

道路弯道对交通流影响的研究*

梁玉娟^{1)†} 薛 郁²⁾

1) (广西河池学院物理与电子工程系, 宜州 546300)

2) (广西大学物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

(2009 年 10 月 8 日收到; 2009 年 11 月 26 日收到修改稿)

在经典 NaSch 模型的基础上, 考虑行驶弯道的曲率半径、弧长以及路面的摩擦系数等对车辆运行的影响, 提出一种改进的适应特殊路况的单车道元胞自动机模型. 按此模型, 通过计算机数值模拟, 研究了具有不同曲率半径、不同弧长和不同摩擦系数的弯道对交通流的影响. 模拟结果显示, 改进后的模型能准确反映特殊路况对行驶车辆的影响, 同时再现了与实际交通相一致的时停时走交通波等复杂的非线性现象, 根据所反映出的实际交通现象, 分析得出了增大弯道曲率半径和弯道处的摩擦系数, 并尽量地减小弯道弧长, 可以减少弯道处交通事故的发生, 避免交通拥堵的发生, 提高道路通行能力.

关键词: 交通流, 元胞自动机, 弯道, 向心运动

PACC: 0550, 0313, U491

1. 引 言

交通运输与人们的生活息息相关, 随着经济的快速发展, 机动车辆的急剧增加, 交通安全已成为社会的重大问题. 交通事故的频繁发生不仅与人为因素、车辆因素有关, 而且还与道路的自身因素有密切的关系. 特别是对于丘陵区、山区公路, 这些道路路面较窄, 有些道路临崖靠涧, 有些盘山绕行, 坡多弯多, 坡长弯急; 在城市内, 有三环路、四环路等. 在弯道多且弯度大的地方, 一旦车速过快, 就极易发生交通事故, 给家庭、社会带来极大的损失. 为了减少弯道处事故发生率, 在建设道路时往往在弯道前加上缓冲带或在路旁加上限速标志, 如 30 km/h, 60 km/h 等. 那么设置限速的依据又是什么呢?

1) 许多大学物理、普通物理教材的惯性离心力的章节中, 有这样的例子: 如图 1 所示, 水平圆盘以角速度 ω 绕过盘心的竖直轴转动, 质量为 m 的物体相对于转动参考系静止, 随圆盘一起做圆周运动. 若以地面为参考系, 物体受到圆盘面对它的静摩擦力为 f_s , f_s 为物体作圆周运动提供了所需的向心力

$f_s = m\omega^2 r = mv^2/r$ ^[1]. 速度越大, 需要的向心力就越大, 当最大静摩擦力小于向心力 $m\omega^2 r$ (或 mv^2/r) 时, 物体将沿切线方向飞出去.

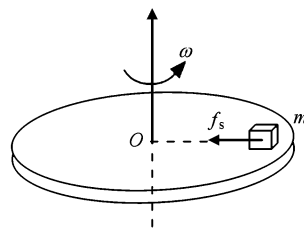


图 1 水平圆盘以角速度 ω 绕过盘心的竖直轴转动

2) NaSch 模型是著名的交通流元胞自动机模型^[2]. 元胞自动机模型是一种规则模型, 易于计算机操作, 它通过简单的规则就能再现常见的基本交通现象, 而且只要灵活地修改其规则就可以适用于各种真实的交通条件, 它与其他连续性模型相比运算速度更快, 正因为其具有这些独特的优越性, 因而在交通流的研究中得到了广泛的应用和发展^[2-11].

基于以上两点, 假设车辆过弯道时所需要的向心力是法向的静摩擦力提供的, 本文在 NaSch 模型

* 国家自然科学基金 (批准号: 10662002, 10865001), 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB705500), 广西研究生创新计划项目 (批准号: 105930903077) 资助的课题.

† E-mail: yujuan2267@yahoo.cn

的基础上,提出一种改进的能适应弯道这一特殊路况的单车道元胞自动机模型,分别数值模拟行驶弯道的曲率半径、弯道弧长、路面的摩擦系数对车辆运行的影响.

