

基于动态地场和元胞自动机的自行车流建模*

杨晓芳^{1)†} 茅威¹⁾ 付强²⁾

1) (上海理工大学交通系统工程系, 上海 200093)

2) (同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092)

(2013年8月22日收到; 2013年9月20日收到修改稿)

针对现有自行车流模型对车辆间作用考虑不足的问题, 在原多车道元胞自动机模型的基础上引入动态地场, 在模型中纳入了排斥力, 并充分考虑了前车速度对后车行驶的影响, 体现了自行车的灵活性等特征, 提出了换道成本的概念并建立了新的基于比较交通环境的换道规则. 数值仿真结果表明: 1) 该模型能更准确地描述自行车流, 反映自行车流的特征, 得到的数据符合实际; 2) 单位车道宽度的通行能力随着车道数的增加有小幅下降; 3) 激进的驾驶风格使得换道次数大幅增加, 通行能力下降.

关键词: 自行车流, 元胞自动机, 动态地场, 仿真

PACS: 05.50.+q, 45.70.Vn, 05.65.+b

DOI: 10.7498/aps.62.240511

1 引言

自行车由于其灵活、方便、便宜、无污染等特点, 长期以来是我国居民出行使用的主要交通工具之一, 因而我国自行车保有量巨大, 素有“自行车王国”之称. 由于机非交通流之间存在相互影响, 对于自行车流的研究无疑是促进我国混合交通管理进步的重要一环, 也一直是学者们关注的热点. 通过对自行车流进行建模, 模拟其运动规律, 对于自行车道的设计以及交叉口的管理与控制都具有重要意义.

元胞自动机模型 (cellular automata, CA) 由于其能够有效地模拟交通流的运行, 被广泛应用于微观交通流的研究. 自从 Nagel-Schreckenberg (NS) 模型^[1] 提出后, 国内外众多学者在其基础上进行规则改进, 模拟了各种机动车、非机动车以及行人流^[2-11]. 在非机动车流方面, 现有的元胞自动机模型主要包括传统的多车道自行车流模型^[12] 以及基于多值元胞自动机模糊了换道过程的自行车流模型^[13-15] 等.

然而, 张晋等^[12] 提出的多车道元胞自动机模

型仅仅考虑了自行车灵活, 超车相对容易的特点, 对自行车流的模拟还不够完善, 主要体现在以下几点: 第一, 由于自行车是人力驱动, 骑车者暴露在外, 因而自行车具有一些行人的特征, 如陌生的骑车人之间喜欢保持一定距离, 部分骑车者为了避免聚堆, 愿意牺牲一些速度; 第二, 未充分考虑车辆速度对后方车流跟车的影响; 第三, 仅仅根据车辆与前方以及相邻车道前方车辆的距离来制定换道规则, 而未曾考虑前方与周围车辆的状态, 包括前方车辆速度, 拥堵程度等. 而 Jia 等^[14] 提出的多值元胞自动机模型考虑到自行车道并无明确的车道划分, 模糊了换道规则. 然而这一类型的模型忽视了道路中车辆的相互影响, 由于骑车人的行人特征, 以及自行车道上行驶的灵活性, 模型中忽略这些因素会造成较大误差, 并且这一模型无法对自行车流及其驾驶者的微观行为进行有效的研究.

Burstedde 等^[16] 2001 年提出了称为地场模型 (floor field model) 的一类元胞自动机模型用于模拟行人的行为, 众多学者在其基础上对元胞尺寸、路径选择等方面进行了改进^[17-20]. 本文为了改进现有模型的不足, 体现自行车流的特点, 引入动态地场的概念, 将道路上非机动车车辆之间的互相影响

* 国家自然科学基金 (批准号: 51008196, 51308409) 和上海市一流学科 (系统科学) (批准号: XTKX2012) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: herryfuyang@126.com

互相作用转化为地场的变化, 并赋予车辆在地场上新的运行规则, 结合多车道元胞自动机建立了新的自行车流模型. 通过车辆对各个元胞地场强度的影响模拟了骑车人之间的排斥力, 充分考虑了跟车时车辆速度对后方车辆驾驶员驾驶行为的影响, 建立了新的基于交通环境比较的换道超车规则, 并以此模型为基础, 探究和揭示自行车流的特点和规律.

2 模型的建立

在通常情况下, 驾驶员的驾驶行为 (包括加速减速换道等) 主要是出于速度、舒适度、安全三个方面的综合考虑. 现有的 CA 模型主要是 NS 模型的改进, 主要是基于速度最大化考虑以及最基本的安全考虑不能够很好地反映驾驶者综合分析道路交通状况做出驾驶行为决策的情况.

本文通过引入地场这一第三方, 将道路上车辆间的作用, 包括排斥力、慢车对后车造成的减速效应等转化为对地场的影响, 通过地场的变化来对驾驶者的行为做出更符合实际的模拟.

2.1 元胞的参数

本文借鉴文献 [12] 所建立的单向自行车 CA 模型的基本参数, 即元胞长度取 2.0 m, 宽度取 0.8 m, 所占面积为 1.6 m², 纵向最大速度为 8 m/s, (即相当于 4 个元胞长度 (4 cells/s)), 横向速度最大为 1 cell/s. 在本文中设定机动车与非机动车以及非机动车与行人之间有物理分隔, 因此不考虑机动车与行人对研究主体非机动车流的干扰, 横向有明确边界, 纵向单向行驶, 周期边界, 即道路上车辆总数不变. 元胞邻域与原有模型有所不同, 如图 1 所示.

