动机模型的规则中, 从而能更加接近实际。最后, 采用仿真实例对新模型的仿真结果进行分析, 证明了模型的有效性。

**【关键词】** 交通仿真; 元胞自动机; 跟驰模型

**【中图分类号】** TU984.191

**【文献标识码】** A

## 1 研究交通仿真模型的意义及方法

随着社会的发展, 影响交通系统的相关因素越来越多, 而人们又总是力求寻找最优解决方案, 以期解决各种交通问题。交通仿真是计算机技术在交通工程领域的一个重要应用, 它不仅可以复现交通流时空变化、为交通道路设计规划提供技术依据, 而且还可以对各种参数进行比较和评价, 以及环境影响的评价等。交通仿真可分为宏观仿真、中观仿真及微观仿真, 而微观交通仿真由于更接近交通流的本质, 在交通工程领域受到日益重视。

微观交通仿真的车辆行为模型主要包括车辆跟驰模型和换道模型, 分别描述了单车道及多车道车辆的微观行为, 相关研究日趋成熟。1950 年 Reuschel A 的研究和 1953 年 Pipes L A 的研究, 标志着跟驰理论解析方法研究的开始。随后, Gazis, Herman 及 Rothery 通过研究导出车辆跟驰非线性算法的 GHR 模型。20 世纪 70 年代以后, 发达国家对车辆跟驰模型进行了大量基于前后车的相对速度及其车间距的研究<sup>[3]</sup>。车辆跟驰模型的研究成果虽然能够比较好地拟合真实场景, 但是由于公式计算的复杂性, 在仿真中效率比较低。

而元胞自动机模型作为模拟非线性复杂系统的一种有效工具, 由于其建模思想更接近交通行为的离散性的本质, 近些年来在交通流的研究及应用受到广泛关注。最基本的一维交通流元胞自动机模型是 Wolfram 提出的 184 号 CA 模型<sup>[4]</sup>。Nagel 和 Schreckenberg 于 1992 年提出的元胞自动机(NaSch 模型)考虑到了车辆的逐步有限加速和随机慢化的可能性<sup>[5]</sup>。作为 NaSch 模型的一种简化, Fukui 和 Ishibashi 在 1996 年提出了一种新的一维交通流模型(FI 模型)<sup>[6]</sup>。一维元胞自动机模型虽然简单, 但已经能够模拟出拥挤的自发产生及消散过程。而在应用领域, 以元胞自动机思想研发的 Transims 系统, 已经成功应用于美国若干地区的交通研究中。但这些元胞自动机模型的元胞最小尺度是一个标准车的长度, 这就限制了模拟的精度, 车辆的加速和减速最小是

一个元胞, 不能很好地模拟车辆缓慢启动加速及逐渐减速的行为, 只适用于较大尺度、较粗粒度的研究<sup>[10]</sup>。

仿真模型的两个重要方面是仿真速度与真实条件的拟合程度, 因此仿真模型成功与否的关键: 真实性、效率高。鉴于前面的分析, 两种微观模型各具优势而又各有缺点, 限制了他们在实际中的应用。尤其是在我国复杂成分的交通流研究中, 哪一种模型都不能满足需要。本文提出一种改进的元胞自动机模型, 结合了元胞自动机模型和跟驰模型的各自优势, 既能保持模拟的高效性, 又能更加贴近真实车辆行为状态。并根据不同场景的仿真数据进行分析, 分析结果表明仿真模型能模拟车辆的微观行为, 更接近实际。

## 2 仿真模型

### 2.1 经典元胞自动机原理

元胞自动机(Cellular Automata, 简称为 CA)是 Von Neumann 在 20 世纪 50 年代研究自我复制的自动机器时提出的。元胞自动机模拟交通系统的基本思想是: 在整个交通网络中, 每条道路被分成有限的元胞, 一辆机动车可占用一个元胞, 在每个时间步, 通过使用简单的规则集可以把车辆从一个元胞移到另一个元胞处, 即实现了机动车的运行状态的变化, 因而从整体上可以模拟出交通系统中交通流的变化特性。