2. 道路弯道结构

道路由于受自然条件(地形、地物)的限制,在

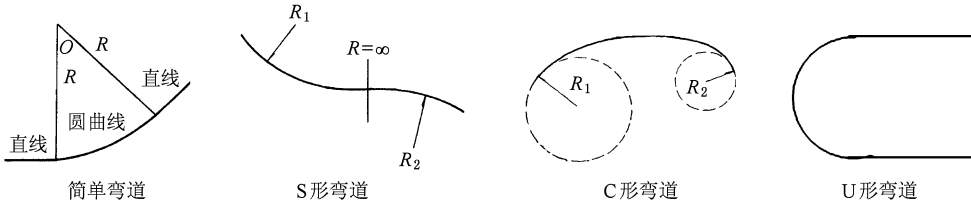


图2 各种不同的弯道

3. 安全速度的确定

实际道路弯道,为抵消车辆在弯道路段上行驶时所产生的离心力,保证行驶车辆安全,在该路段横断面上设置为外侧高于内侧的单向横坡,称之为超高.为适当简化问题,假定所研究的路段只设有一个弯道,而且是不设超高的平面弯道的一条单行车道,以简单型弯道为例,如图3所示.弯道的曲率半径、弯道所占的弧长分别用 r 和 s 表示,拐弯前的减速缓冲路段长度为 l ,用 m 表示车辆的质量, v_{safe} 表示车辆在弯道处安全行驶的最大速度, μ 表示弯道处车轮与路面的静摩擦系数, g 表示当地的重力加速度.由于切向摩擦力对车辆的影响体现在速度大小的改变,所以这里假设车辆安全通过弯道时所需的向心力是由法向的静摩擦力提供的,则弯道处行驶车辆要满足向心运动公式^[1]

$$m \frac{v_{\text{safe}}^2}{r} = \mu mg,$$

则车辆安全行驶的最大速度为

$$v_{\text{safe}} = \sqrt{\mu gr},$$

车辆的最大安全行驶速度 v_{safe} 由 μ, g, r 三个因素决定,若车辆拐弯时的速度 $v \leq v_{\text{safe}}$,则车辆可以安全拐弯,若速度 $v > v_{\text{safe}}$,则车辆所受法向静摩擦力不足以提供向心力,汽车的横向稳定性下降,这时由于惯性的作用,车辆有可能飞出道路之外,造成交通事故.因此,如果车辆在拐弯前的速度 $v > v_{\text{safe}}$,则

平面上有转折,纵面上有起伏,为保证行车的舒适、安全和驾驶员操作方便,在转折点和起伏变化点处,必须用一定半径的曲线连接,所以道路都是由直线和曲线两大部分组成,而直线和曲线的不同组合,就形成各种各样的弯道,如图2所示.

它在拐弯前的减速缓冲路段上就必须减速,使速度降到 $v \leq v_{\text{safe}}$.

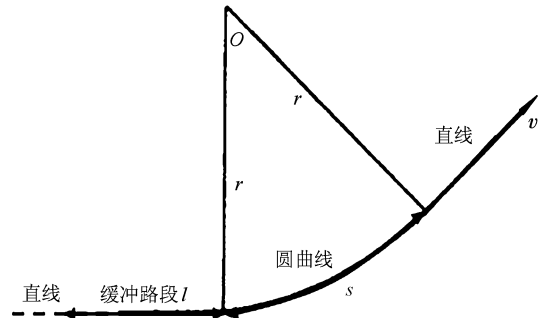


图3 弯道结构示意图

4. 模型规则

在经典 NaSch^[7-9] 模型的基础上,考虑弯道处各种因素(摩擦系数 μ 、弯道弧长 s 、曲率半径 r)对车辆速度以及车辆延迟概率的影响,将 NaSch 模型的演化规则更改如下:

1) 确定车辆的延迟概率 p

当车辆处于减速缓冲路段 l 上,

$$p = \begin{cases} p_1, & v(t) > v_{\text{safe}}, \\ p_2, & \text{其他}. \end{cases}$$