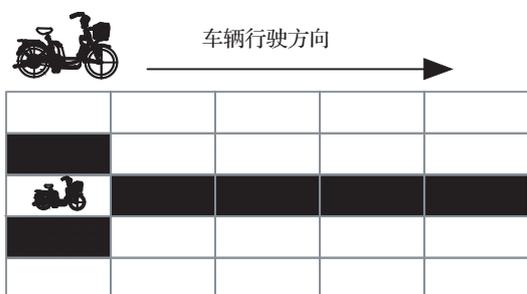


图 1 元胞邻域

2.2 地场变化及车辆在其中的运行规则

基于 NS 模型的各种衍生 CA 模型在描述较为

复杂的交通现象的车辆间相互作用时, 往往需要比较烦琐的规则. 本文通过引入地场, 将各种作用通过数值的变化显示, 使模型的表达方式更为简单. 以下将介绍引入的地场变化规则.

2.2.1 基本规则

类似于电磁场, 假设道路上存在地面场 (以下简称地场), 方向为车辆前进方向, 平行于道路, 车辆在地场的作用下行驶. 现赋予整个地场的初始场强 E 如图 2 所示 (假设道路为从左往右的单向行驶). 本模型中地场的初始场强 E 并不具有物理意义, 而是沿地场方向相邻元胞的场强之差具有物理意义, 代表车辆从上游元胞前进到相邻下游元胞的概率, 为保证在无干扰情况下车辆以 100% 的概率前进, 沿地场方向初始场强依次相差 1 (如图 2 中所示). 而在实际道路中, 车辆之间存在相互作用, 相互干扰, 在本模型中反映为车辆对周围地场造成影响, 造成周围元胞场强变化, 可类比于电场中放置电荷对电场造成影响, 而影响的大小, 范围取决于车辆的速度, 与后车距离等. 各元胞的实际场强等于初始场强与道路上各车辆对本元胞场强影响的叠加, 即和.

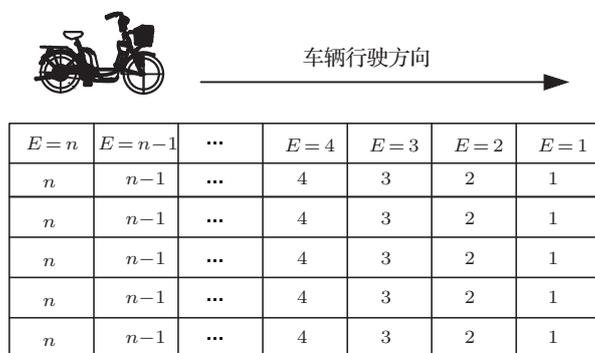


图 2 初始地场场强分布

2.2.2 地场对纵向行驶的影响

2.2.2.1 行驶规则

纵向移动时, 车辆移动到下游相邻元胞的概率为所在元胞与目标元胞的场强差, 若场强差大于等于 1, 则移动概率为 100%. 如图 3 所示, 元胞 $i + 2$ 存在一辆车 ($v \geq 2$ cells/s), 在一个时间步内, 车辆从元胞 $i + 2$ 移动到元胞 $i + 1$ 的概率为 $p_1 = \Delta E_1 = E_{i+2} - E_{i+1}$, 从元胞 $i + 2$ 移动到元胞 i 的概率为 $p_2 = \Delta E_1 \cdot \Delta E_2 = (E_{i+2} - E_{i+1})(E_{i+1} - E_i)$, 依此类推.

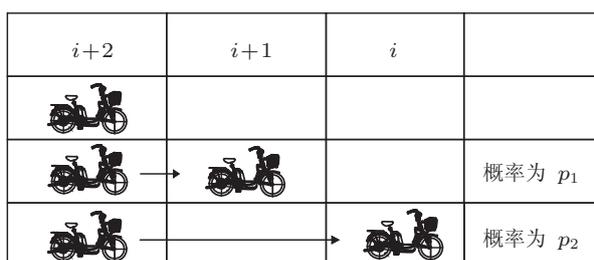


图3 行驶规则示例

2.2.2.2 速度对地场的影响

如引言所述, 现有的 CA 模型主要考虑了驾驶员追求更大速度的倾向, 但是, 安全同样是驾驶员驾驶行为决策中考虑的重要因素. 当前方车辆的速度慢于后车时 (相等则无影响), 会对后车驾驶员的驾驶行为造成影响, 在此情况下, 部分后车驾驶员会因为安全考虑或者寻找换道机会以获取更好的行驶环境而选择不同程度的减速行为, 而不会再一味追求更高速度. 且后车与前车的速度差 Δv ($\Delta v > 0$) 越大, 对后车速度的影响越大, 前车速度大于等于后车则没有影响. 下面, 本文将通过速度对地场的影响来反映这一现象. 因为在本文所使用的元胞自动机中, 最大速度为 4 cells/s, 所以规定, 所有车辆最多对后方四个元胞的场强造成影响 (如图 4(a) 所示, 标注区域为场强受元胞 i 中车辆影响的元胞), 前车对场强的影响到后车前一元胞结束, 也就是说, 每辆车的速度只对其后一辆车造成影响 (如图 4(b) 所示, 标注区域为场强受元胞 i 中车辆影响的元胞). 如在元胞 i 中存在车辆, 那么纵向移动时, 后方受影响元胞场强变化由 (1)–(3) 式确定.

$$\Delta E = \beta \cdot \gamma \cdot \Delta v, \quad (1)$$

$$\beta = f(v), \quad (2)$$

$$\gamma = g(\text{dis}), \quad (3)$$

其中 ΔE 为场强变化量; β 为速度影响因子, 与前车速度为负相关关系, 即前车速度越小, 后方元胞所受影响越大; γ 为距离影响因子, 与前车距离为负相关关系, 即距前车越远, 受影响越小; Δv 为后车与前车的速度差, 规定 $\Delta v \geq 0$, 若 $\Delta v < 0$, 则令其为 0, 即当后车速度小于前车时, 后车不受前车影响.

需要说明的是, 本节所述车辆速度对地场的影响可以理解为车辆对正后方车辆的排斥力, 由于其相对比较复杂, 故在此节单独列出分析.

