

# 基于元胞自动机的自行车交通流仿真建模

魏丽英<sup>1</sup>, 应力天<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 运输学院 北京 100044; 2. 宁波市规划局 镇海分局, 浙江 宁波 315200)

**摘要:**提出了一种自行车元胞自动机模型。该模型是在机动车 Nagle-schreckenberg(NS)模型的基础上,考虑自行车的换道行为,在 NS 模型规则前加入路径选择规则,从而建立符合自行车行驶行为的模型。根据模型的规则,在不同最大速度、不同随机慢化概率、不同车道宽度等条件下进行了仿真分析,其通行能力及速度-密度仿真曲线均符合理论值。最后,通过实际观测数据验证了本文模型的可靠性。

**关键词:**交通运输系统工程;元胞自动机;自行车交通流;交通仿真;自行车通行能力

**中图分类号:**U491.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**1671-5497(2011)01-0051-05

## Modeling and simulation on bicycle traffic flow based on cellular automaton

WEI Li-ying<sup>1</sup>, YING Li-tian<sup>2</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China 2. Zhenhai Department of Ningbo City Planning Bureau, Ningbo 315200, China)

**Abstract:** A bicycle traffic flow model was proposed based on the cellular automation. On the basis of the motor vehicle NS model, adding a lane changing rule, a more reasonable model was established. The model takes the lane changing rule, a more reasonable model was established. The model takes the lane changing of bicycles into account, is in better agreement with the real behavior of bicyclists. Simulations were performed under different conditions, such as of maximum speed, of random slowdown probability, of bicycle lane width. The obtained bicycle traffic capacity and speed-density graph were close to the theoretical values. The model was validated by the real observing and measuring data, and its validity and reliability were proved.

**Key words:** engineering of communication and transportation system; cellular automaton; bicycle traffic flow; traffic simulation; bicycle traffic capacity

元胞自动机已成为国内外学者研究交通流理论的常用手段,模型分支很多<sup>[1-5]</sup>,研究结果较 20 世纪 90 年代初更接近真实交通状态。但现有成果中以针对机动车流的改进型模型为主<sup>[6-9]</sup>,针对自行车流的研究还不多见。本文主要以机动车元胞自动机模型为基础,以自行车交通流理论为依

托,建立了自行车元胞自动机模型,并进行了仿真研究。

### 1 模型的建立及演化规则

#### 1.1 元胞尺寸

元胞尺寸由自行车最大停车密度和自行车物

收稿日期:2009-05-27.

基金项目:“973”国家重点基础研究发展计划项目(2006CB705500);“十一五”国家科技支撑项目(2006BAG01A01);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009JBM043).

作者简介:魏丽英(1974-),女,副教授,博士.研究方向:交通规划、交通流理论与仿真. E-mail: wly105@sohu.com

理尺寸决定。由停车时自行车最大停车密度为 0.65 辆/ $\text{m}^2$ 可知,一辆自行车平均占地 1.56  $\text{m}^2$ 。一般自行车的外廓最大尺寸为 1.9 m,宽为 0.6 m,骑车时高为 2.5 m,行驶时在路段上一般占用道路面积 4~10  $\text{m}^2$ 。因此,本文定义自行车元胞大小为长 2 m、宽 1 m 的矩形,每个元胞面积为 2  $\text{m}^2$ ,符合最大停车密度的要求。

### 1.2 速度

对城市道路自行车行驶速度的调查数据表明:自行车在城市路段的行驶平均速度为 4~5 m/s,最大速度约为 20 km/h。本文设最大速度为 6 m/s,即  $v_{\max}$  为 3 个元胞长度。

### 1.3 元胞的状态及邻域

每个元胞的位置用二维坐标  $C(i, j)$  表示,如图 1 所示。元胞状态有 6 种可能,即  $C(i, j) \in \{-1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ 。当  $C(i, j) = -1$  时,表示该元胞为空;当  $C(i, j) = v, v \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$  时,则表示该元胞被快速自行车占据,且速度为  $v$ 。