2) 加速过程

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

3) 确定性减速过程

$$v_n(t) \rightarrow \min(v_n(t), \text{gap}_n(t)). \quad (2)$$

4) 以概率 p 随机减速过程

$$v_n(t) \rightarrow \max(v_n(t) - 1, 0). \quad (3)$$

5) 急减速过程

当车辆处于弯道路段上, 而且车速 $v(t) > v_{\text{safe}}$ 时, 为了安全拐弯必须要减速, 即

$$v_n(t) \rightarrow \min(v_n(t), v_{\text{safe}}). \quad (4)$$

6) 位置更新过程

$$x_n(t) \rightarrow x_n(t) + v_n(t). \quad (5)$$

这里的 $v_n(t)$ 和 $x_n(t)$ 分别为车道上第 n 辆车在 t 时刻的速度和位置, $x_{n+1}(t)$ 则是车道上第 $n+1$ 辆车在 t 时刻的位置, $gap_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t) - 1$ 是 t 时刻第 n 辆车与前方紧邻车辆 (第 $n+1$ 辆车) 之间的空格数, v_{safe} , v_{max} 和 p 分别表示车辆拐弯最大安全速度、车辆所能达到的最大速度和车辆的随机延迟概率, 当 $p = p_1$ 时, 其延迟概率较大, 当 $p = p_2$ 时, 其延迟概率较小. 本文模型规则与 NaSch 模型规则相比多了两个步骤: 确定车辆的延迟概率 p 和急减速过程.

5. 数值模拟与分析

将道路视为长度为 L 的一维离散格点链, 每一个格点在每一时刻或为空或被一辆车占据. 数值模拟的实际道路长度为 7.5 km, 用 1000 个格子来表示, 相当于每个格子的大小对应的实际道路长度是 7.5 m, 将车辆随机地分布在 1000 个格点上, 采用周期边界条件. 每一辆车的状态由其本身的速度 v 表示, $v \in [0, v_{\text{max}}]$, v_{max} 为车辆的最高速度, 取 $v_{\text{max}} = 5 \text{ cell/s}$, 对应的实际车速为 135 km/h, N 是分布在道路 L 上的总车辆数, 则车辆密度、车流量的计算公式如下.

车辆密度

$$\rho = \frac{N}{L}.$$

平均速度

$$\bar{v}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n(t) \text{ (时步平均)},$$

$$\bar{v}(T) = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_0+T-1} \bar{v}(t) \text{ (时间平均)},$$

$$\bar{v} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \bar{v}(T) \text{ (样本平均)}.$$

平均车流量

$$J = \rho \bar{v}.$$

数值模拟时, 选取拐弯前的减速缓冲路段长度 l

$= 8$, 即 60 m 长. 当车辆处于该路段上且车速满足 $v(t) > v_{\text{safe}}$, 则车辆的随机延迟概率取 $p_1 = 0.8$; 而其他情况下, 车辆的随机延迟概率取 $p_2 = 0.25$. 每一次运行取 4×10^4 时间步进行数值模拟, 为消除暂态的影响, 开始的 $t_0 = 2 \times 10^4$ 时间步不进行统计, 以后的 $T = 2 \times 10^4$ 的每一时间步对速度 $v_n(t)$ 进行统计, 将经过 2×10^4 时间步的速度对时间求平均, 这样就得到每一次运行的平均速度. 为消除初始位形的随机性对结果的影响, 再对 20 个样本取平均, 即基本图上的每一个点是 20 次运行的平均值.

5.1. 弯道的曲率半径对交通流的影响

为研究具有不同曲率半径的弯道对道路交通流的影响, 取定弯道弧长 s 、摩擦系数 μ , 改变曲率半径 r 进行数值模拟, 模拟得到的基本图如图 4 所示. 图中显示的交通流量随密度的变化关系与 NaSch 模型的不同, 即出现了一个流量不随密度变化的平台区域. 流量平台区域的出现是符合实际交通的, 这是因为在车辆密度不是很小也不是很大的情况下, 其车辆间的相互作用较大, 而且车辆又能保持相对较大的速度, 在遇到弯道时, 由于受到拐弯安全速度 v_{safe} 的限制而进行减速运动, 此时弯道就可视为一个“瓶颈”, 系统中提前出现了时停时走交通波现象, 从而引起整个道路通行能力下降, 流量也就减小. 车辆速度的大小取决于拐弯安全速度 v_{safe} 的大小, 因而流量平台区域的流量值还会随着弯道曲率半径的增大而增大, 因为当曲率半径 r 很大时, v_{safe} 也会增大, 若拐弯安全速度 v_{safe} 大于或等于车辆所能达到的最大速度, 那么弯道的“瓶颈”作用也就消失, 如图 4 中对应 $r = 100, 300 \text{ m}$ 时的流量密度关系