下面以图 4(b) 中情况为例说明此种影响的效果. 设元胞 i 中车辆速度为 2 cells/s, 元胞 $i+4$ 中车

辆速度为 4 cells/s, 元胞 i 初始场强 a , 则后方元胞初始场强依次为 $a+1, a+2, a+3, a+4, a+5, \dots$. 若不考虑速度影响, 按照经典的 NS 规则, 不考虑随机慢化的情况下, 后车在下一时间步速度由 4 cells/s 变为 3 cells/s, 将从 $i+4$ 元胞行驶到 $i+1$ 元胞, 在本文按照地场规则前进的算法中, 从 $i+4$ 前进到 $i+1$ 的概率亦为 $p = (E_{i+3} - E_{i+2})(E_{i+3} - E_{i+2})(E_{i+2} - E_{i+1}) = 1 \times 1 \times 1 = 100\%$. 下面考虑速度影响, 由于 $\Delta v = 3 - 2 > 0$, $i+1, i+2, i+3$ 元胞受前方车辆影响, 地场变化, $\Delta E \geq 0, E'_{i+3} = f(2) \cdot g(3) \cdot 2 + E_{i+3}, E'_{i+2} = f(2) \cdot g(2) \cdot 2 + E_{i+2}, E'_{i+1} = f(2) \cdot g(1) \cdot 2 + E_{i+1}, \Delta E_1 = E_{i+4} - E'_{i+3} \leq 1, \Delta E_2 = E'_{i+3} - E'_{i+2} \leq 1, \Delta E_3 = E'_{i+2} - E'_{i+1} \leq 1$ 按照地场行驶规则, 后车从 $i+4$ 前进到 $i+3$ 的概率为 $p_1 = \Delta E_1$, 而进一步前进到 $i+2$ 的概率为 $p_2 = \Delta E_1 \cdot \Delta E_2$, 前进到 $i+1$ 的概率为 $p_3 = \Delta E_1 \cdot \Delta E_2 \cdot \Delta E_3$ 易得 p_1, p_2, p_3 均小于 1, 即后车速度在安全速度 3 cells/s 的基础上, 可能由于前方慢车的影响进一步降低为 2, 1, 0 cells/s, 由于同速车是不受影响的, 显然, 如果在这一情况下速度降低到前方车辆速度 2 cells/s 以下是不合实际的, 所以规定由于地场影响带来的减速最多使得车辆速度降低到与前车相等.

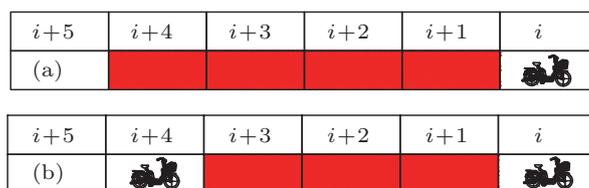


图4 速度对地场的影响 (a) 最大影响范围示意图; (b) 实际情况影响范围示意图

2.2.2.3 车辆间存在排斥力的影响

同理, 除去上述的速度, 安全因素、舒适度也是驾驶员决策的重要考虑因素之一. 根据观察可以看到, 陌生的非机动车驾驶员之间在有条件的情况下, 趋向于保持一定的距离, 而不是聚堆行驶, 表现为一种排斥力. 同理, 本文通过车辆对周围地场的作用, 来描述这一现象. 然而对于车辆来说, 向前行驶始终是其主要目的, 因此, 在高密度条件下, 驾驶员为了缩短自己的旅行时间, 不得不接受陌生人之间的排斥, 或者说, 随着道路车辆密度的增加, 排斥力起的作用在逐渐减小, 所以排斥力对于场强的影响应当是随着道路车辆密度的增加而减小.

故纵向移动时, 车辆对周围元胞造成排斥力 (如图 5 标注部分所示), 对地场造成的影响由 (4)—(6) 式确定.

$$\Delta E_u = a \cdot f(\text{density}), \quad (4)$$

$$\Delta E_f = b \cdot f(\text{density}), \quad (5)$$

$$\Delta E_g = c \cdot f(\text{density}), \quad (6)$$

其中, ΔE_u 为与车辆相邻元胞场强变化量 (图 5 中 I 区域); ΔE_f 为与车辆斜相邻元胞场强变化量 (图 5 中 II 区域); ΔE_g 为前方元胞有车时, 前方元胞场强变化量 (图 5 中 III 区域); a, b, c (均大于 0) 为排斥力因子; $f(\text{density})$ 为关于密度的函数, 与密度成负相关.

而车辆对后方元胞的排斥力与车辆速度等相关, 已在 2.2.2.2 节单独分析.

这里, 需要特别说明为何 ΔE_g 只在前方元胞有车时存在. 前方若为空元胞, 而车辆所在元胞仍然对其场强造成影响, 即 ΔE_g 存在, 则前方元胞场强增加, 减小了所在元胞与前方元胞的场强差, 车辆前进概率减小, 显然, 这意味着车辆对自身产生了排斥力, 与事实不符. 而前方元胞存在车辆时, 根据实际经验, 后方车辆的存在会促使其离开所在元胞, 即排斥力存在, 故 ΔE_g 存在.

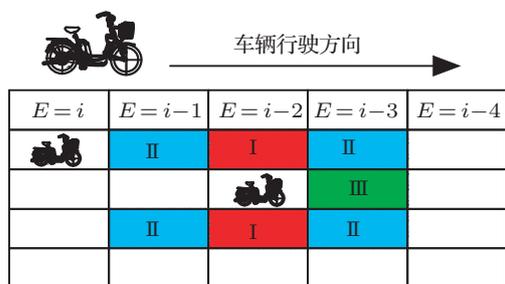


图 5 排斥力的影响

现以图 5 中的情况说明排斥力对车辆行驶造成的影响. 图 5 中存在前后两辆车, 各列元胞初始场强如第一行所示. 若无前车存在, 根据 2.2.2.1 节中的运行规则, 若速度允许, 后车可以以 $p = \Delta E = i - (i - 1) = 100\%$ 的概率进入下游相邻元胞; 若存在前车, 由于后车下游相邻元胞受到前车排斥力的影响, 场强变为 $E = i - 1 + \Delta E_f$, 故后车前进到下游相邻元胞的概率变化为 $p = i - (i - 1 + \Delta E_f) = 1 - \Delta E_f$, 由于 $\Delta E_f > 0$, $p < 100\%$, 即图中后车由于前车排斥力的影响, 前进到下游相邻元胞的概率减小. 当前方有众多车辆时, 排斥力

效应更为明显, 这与实际情况中自行车之间避免扎堆的情况符合.