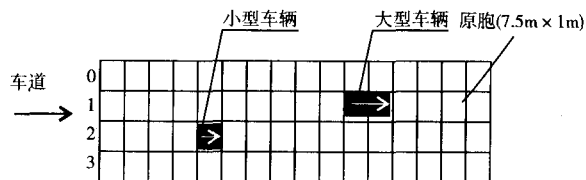


图1 元胞自动机

经典的元胞自动机原理如图 1 所示。元胞长度为 7.5 m, 宽 1 m。虽然形式上在仿真软件中车道仍以两条线段

[定稿日期] 2010-12-21

[作者简介] 林颢(1984~), 研究方向: 交通系统仿真。

相夹来表示,但在实际的程序处理过程中,车道代表的是这两条线段所包含的网格,车道的走向也就是网格序号递增的方向,即车辆运行时车头的网格定位也是递增的。车道的网格处理可以为以后车辆运行时判断本车道前方道路状况,相邻车道状况提供便利,即判断搜索网格状态为1(被其他车辆占据)或0(空)。每一车道(Lane)所包含:车道序号(Lane Index)、网格(元胞)。

## 2.2 改进模型及方法

### 2.2.1 改进模型

综合上面的因素,以及国内外关于交通仿真的研究成果,本文基于元胞自动机思想,对基础的元胞大小及仿真时间步进行了进一步细分。元胞的大小不再是一个标准车的长度,而是根据仿真需求可进行进一步的细分。每个标准车的横向和纵向都各占据若干个元胞。改进的元胞自动机模型如图2所示。

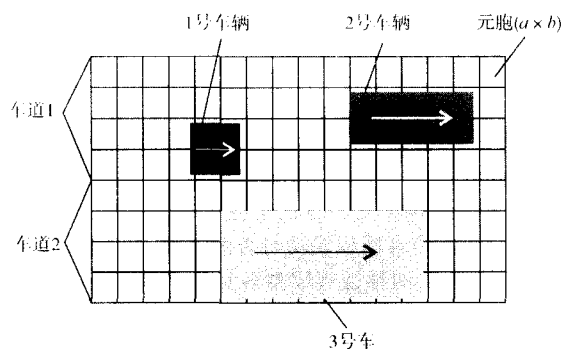


图2 改进的元胞自动机模型

在改进的CA模型中,车道(Lane)的长度和宽度可以任意设置(图2中车道宽度为4个元胞),元胞的长度和宽度也可以根据不同的场景,进行设置。此外,考虑到测试场景的复杂性,为了更真实地再现测试场景,在路网中的车辆可以进行各种属性的设置(图2中1号车辆长度为2个元胞,宽为2个元胞;2号车辆长度为5个元胞,宽度为2个元胞;3号车辆长度为8个元胞,宽度为3个元胞)。这样,可以添加不同属性的车辆进入到路网中,使模型更加接近真实情况。

此外,基于这种改进的模型,行人、自行车、小型车、中型车及大型车可以在同一空间模型中采用不同的长、宽尺度进行定义,提供了混合交通仿真的基础,为元胞自动机的应用拓展了新的方向,同时为我国明显的混合交通流特性的研究打开新的思路。

### 2.2.2 改进模型的特点

本文采用改进的CA模型,以达到既保持CA高速便捷的特点,又最大限度符合实际的目的。其创新点体现在以下几个方面:时间划分粒度可控;空间划分粒度可控;空间占位方法调整;融合其他仿真模型。

传统元胞中,针对时间的划分是模糊的。而在本文改进的CA模型中,对时间提出了明确的定义:时间与仿真步之间是一种简单函数关系;仿真步作为一种纯逻辑的存在;时间的连续性可以通过不断细分仿真步的最小单元得以保证;时间模型提供了连续计算的基础。

传统元胞中,空间的划分是以一种针对仿真最小对象的

形式存在的。而在本文改进的CA模型中,空间的划分蜕变为针对空间的一种明确定义:所有对象的空间描述均以元胞为基础;空间元胞作为一种纯逻辑的存在;空间的连续性可以通过不断细分仿真步的最小单元得以保证;空间模型提供了连续计算的基础。

传统元胞自动机模型中,元胞作为一个运动对象空间占位的最小也是唯一单元。而在本文改进CA模型中,一个运动对象可以占用多个元胞。占位方法的调整释放了运动对象的自由度:所有运动对象的空间描述均以元胞为基础;运动对象与元胞的关系是一种简单函数的关系;运动对象占据元胞的数量和状态与其本身有关。

有前三点作为基础,本文改进的CA模型中,时间与空间都有了一个连续的基础,同时又有了一个离散的逻辑描述,在计算机中易于表示及仿真实现。在此基础上,可以将任何其他仿真模型应用到本模型之上,将所有静态交通实体在空间上转化CA的对象,而所有动态交通实体的行为模型就转化为CA中的时间模型和空间模型,并且可以结合事件驱动的模型对仿真进行控制。因而具有很强的扩展性和兼容性,进而对交通仿真效果进行更复杂的验证,进而进行更深入的研究和创新。