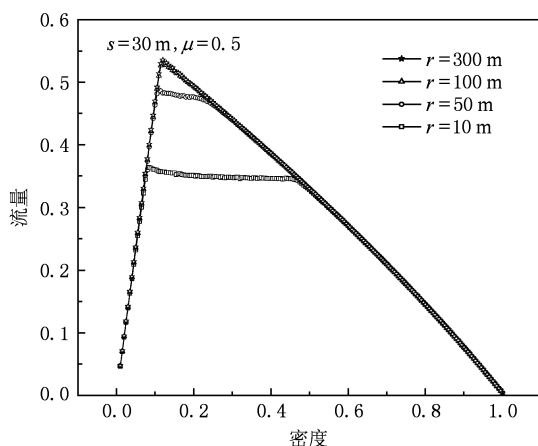


图 4 $s = 30 \text{ m}, \mu = 0.5$, 不同半径 r 的基本图

曲线. 从图中还看到了流量与密度的关系在密度很小或者很大时呈线性增大或线性减小, 这是由于在低密度区域内, 车辆处于自由行驶的高速状态, 车辆之间的相互作用又很小, 车辆过了弯道仍能保持自由状态, 因此流量还能保持线性增加; 而在高密度区域内, 车辆之间的相互作用非常大且速度都很小, 车速因小于拐弯安全速度 v_{safe} 而使弯道对车流产生不了限速作用, 因此这个密度区域的流量只由车流密度决定, 它随着密度的增大而线性减小. 图 5 是弯道及其前后 200 个格子的时空演化斑图, 横轴

表示车辆的位置, 纵轴表示时间, 以黑点表示车辆的位置, 白点表示空格点. 图中明显的黑色区域表示车辆阻塞区域, 即局部阻塞现象; 灰色区域表示车辆畅通, 即车辆自由运动. 由时空演化斑图可看出, 车道上出现了局部阻塞现象, 且阻塞向后(上游)方向传播, 不连续的阻塞区域体现了道路上车辆时停时走的交通波现象, 时空演化斑图同样能说明了基本图的变化趋势, 这说明了弯道曲率半径是影响交通的一个重要因素, 弯道曲率半径越小, 其对交通的“瓶颈”作用就越明显.

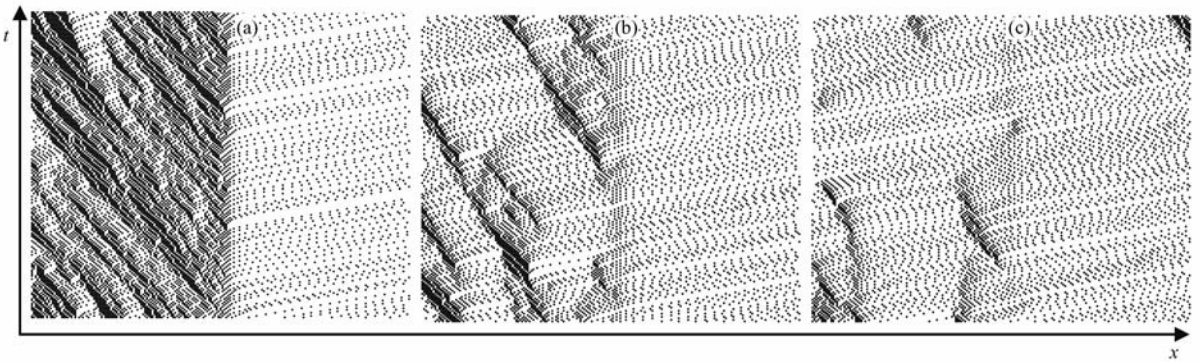


图 5 弯道前后 200 个格子的时空演化斑图. $s=30\text{ m}$, $\mu=0.5$, $\rho=0.2$ (a) $r=10\text{ m}$; (b) $r=50\text{ m}$; (c) $r=100\text{ m}$