2.2.3 换道规则

原有的 CA 模型仅仅考虑了与本车与前车距离对于换道判断的影响, 而没有考虑速度、舒适性等, 而多值元胞自动机模型虽然基于自行车的特点淡化了换道这一概念, 但这样就不利于研究自行车流以及驾驶员的微观行为, 忽略了微观行为不利于自行车流的深入研究, 不利于自行车流的管理. 本文基于以上考虑, 提出了新的换道规则.

2.2.3.1 换道判定规则

车辆换道的目的, 是为了获取更好的驾驶环境, 包括速度、安全、舒适度等等的综合考量. 换道判定时, 比较现在所占据元胞与左右相邻元胞的驾驶环境的优劣, 在本文模型中体现为场强的大小, 场强越大条件代表越恶劣. 车辆的排斥代表了行驶舒适性的考虑, 与前车距离和前车的速度代表了行驶的安全和快速的考虑 (因为前车的速度越快, 那么代表下一时间对本车所能获得的期望速度值也越快). 通过地场这一第三方, 将各种影响转变为对地场的影响, 通过场强的大小来进行换道判定.

在判定换道时, 依据下述规则分别计算车辆本身所在元胞与相邻空元胞的场强大小, 车辆在运行时选择进入场强最小, 即交通环境最好的元胞内. 若两辆车选择换道进入同一目标元胞, 因为车辆的横向速度一致, 以各 50% 的概率随机选择一辆进入.

2.2.3.2 前车速度的对地场的影响

现有的基于 CA 模型的换道条件主要考虑了前后车距离的影响, 然而前车的速度对于车辆换道后一段时间内所能获得的后续速度能够造成很大的影响, 所以前车的速度也必须纳入换道判定的条件中来. 换道判定时, 由于仅仅影响换道过程, 只涉及比较元胞的交通环境, 与速度差无关, 所以取消 Δv 的影响, 如 (7)—(9) 式所示.

$$\Delta E = \beta \cdot \gamma, \quad (7)$$

$$\beta = f(v), \quad (8)$$

$$\gamma = g(\text{dis}), \quad (9)$$

式中各字母含义与 (1)—(3) 式相同.

2.2.3.3 换道判定时, 本车与前车距离对场强的影响

如许多传统的换道模型所述, 前车与本车的距离在换道过程中起了重要的作用, 更大的距离预示着更大的安全性和更大的期望速度. 所以在换道判定中, 必定要加入距离对场强的影响 $\Delta E = l(\text{dis})$.

2.2.3.4 排斥力的影响

与纵向移动时排斥力的影响相同。

2.2.3.5 换道成本

对于驾驶者来说,换道意味着换到另外一个陌生的交通环境,新的交通环境会对驾驶者的心理带来对于未知的恐惧,本文称之为换道成本 θ 。若车辆现所在元胞与换道目标元胞场强差 $\Delta E < \theta$,则驾驶者会仍然选择保持在现在元胞,意为:若换道带来的收益小于换道成本,则不选择换道。通过调节 θ 的大小,可以模拟不同驾驶风格的驾驶员的行为。

3 模型的仿真模拟与分析

3.1 模型更新步骤

1) 加速

$$v_n(t+1) = \min[v_n(t) + 1, v_{\max}];$$

2) 确定性减速

$$v_n(t+1) = \min[\text{gap}(t), v_n(t+1)];$$

3) 地场确定的减速

按 2.2.2 节规则执行;

4) 随机慢化

$$\text{if rand} < p, v_n(t+1) = \max[v_n(t+1) - 1, 0];$$

5) 纵向行驶位置更新

$$x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1);$$

6) 换道判定

按 2.2.3 节规则执行;

7) 横向位置更新 (换道)

$$\begin{cases} \text{if flag} = -1, & \text{lane}_n(t+1) = \text{lane}_n(t) - 1, \\ \text{if flag} = 0, & \text{lane}_n(t+1) = \text{lane}_n(t), \\ \text{if flag} = +1, & \text{lane}_n(t+1) = \text{lane}_n(t) + 1. \end{cases}$$

3.2 仿真参数

本文选取 100×5 个离散的二维格点作为道路,即 5 条车道,每条车道有 100 个元胞,每个格点对应长度为 2 m,宽 0.8 m,一个时间步长相当于 1 s,最大速度 $v_{\max} = 4 \text{ cells/s}$,相当于 8 m/s,采用周期边界,即道路上总车辆数不变,随机慢化率 $p = 0.1$ 。其余关于地场的参数标定如下:

$$\text{速度影响因子 } \beta = f(v) = (v_{\max} - v) \times 0.1;$$

$$\text{距离影响因子 } \gamma = g(\text{dis}) = \max(0, [(v_{\max} + 1) - \text{dis}] \times 0.1);$$

$$\text{排斥力影响因子 } [a \ b \ c] = [0.05 \ 0.05 \ 0.025];$$

$$\text{密度对排斥力的影响 } f(\text{density}) = 1 - \text{density};$$

$$\text{换道判定时距离影响参数 } \Delta E = l(\text{dis}) = \max(0, 0.1 \times (v_{\max} + 1 - \text{dis})).$$