仿真模型结构图如图3所示。

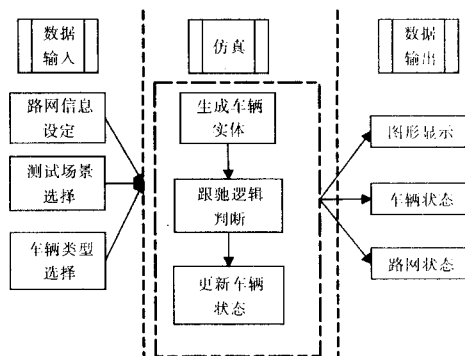


图3 仿真模型结构图

仿真效果二维显示如图4。

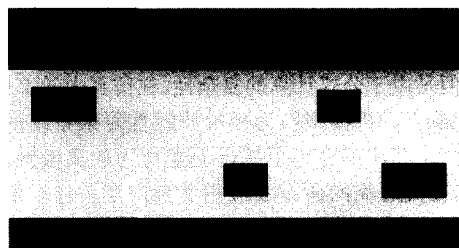


图4 仿真效果二维显示

## 3 仿真效果验证

### 3.1 仿真实验原则

车辆跟驰模型是微观交通仿真中的核心模型,模型构造的质量在很大程度上决定着仿真结果的仿真精度和可靠性。在跟驰状态下,后车接近它的前导车并且跟随它的前导车。制约性、延迟性及传递性构成了车辆跟驰行驶的基本特征,同时也是车辆跟驰模型建立的理论基础。

作为微观交通仿真的两大重要模型之一,车道变换模型被认为是比较复杂以至难以用数学模型描述的。现代交通仿真认为,车道变换行为是驾驶员根据自身驾驶特性,针对周围车辆的车速、空档等周边环境信息的刺激,调整并完成自身驾驶目标策略的包括信息判断和操作执行的综合行为过程。

因此,我们选取下面三个具有代表性的不同场景做单车道验证和双车道换道验证。

### 3.2 不同场景数据验证

#### 3.2.1 测试场景(场景1)

假定在时刻 $t=0$ ,有50辆车以24.38 m/s的同样速度在一条公路上行驶。车辆间的车头时距是1.5 s。车间距处于均衡状态,因此,没有车辆在加速或减速。另外,假定所有车辆的自由流速度是30.48 m/s,但是受下游道路条件的限制,领头车辆的速度不能超过24.38 m/s。假如在时刻 $t=3$  s,领头车辆开始以 $4.57 \text{ m/s}^2$ 的减速度减速,然后持续时间3 s,然后又加速到原来的速度。

测试目的:测试正常的跟驰逻辑及避免车辆相撞的情况下车辆的加减速行为是否符合预期,测试跟驰模型的制约性(头车行为对后续车辆行为的制约)、延迟性、传递性(图5、图6)。

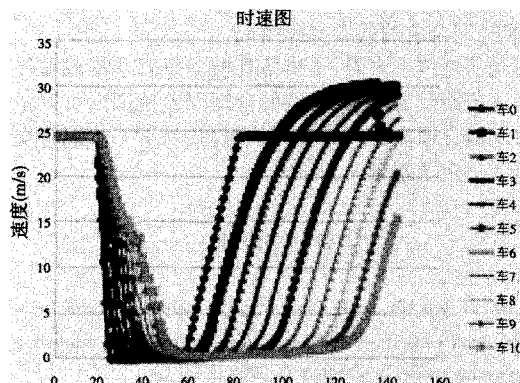


图5 测试场景1时速图

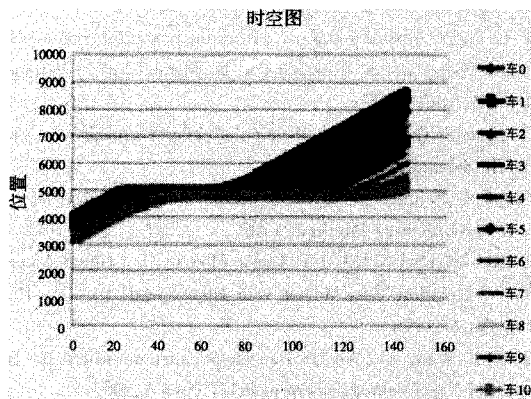


图6 测试场景1时空图

从图5、图6可以看出,随着头车的减速停止到再启动,后续车辆也会跟随之进行相似的行为,但是随着车辆距离头车的位置不同,依次逐渐停止,然后依次逐步重新启动,体现了跟驰行为中前车对后车行为的制约性、延迟性和传递性。