5.2. 弯道的弧长对交通流的影响

为研究具有不同弧长的弯道对道路交通流的影响, 取定弯道曲率半径 r 、摩擦系数 μ , 而改变弯道的弧长 s 进行数值模拟, 模拟得到的基本图如图 6 所示. 图中显示的交通流量随密度的变化关系与 NaSch 模型的也不同, 即出现了一个类似图 4 的流量不随密度变化的平台区域. 引起此交通现象的原因也是由于拐弯安全速度 v_{safe} 的限速影响, 并且随

着弯道弧长的增长, 交通流量会降低. 从图 7 所给出的时空演化斑图中也可以观察到时停时走交通波现象, 说明了弯道弧长的大小也是影响交通的一个重要因素, 弯道弧长的增大会使交通拥堵更为明显.

5.3. 弯道路面摩擦系数对交通流的影响

轮胎与路面间的摩擦力是汽车驱动、制动及转向的动力来源, 它不仅决定着道路的通行能力, 还直接影响着车辆行驶的安全性, 因此摩擦系数 μ 是公路工程与车辆工程设计中的一项重要技术参数. 路面设计对摩擦系数 μ 的要求: 对于高速公路、一级公路, 沥青路面 $\mu \geq 0.41$, 水泥混凝土路面 $\mu \geq 0.62$, 其它水泥混凝土路面 $\mu \geq 0.52$; 路面养护要求(优秀), 沥青路面 $\mu \geq 0.38$, 水泥混凝土路面 $\mu \geq 0.62$ ^[10]. 随着路面服务期的延长, 摩擦系数将逐渐减小, 而且雨雪天气对路面摩擦系数有很大影响: 雨天路面摩擦系数只有 0.3—0.4; 雪天路面和结冰路面的摩擦系数则在 0.2 以下^[12], 交通事故数将随着路面摩擦系数的降低而增加. 为研究具有不同摩擦系数 μ 的弯道对道路交通的影响, 取定弯道曲率半径 r 、弯道弧长 s , 改变摩擦系数 μ 进行数值模拟,

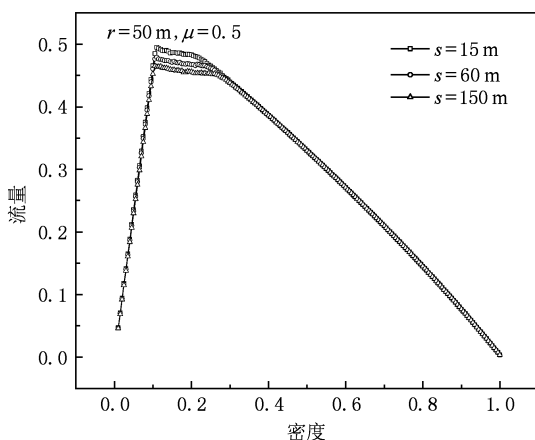


图 6 $r=50\text{ m}$, $\mu=0.5$ 不同弧长的基本图

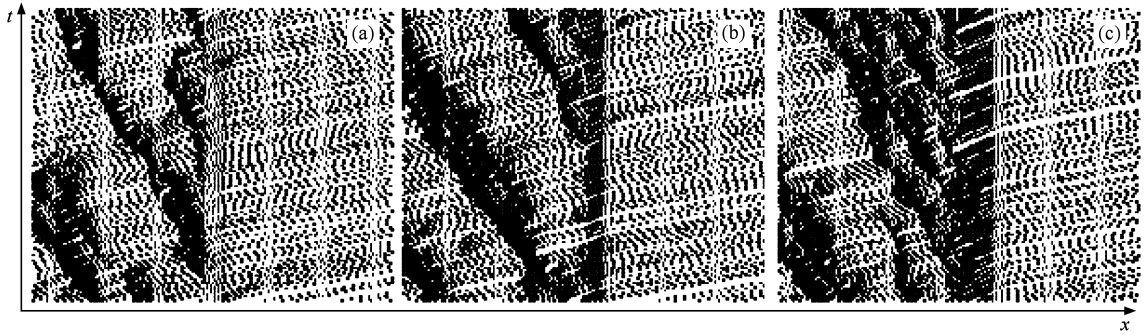


图7 弯道前后 200 个格子的时空演化斑图. $r=50\text{ m}, \mu=0.5, \rho=0.2$ (a) $s=15\text{ m}$; (b) $s=60\text{ m}$; (c) $s=150\text{ m}$