3.3 仿真结果

3.3.1 与文献 [12] 中多车道 CA 模型的对比

文献 [12] 中提出了多车道自行车流 CA 模型,其元胞参数、车辆参数均与本文相同,纵向行驶采用经典的 NS 模型规则,换道条件仅考虑比较与本道和邻道前车距离。在取与本文模型相同的随机慢化 $p = 0.1$ 时,仿真得出的流量 - 车道数关系如图 6(b) 所示,车道数为 1, 2, 3, 4, 5 时,单位车道宽度通行能力分别为 2100, 2600, 2800, 2900, 3000 veh/(h·m)。而图 6(a) 给出了本文所提出模型的流量 - 车道数图,车道数为 1, 2, 3, 4, 5 时,仿真所得单位车道宽度通行能力分别为 3400, 2880, 2655, 2385, 2205 veh/(h·m)。

从趋势上看,文献 [12] 中的模型在车道数增加,即车道宽度增大时,单位宽度通行能力不断增大,但增加幅度减小,呈现上升的凹函数状;而本文模型得出结果为:随着车道数增加,单位宽度通行能力不断缩小,但缩小幅度不断减小,呈现为下降的凸函数状。类比于机动车的研究的相关研究,机动车在计算多车道道路通行能力时,通常需要在单车道道路通行能力的基础上加入折减系数,这是由于车辆换道时,在改善自己交通环境以获取更大速度的同时,影响了其他车辆的行驶,频繁的换道使得道路上的不稳定因素增加,导致车辆总体运行速度下降,从而使单车道通行能力下降。自行车亦是如此,且自行车由于其灵活性,加减速换道行为更为频繁,应当得出与机动车相似的结论。且这一结论也符合边际效益递减的原理。基于以上两点考虑,本文认为,文献 [12] 中提出的模型不够完善,本文所提出的模型得出的结论更符合实际。

从准确性看,宽度在 3 m 以上时,模型中大约为 4 车道,文献 [12] 中的模型得出的通行能力大约在 3000 veh/(h·m) 以上,而新模型得出结果为 2000—2400 veh/(h·m)。根据实测数据,一般城市有分隔自行车道的通行能力推荐值为 2100 veh/(h·m),所以,从准确性上看,本文所提出的模型亦有了较大进步。