此外,由于头车的最大速度(24.38 m/s)比后续车辆(30.48 m/s)低,从图5、图6可以看出,重新启动后,1车在头车后逐渐启动并慢慢追上头车,两车的位置曲线逐渐接近的过程。但是由于头车的制约,后续车辆虽然速度较快,但是依然不能超越头车,而是保持合理的车间距跟随行驶。

场景测试的时空图结果体现了跟驰逻辑的特性,车辆的行为符合预期。

#### 3.2.2 测试现场(场景2)

假定在时刻 $t=0$ ,有50辆车以30.48 m/s的同样自由流速度在一条公路上行驶。车辆间的车头时距是1.45 s。车间距处于均衡状态,因此,没有车辆在加速或减速。假如在时刻 $t=3$  s,领头车辆开始以 $1.524 \text{ m/s}^2$ 的减速度减速到停止,持续时间20 s,然后又加速到原来的速度。

测试目的:测试车辆是否有效防止车辆碰撞,并测试车辆的跟驰行为是否符合预期(图7、图8)。

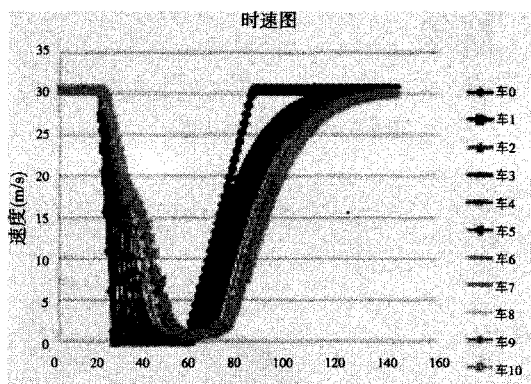


图7 测试场景2时速图

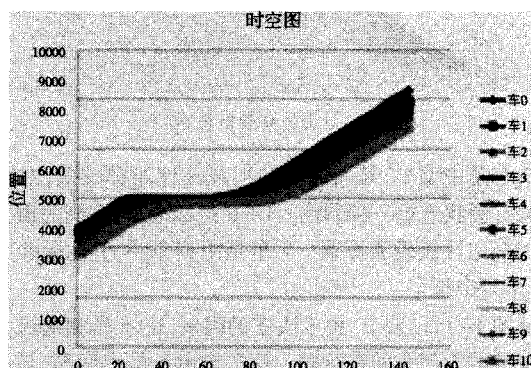


图8 测试场景2时空图

从图7、图8可以看出,头车减速停止又重新启动加速到自由流速度行驶,后车也会延迟一段时间出现相近的行为,与测试场景1相比,由于头车的最大速度没有限制,因此重新启动后,1车没有快速赶上头车,二者之间的车间距在重新启动后逐渐增大,最终保持期望的车间距行驶。

场景2的时空图测试结果表现了跟驰逻辑的延迟性、制约性、传递性,符合预期结果。

从时速图可以看出,与场景1相比,除了表现出与场景1类似的跟驰逻辑特性之外,由于进入避免车辆碰撞模式,1车的减速度有个突然最大减速度减速的情形,之后慢慢减速到停止。由于头车的停止时间比场景短,因此场景1的所有