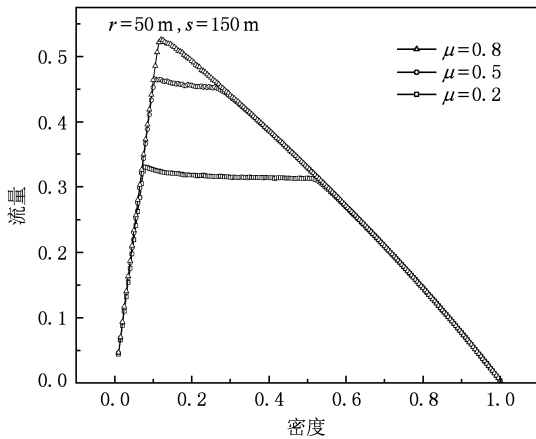


图8 $r=50\text{ m}, s=150\text{ m}$, 不同摩擦系数的基本图

模拟得到的基本图如图 8 所示. 与前面两种情况类似, 即出现了一个流量不随密度变化的平台区域, 基本图显示了交通流量随着路面摩擦系数的增大而增大. 图 9 给出的时空演化斑图也进一步表明了交通拥堵随摩擦系数增大而逐渐消散的过程. 以上模拟结果也是符合实际交通的, 因为根据拐弯安全速度公式 $v_{\text{safe}} = \sqrt{\mu gr}$ 可得, 当摩擦系数 μ 增大, 拐弯安全速度 v_{safe} 也相应地增大, 因而弯道的“瓶颈”效应就会减弱, 这样就可以提高道路的通行能力. 图 10 为在相同车流密度下 ($\rho = 0.2$), 一段直路的时空演化斑图. 与弯道路段时空演化斑图对比可知, 不管是直道还是弯道, 都会出现局部拥堵现象, 且拥

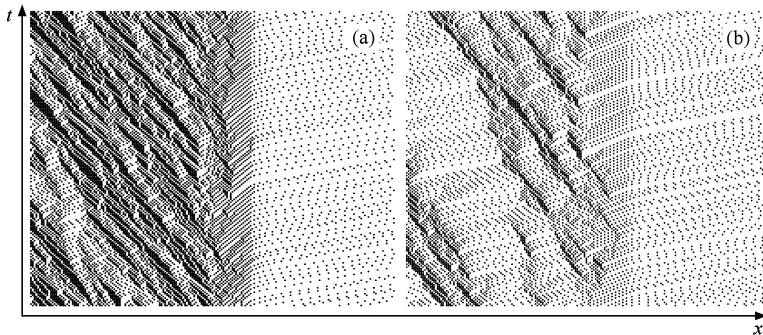


图9 弯道前后 200 个格子的时空演化斑图. $s=150\text{ m}, r=50\text{ m}, \rho=0.2$ (a) $\mu=0.2$; (b) $\mu=0.5$

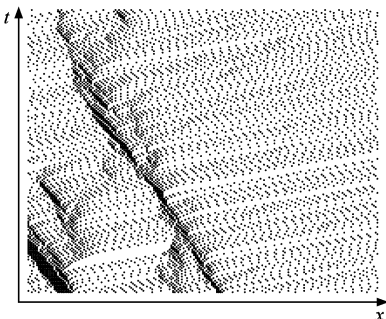


图10 密度 $\rho=0.2$, 一段直路的时空演化斑图

堵向上游方向传播, 但有弯道的路段, 局部阻塞区域明显多于直道的阻塞区域, 说明弯道处很容易发生交通阻塞现象, 弯道的“瓶颈”效应使得道路通行能力下降, 流量降低.