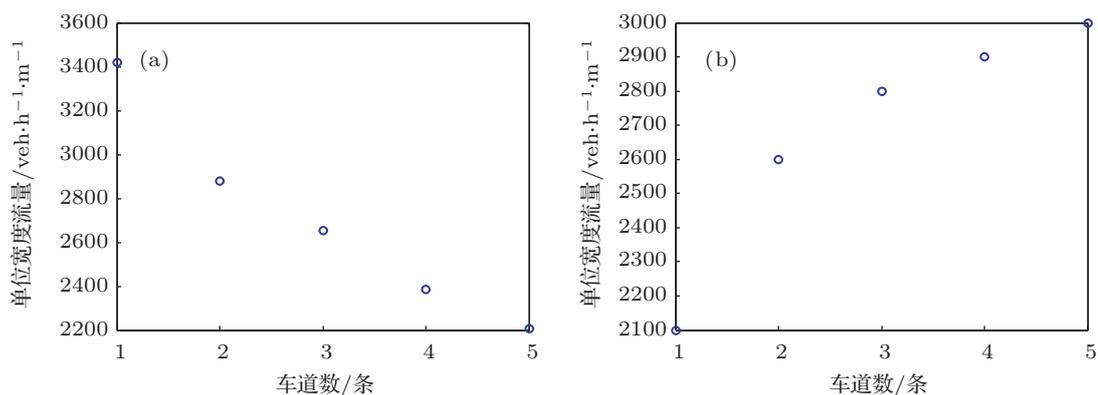


图6 流量 - 车道数关系 (a) 本文模型的流量 - 车道数关系; (b) 文献 [12] 模型流量 - 车道数关系

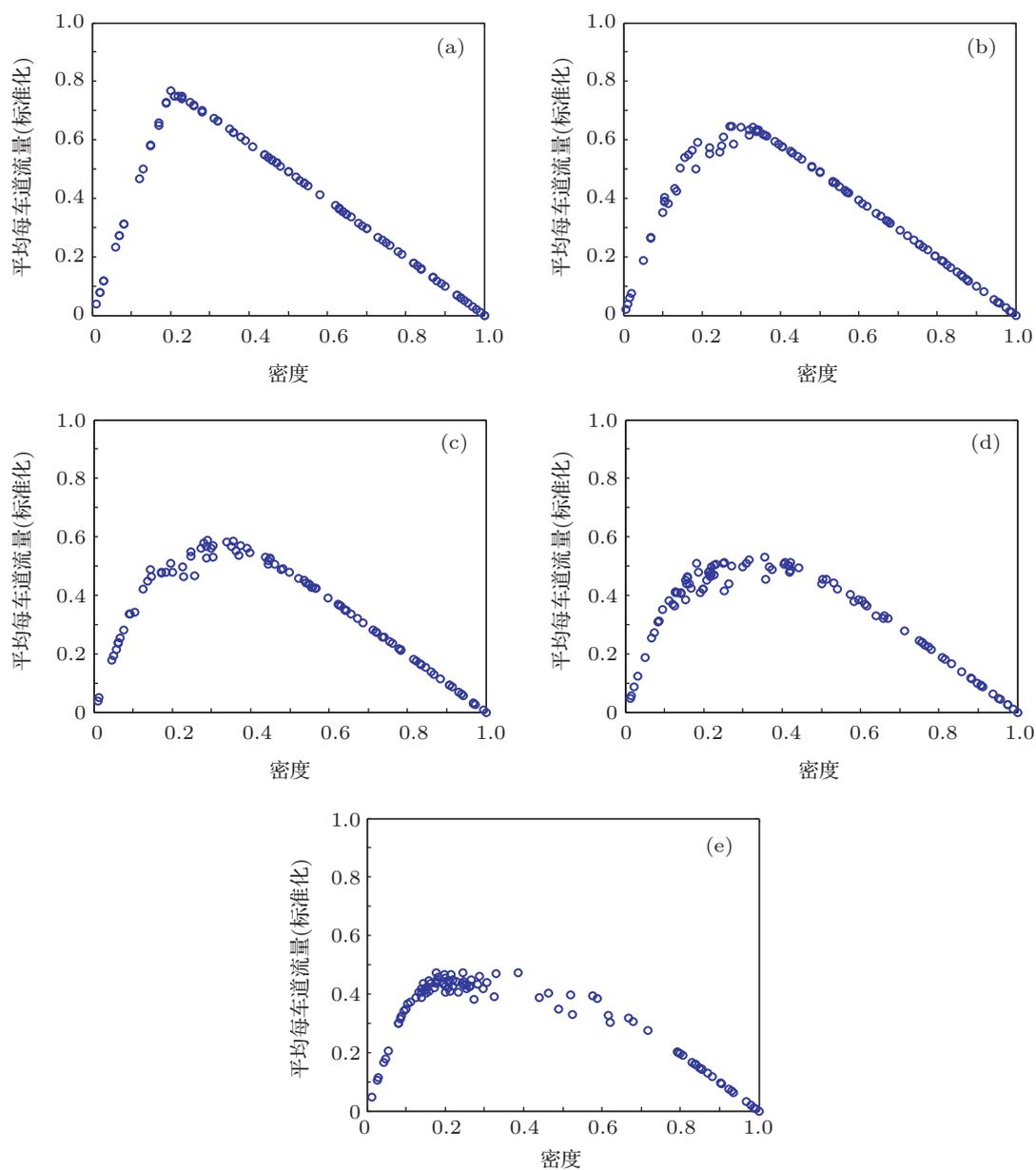


图7 不同车道数下的流量 - 密度关系 (a) 1 车道; (b) 2 车道; (c) 3 车道; (d) 4 车道; (e) 5 车道

3.3.2 基本图的分析

图 7 给出了车道数分别为 1, 2, 3, 4, 5 时的流量 - 密度基本图. 可以看出, 在不同车道数下, 通行能力均在密度为 0.2 左右到达最大. 然而, 随着车道数的增加, 车流保持在最大通行能力的密度范围逐渐增大, 从单车道时仅在密度为 0.2 左右才能达到最大通行能力 (图 7(a)) 到 5 车道时密度在 0.2—0.4 左右均能维持在最大通行能力 (图 7(e)). 这是由于随着车道数的增加, 使车辆获得的选择空间增大, 且自行车灵活, 换道简单频繁, 车辆在密度增大的情况下, 通过换道获取更快速度的可能性增大, 在宏观上表现为鲁棒性更强, 道路在更大的密度范围

内可以保持高通行能力.

图 8 给出了车道数分别为 2, 3, 4, 5 时道路上的换道率 - 密度图 (只有一条车道时, 换道率显然为 0). 从图中可以看出, 随着车道数的增加, 道路上车辆的换道率明显增大, 且增长幅度较大, 以密度为 0.2 时为例, 换道次数从 2 车道时的 0.2 次/辆左右 (图 8(a)) 增长至 5 车道时的 26 次/辆左右. 显然, 这是由于道路宽度的增加给予了车辆行驶更多的空间和选择, 车辆为了追求高速, 充分利用道路资源, 频繁选择换道. 这一实验结果也很好地佐证了 3.3.1 节中关于通行能力趋势的结论.