车辆的行为都是减速到停止再启动,而在场景2中并非所有的车辆都减速到停止再启动,而仅仅表现为先跟随减速然后逐步加速的过程。

### 3.2.3 自由发车场景(场景3)

从道路开始随机发车,车辆初始加速度,速度均为0。

测试目的:不同车型的制约性、车辆行为的延迟性、传递性(图9、图10)。

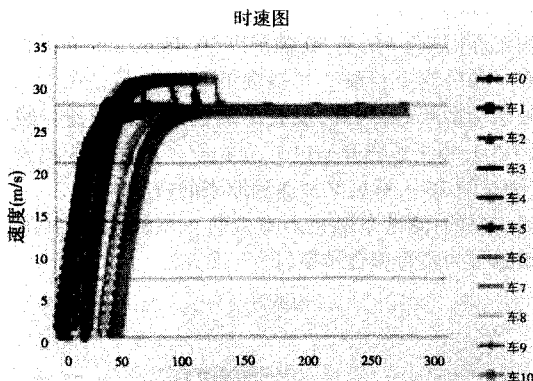


图9 自由流场景时速图

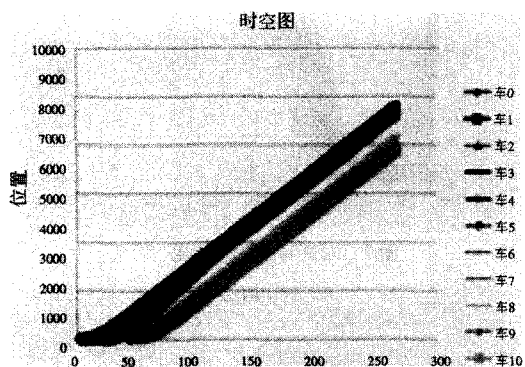


图10 自由流场景时空图

头车是中型车,最大速度和加减速性能都较低,对整个车队的行驶状态是一种制约。1~6是标准车,车辆的最大速度和加减速性能较头车高。7车是中型车,8车是标准车,9车10车是中型车。

从图10可以看出,由于头车的限制,1~6车相继追上头车并保持的期望车间距行驶。而7车由于是中型车,与6车之间的车间距逐渐拉大。而8车是标准车,逐渐追上7车……于是,由中型车和标准车组成的车队间的轨迹曲线表现为不同的间距。时空图测试结果既体现了跟驰逻辑的特性,又体现了不同车型的影响。

而从图9可以看出,由于头车是中型车,属于相对的慢车,因此对车队的整体行为具有制约性。而由于车型不同的排列顺序,车速的波动有所差别,但最终都趋向于保持与前车相同的车速行驶,在这一过程中有可能在前车车速附近摆动。

### 3.2.4 双车道数据分析

取两车道在一定时间间隔内的路网数据,多次取值求平均,统计结果见表1、表2。

表1 双车道不允许换道数据统计

车道	左车道	右车道
车道分担率	0.316659	0.703827
车道分担率	0.325091	0.674909
平均车速	35.65271	25.45214
车道占有率	0.095	0.191

表2 双车道允许换道数据统计

车道	左车道	右车道
车道分担率	0.503701	0.496393
车道分担率	0.50596	0.49404
平均车速	26.35128	28.02837
车道占有率	0.1625	0.159

通过表1、表2统计表,可以明显看出系统在允许换道的程序控制下,车道占有率,车道分担率,平均车速三个指标比不允许换道,有了明显改善,符合期望设计效果。

## 4 结论和展望

本文采用面向对象的建模技术将复杂的交通实体抽象出来建立了对象模型。通过对不同场景的数据分析,证实了交通仿真效果的有效性,但肯定会存在一定的误差,其原因有输入模拟模型的原始数据和用来验证模型的数据本身就存在着一定的误差,再者一些实际系统中的情况和影响因素,不能完全的代表实际情况,

但是从整体上来看,本文仿真模型研究基本能够模拟给定的高速公路交通流,在一定的合理误差范围内可以描述我国城市干道交通流运行的实际状况,并为下一步混合交通仿真的研究奠定了基础。

## 参考文献

- [1] Jiang R, Wu QS, Jia B, Intermittent unstable structures induced by incessant constant disturbances in the full velocity difference car-following model, PHYSICA D, 2008, 237(4)
- [2] 郑容森, 谭惠丽, 孔令江, 等. 双车道多速车辆混合交通流元胞自动机模型的研究[J]. 物理学报, 2005, 54(8)
- [3] P. G. Gipps A behavioural car-following model for computer simulation Transportation Research Part B: Methodological Volume 15, Issue 2, April 1981
- [4] Wolfram S. Theory and application of cellular automata. Singapore: World Scientific, 1986
- [5] Nagel, K, Schreckenberg, M. A cellular automaton model for free-way traffic. Journal Physique. 1992
- [6] FUKU IM, LSH IBASH I Y. Traffic Flow in 1D Cellular Automaton Model Including Cars Moving with High Speed[J]. Phys Rev E, Soc, Japan, 1996
- [7] Jiang R, Wang XL, Wu QS Dangerous situations within the framework of Nagel Schreckenberg model. J Phys A, 2003
- [8] Chowdhury D, Sant en L, Schadschneider A. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. Phys Rep, 2000
- [9] Helbing D. Traffic and related self driven many particle systems. Rev Mod Phys, 2001
- [10] 孙跃, 余嘉, 胡友强, 等. 基于元胞自动机原理的微观交通仿真模型[J]. 重庆大学学报, 2005(5)