图 1 为元胞邻域图,其中黑色的元胞表示当前元胞,定义其邻域为周围浅灰色部分。对应自行车纵向为 4 个元胞长度,横向最大换道范围为 2 个元胞宽度(即自行车换道时可以换至次邻道)。鉴于实际情况中,自行车的左右摆幅角度一般不会很大,因此当速度小于 2 m/s 时,其横向最大换道范围为 1,此时其元胞邻域如图 1 中的右图。

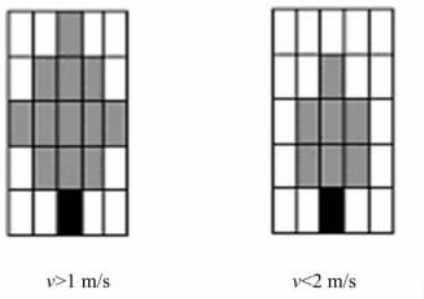


图 1 元胞邻域图

Fig. 1 Neighborhood of cellular

### 1.4 模型更新规则

假设  $t$  时刻当前元胞的位置为  $[x_n(t), y_n(t)]$ ;  $d_{l2}, d_{l1}, d_s, d_{r1}, d_{r2}$  分别为当前元胞与其左次邻道前方、左邻道前方、正前方和右邻道前方、右次邻道前方非空元胞的车头间距。如果自行车在最左边的自行车车道上行驶,那么其左边必然无车道,此时,  $d_{l2}, d_{l1}$  都设定为 -1。同理,其他边界情况都采用以上方式处理。模型的更新

规则如下:

#### Step1 路径选择(换道)

IF  $v_n(t) \geq 2$  Then  $d_x = \max \{d_{l2}, d_{l1}, d_s, d_{r1}, d_{r2}\}$

$$\text{IF } d_x = \begin{cases} d_{l2} \text{ Then } y_n(t) = y_n(t) - 2 \\ d_{l1} \text{ Then } y_n(t) = y_n(t) - 1 \\ d_s \text{ Then } y_n(t) = y_n(t) \mp 0 \\ d_{r1} \text{ Then } y_n(t) = y_n(t) + 1 \\ d_{r2} \text{ Then } y_n(t) = y_n(t) + 2 \end{cases}$$

ELSE IF  $v_n(t) < 2$   $d_x = \max \{d_{l1}, d_s, d_{r1}\}$

$$\text{IF } d_x = \begin{cases} d_{l1} \text{ Then } y_n(t) = y_n(t) - 1 \\ d_s \text{ Then } y_n(t) = y_n(t) \mp 0 \\ d_{r1} \text{ Then } y_n(t) = y_n(t) + 1 \end{cases}$$

#### Step2 加速规则

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

#### Step3 减速规则

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

#### Step4 随机慢化

假设  $p$  为随机慢化概率,则

$$\text{IF } \text{rand}() < p$$

$$v_n(t+1) = \max [v_n(t+1) - 1, 0]$$

#### Step5 位置更新

$$\begin{cases} x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1) \\ y_n(t+1) = y_n(t) \end{cases}$$

式中:  $v_n$  表示自行车速度; gap 表示自行车与前车间距;  $d_x$  是 5 个前进方向中的最大者,  $d_x = \max \{d_{l2}, d_{l1}, d_s, d_{r1}, d_{r2}\}$  的计算方法如下:

(1)开始计算各行驶方向上的车头间距时,首先判断自行车能否顺利换道,即判断邻道、次邻道上有无被其他自行车占据,如不能顺利换道,则设定该方向车头间距为 -1。

(2)计算出各方向车头间距后,如果最大值有且仅有一个,则取最大值的方向为自行车的前进方向。

(3)如果最大值  $d_{l1} = d_{r1}$ , 那么前进方向为左邻道前方或右邻道前方的概率各为一半。

(4)如果最大值  $d_{l2} = d_{r2}$ , 那么前进方向为左次邻道前方或右次邻道前方的概率各为一半。

(5)其他情况下,即当有 2 个及以上车头间距相等且都为最大值时,骑车者通常选择横向位移小的方向前进,故先选择前进方向是前方,其次选

择前进方向为邻道,最后选择次邻道行驶;例如  $d_{l2} = d_{r2} = d_s$ , 则选择的方向为正前方,  $d_{l2} = d_{l1}$ , 则选择的方向为左邻道前方。