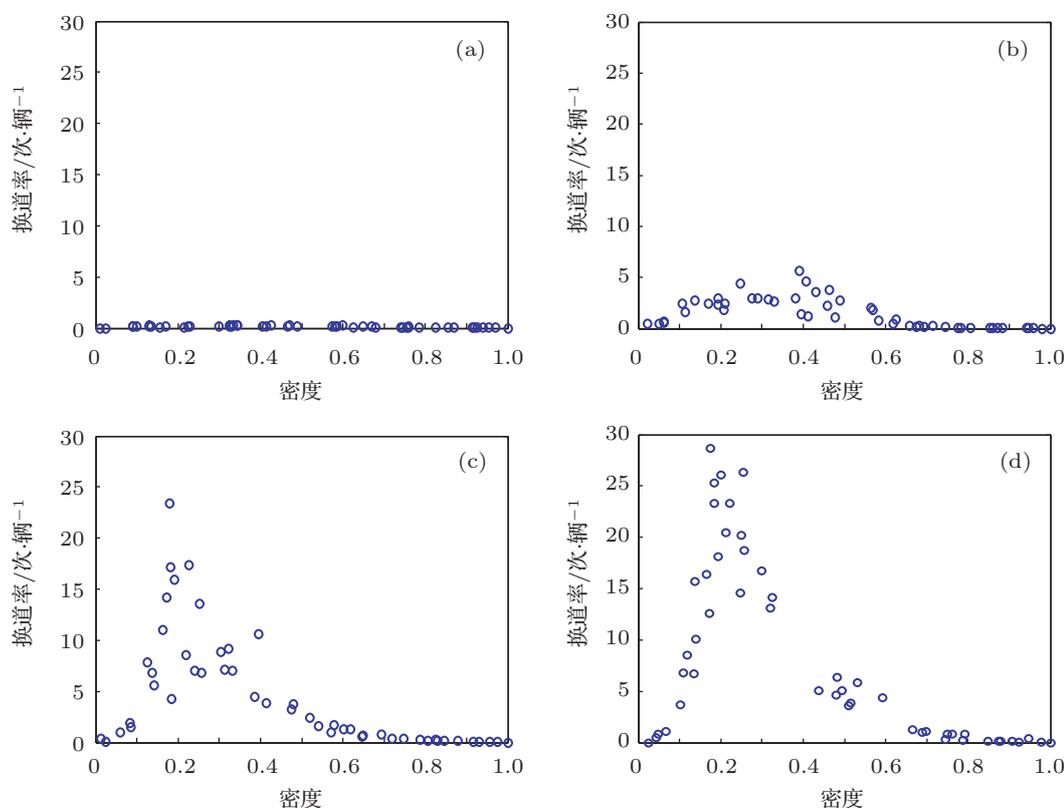


图 8 不同车道数下换道率与密度关系 (a) 2 车道; (b) 3 车道; (c) 4 车道; (d) 5 车道

3.3.3 驾驶员行为对通行能力的影响

图 9 给出了不同换道成本下 (分别为 0.07, 0.10, 0.13, 0.16) 换道次数的变化. 换道成本反映了驾驶员的驾驶风格, 因为只有当目标车道的交通环境好于所在车道的程度达到换道成本时, 驾驶员才选择换道, 所以越大的换道成本代表越偏于安全保守的驾驶风格. 从图中可以看出, 在任意换道成本下, 密度小于 0.1 及大于 0.7 时, 换道次数均非常少, 密度小时, 由于车辆较少, 车辆之间间距很大, 互相之间作用较少, 所以车辆换道行为较少, 相反, 密度很大

时, 由于车辆之间间距很小, 通常换道机会不多, 而且换道也很难取得更好的交通环境, 所以换道行为也较少, 这一点仿真结果与定性分析非常符合.

如图 9(a)—(d) 所示, 密度为 0.2, 换道成本为 0.07, 0.10, 0.13, 0.16 时, 总换道次数依次为 4000, 2000, 1300, 800 次. 可以看出随着换道成本的增大, 驾驶员的驾驶越来越保守, 换道次数迅速减少, 但减少的幅度越来越小. 说明大部分换道是在交通环境差异不大的情况下做出的. 这是由于在车流运动的过程中, 车流自身慢慢调整充分利用道路资源,

使车道上各位置的交通环境趋于平衡, 差异不大.

图 10 给出了不同换道成本下单位车道宽度通行能力的变化. 从图中可以看出, 随着换道成本的增加, 也就是驾驶员驾驶风格趋于保守时, 道路的通行能力不断增加. 这是由于随着驾驶员越来越保

守, 换道次数随之减少, 不同车道之间的车辆相互影响随之减少, 使得车流变得稳定, 平均每车道通行能力趋向于单车道道路的通行能力. 由此可以看出, 频繁的换道追求高速度虽然能使自身的旅程时间缩短, 在宏观上, 却使道路整体通行能力减小.

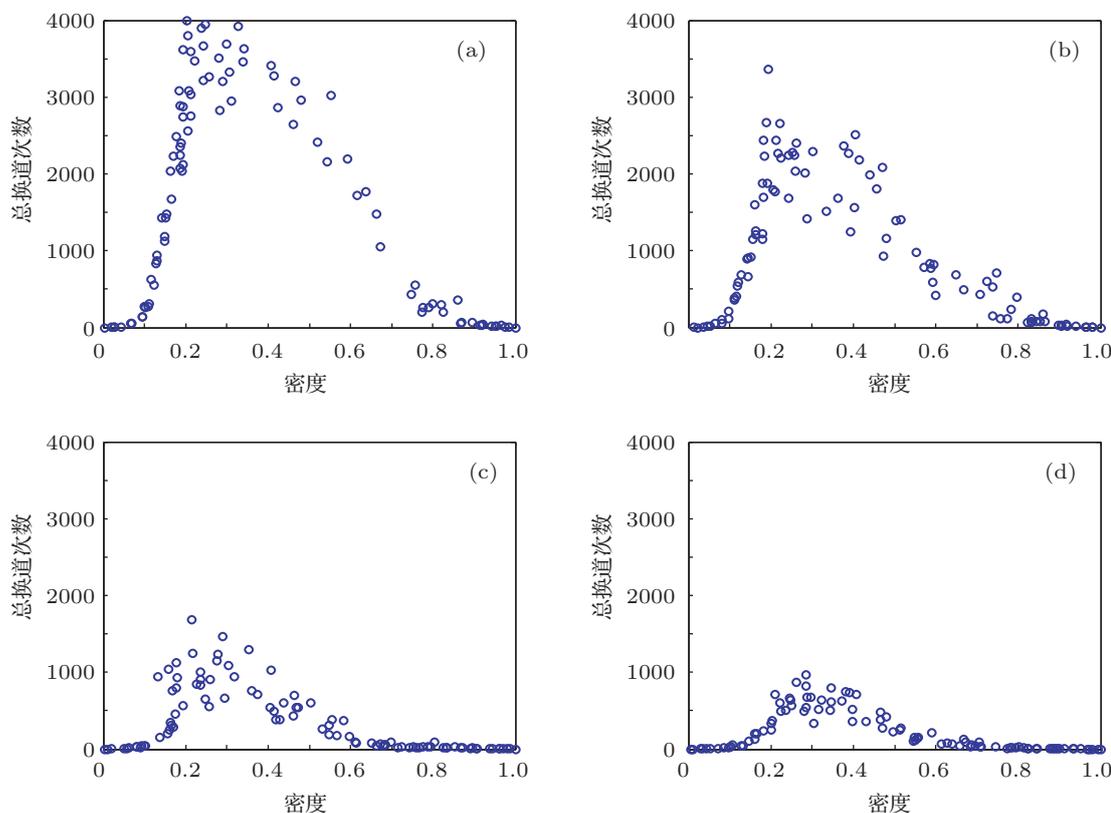


图 9 车道数 = 5 时不同换道成本下的换道次数 (a) $\theta = 0.07$; (b) $\theta = 0.10$; (c) $\theta = 0.13$; (d) $\theta = 0.16$