6. 结 论

在交通流研究中, 特殊路况的研究是非常有意义也是非常重要的. 本文给出了连接主干道的弯道

结构,并应用元胞自动机模型研究弯道的曲率半径 r 、弧长 s 及其路面的摩擦系数 μ 对道路交通流的影响. 研究表明弯道的曲率半径 r 、弧长 s 及弯道处路面的摩擦系数 μ 对道路交通的影响都很大. 在 r, s 及 μ 三个量中取定其中的两个量,改变另一个量的大小就可以研究它对道路交通的影响,给出了相应的基本图和时空演化斑图. 数值模拟所得的基本图上出现一个流量不随密度变化的平台区域,所得的时空演化斑图也显示了各种因素对道路交通拥堵的影响情况. 对模拟结果进行分析可以知道,弯

道的曲率半径和摩擦系数越小、弯道弧长越长,则交通拥堵越明显,交通流量也就越小. 因此,适当地增大弯道处的曲率半径和摩擦系数,并尽量地减小弯道弧长的长度,可以尽快的消散弯道处的交通拥堵,减轻主干道交通的负荷,同时还可以减少弯道处交通事故的发生率. 以上得出的结论对更恰当地设置弯道结构提供一定的参考价值.

本文的顺利完成得到盘佳秀的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢

-
- [1] Chen X Y 2005 *An Tutorial on University Physics* (Volume 1) (Beijing: Tsinghua University Press) p17—18 (in Chinese) [陈信义 2005 大学物理教程(上册)(北京:清华大学出版社)第17—18页]
- [2] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I* (France) **2** 2221
- [3] Biham O, Middleton A, Levine D 1992 *Phys. Rev. A* **46** R6124
- [4] Barlovic R, Santen L, Schadschneider A, Schreckenberg M 1998 *Eur. Phys. J. B* **5** 793
- [5] Chowdhury D, Santer L, Schadschneider A 2000 *Phys. Rep.* **329** 199
- [6] Lei L, Xue Y, Dai S Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2121 (in Chinese) [雷 丽、薛 郁、戴世强 2003 物理学报 **52** 2121]
- [7] Xiao R J, Kong L J, Liu M R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 740 (in Chinese) [肖瑞杰、孔令江、刘慕仁 2007 物理学报 **56** 740]
- [8] Kang R, Peng L J, Yang K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4514 (in Chinese) [康 瑞、彭莉娟、杨 凯 2009 物理学报 **58** 4514]
- [9] Xue Y, Dong L Y, Dai S Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 445 (in Chinese) [薛 郁、董力耘、戴世强 2001 物理学报 **50** 445]
- [10] Zheng M L, Chen S F, Wang X C, Wang B G, Feng Z A, Gao J L 2005 *Journal of Chang'an University* (Natural Science Edition) **25** 9 (in Chinese) [郑木莲、陈拴发、王选仓、王秉纲、冯治安、高建立 2005 长安大学学报(自然科学版) **25** 9]
- [11] Pan J X, Xue Y, Liang Y J, Tang T Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4169
- [12] Li W X 2005 *The control of highway traffic in the bad weather* (in Chinese) [李万新 2005 恶劣天气条件下高速公路的交通管制 <http://www.aqtd.cn/jtaq/HTML/8949.html>]

Study on traffic flow affected by the road turning^{*}

Liang Yu-Juan^{1)†} Xue Yu²⁾

1) (*Department of Physics and Electronics Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China*)

2) (*Institute of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China*)

(Received 8 October 2009; revised manuscript received 26 November 2009)

Abstract

Base on the NaSch model, an improved single-lane cellular automaton traffic flow model for especial road is proposed via considering effects of curvature radii, arc length and friction factor on the vehicle movement. By numerical simulation for the traffic flow with different curvature radii, arc length and friction factor, it is found that our improved model can reflect accurately the influence of special sections of a road on the running vehicles, meanwhile visualize the complex nonlinear phenomenon traffic waves of alternate running and stopping as in actual traffics. The reflecting phenomenon in actual traffics indicates that traffic accidents and congestion can be avoided by increase the curvature radii, friction factor of road turning, the capacity of road can be enhanced also.

Keywords: traffic flow, cellular automation, road turning, centripetal movement

PACC: 0550, 0313, U491

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10662002, 10865001), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB705500), the Graduate Student Innovation Program of Guangxi Zhuang Autonomous Region (Grant No. 105930903077).

[†] E-mail: yujuan2267@yahoo.cn