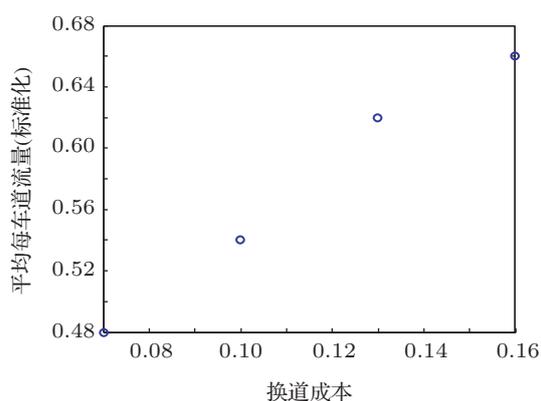


图 10 车道数 = 5 时不同换道成本下通行能力的变化

4 结论

本文通过探究自行车的特征, 结合动态地场和元胞自动机, 在原有模型的基础上进行了一系列改进, 建立了新的自行车流模型. 仿真结果表明, 随着

自行车道宽度的增加, 虽然总体通行能力增大, 但单位车道宽度的通行能力逐渐下降, 并且换道率迅速增大, 使得道路上的不安全因素增大. 本文还通过提出换道成本的概念, 利用不同的换道成本来简单模拟不同的驾驶风格, 仿真结果表明, 更大的换道成本, 即更安全的驾驶风格能够使道路的通行能力增大, 并且能大幅度降低换道次数, 显著提高道路的安全性. 从这一结果也可以看出用户最优选择与系统最优的区别.

然而, 本模型在参数的标定上, 仍然没有足够的理论依据, 例如前车速度与及后车距离对后车的影响程度 (在模型中反映为地场的变化)、排斥力的大小、换道成本的大小即 β, γ, θ 等, 本文参数的标定只能反映大致的趋势. 并且本文在考虑前车速度影响时, 只考虑了车辆减速的灵活性, 加速的灵活性未能实现. 以上各点仍需进一步研究.

- [1] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys.* I (France) **2** 2221
- [2] Bentaleb K, Jetto K, Ez-Zahraouy H, Benyoussef A 2013 *Chin. Phys. B* **22** 018902
- [3] Vasic J, Ruskin H J 2012 *Physica A* **391** 2720
- [4] Ding J X, Huang H J, Tian Q 2011 *Chin. Phys. B* **20** 028901
- [5] Daganzo C F 2006 *Transport. Res. B* **40** 396
- [6] Li X G, Gao Z Y, Zhao X M, Jia B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4777 (in Chinese) [李新刚, 高自有, 赵小梅, 贾斌 2008 物理学报 **57** 4777]
- [7] Tian H H, Xue Y, Kang S J, Liang Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4506 (in Chinese) [田欢欢, 薛郁, 康三军, 梁玉娟 2009 物理学报 **58** 4506]
- [8] Wen J, Tian H H, Kang S J, Xue Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7693 (in Chinese) [温坚, 田欢欢, 康三军, 薛郁 2010 物理学报 **59** 7693]
- [9] Zheng L, Ma S F, Jia N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4490 (in Chinese) [郑亮, 马寿峰, 贾宁 2010 物理学报 **59** 4490]
- [10] Sun Z, Jia B, Li X G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 100508 (in Chinese) [孙泽, 贾斌, 李新刚 2012 物理学报 **61** 100508]
- [11] Ren G, Lu L L, Wang W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144501 (in Chinese) [任刚, 陆丽丽, 王炜 2012 物理学报 **61** 144501]
- [12] Zhang J, Wang H, Li P 2006 *J. Highway Transport. Res. Devel.* **23** 125 (in Chinese) [张晋, 王慧, 李平 2006 公路交通科技 **23** 125]
- [13] Jiang R, Jia B, Wu Q S 2004 *J. Phys. A* **37** 2063
- [14] Jia B, Li X G, Jiang R, Gao Z Y 2007 *Eur. Phys. J. B* **56** 247
- [15] Yang X F, Niu Z Y, Wang J R 2012 *J. Sys. Simu.* **24** 2577 (in Chinese) [杨晓芳, 牛兆雨, 王建蓉 2012 系统仿真学报 **24** 2577]
- [16] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, Zittartz J 2001 *Physica A* **295** 507
- [17] Weng W G, Pan L L, Shen S F, Yuan H Y 2007 *Physica A* **374** 821
- [18] Xu X, Song W G, Zheng H Y 2008 *Physica A* **387** 5567
- [19] Yang L Z, Li J, Liu S B 2008 *Physica A* **387** 3281
- [20] Weng W G, Chen T, Yuan H Y, Fan W C 2006 *Phys. Rev. E* **74** 036102

Modeling of bicycle flow based on dynamic floor field and cellular automata*

Yang Xiao-Fang^{1)†} Mao Wei¹⁾ Fu Qiang²⁾

1) (Department of Transportation Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

2) (College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(Received 22 August 2013; revised manuscript received 20 September 2013)

Abstract

In this paper, dynamic floor field is introduced to investigate the characteristics of bicycle flow. To embody the features of bicycles and riders, the repulsive force among the riders and the velocity effect are taken into consideration in this new model. A new concept called lane-changing cost is proposed to study the effect of driving styles, and a new lane-changing rule is proposed based on the traffic environment comparison. The simulation results show that 1) the model can accurately describe the bicycle flow, and the obtained statistics accords with empirical data; 2) the capacity of the road of per unit width decreases as road-width increases; 3) aggressive driving style substantially increases the lane-changing times, which reduces the capacity of the road.

Keywords: bicycle flow, cellular automata, dynamic floor field, simulation

PACS: 05.50.+q, 45.70.Vn, 05.65.+b

DOI: 10.7498/aps.62.240511

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51008196, 51308409) and the Shanghai Leading Academic Discipline Project, China (Grant No. XTKX2012).

† Corresponding author. E-mail: herryfuyang@126.com