$\max \{d_{l1}, d_s, d_{r1}\}$  的计算同上。上述方法中,自行车进行换道时并不考虑期望车道上后车的行驶状况,这与机动车强制换道规则相似。另外,同一  $y_n(t)$  上如车辆数大于 1,那么它们换道的次序是随机依次进行的,在自行车道上,换道的次序是从前往后依次进行的,这就避免了碰撞的发生。

2 仿真结果与讨论

所仿真的道路由二维元胞组成,设自行车车道长度为  $L$  个元胞,由  $n$  个车道构成,则其道路面积为  $S = L \times n \times 2$ 。流量  $q$  的单位随着密度的单位不同而变化,一般取 veh/h,平均到每个车道为 veh/h · m。仿真采用周期边界条件,所涉及到的每个数据点均为由初始条件开始运行 1000 步之后再统计之后 5000 步运行结果的平均值,可以确保车辆在同一密度下行驶,使其流量对应着用来设计路段通行能力的实际可能的通行能力。

2.1 速度-密度仿真分析

令车道长度为 400 个元胞,宽度为 4 个元胞,自行车最大速度为每秒 4 个元胞。仿真开始时,车辆随机分布在路网当中,且速度也是  $0 \sim v_{\max}$  之间的随机值。仿真是在同一密度下进行的,在每一确定密度下计算出车辆数,然后随机分布到路网当中。本文中,自行车流量单位如无特殊说明,统一采用 veh/h · m,即平均到每个车道当中。仿真时采用的密度是无量纲密度(下文中的密度如无特殊说明,都指无量纲密度),是实际密度与阻塞密度的比值,这里阻塞密度根据元胞尺寸计算为 0.5 veh/m<sup>2</sup>,当密度为 1 时,即达到了阻塞密度。图 2 描述了 4 车道下采用不同的随机慢化概率  $p$  时的速度-密度曲线。由图 2 可以看出:自行车的最大速度为 8 m/s=28.8 km/h;当密度趋向最大密度 1 时,自行车的平均速度趋向于 0,且随着随机慢化概率的增大,速度-密度曲线逐渐下移。

2.2 通行能力仿真分析

根据参考文献[9]中建议的自行车道路路段交通服务水平标准,按照骑行速度(km/h)和占用道路面积(m<sup>2</sup>/veh)两项的取值,绘出路段标准通行能力的等级折线图,如图 3 所示。仿真中仍然取自行车道长度为 400 个元胞,宽度为 4 个元胞,

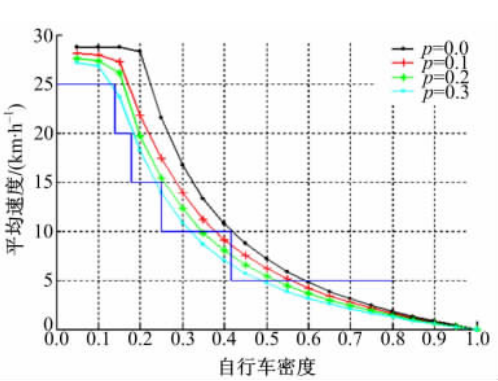


图 2 路段自行车交通服务水平包络图  
Fig. 2 Bicycle traffic service standard on a section of road

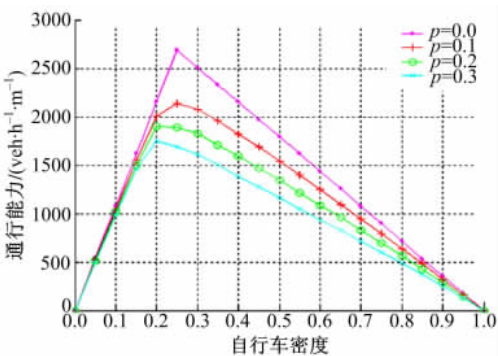


图 3 不同随机慢化概率下的流量-密度图  
Fig. 3 Flow-density curve under different random slowdown probabilities

自行车最大速度为每秒 3 个元胞长度,密度是实际密度与阻塞密度相比的值,其余仿真条件同速度-密度仿真。按照仿真得到的自行车的平均速度(km/h)计算车流的总流量(veh/h),然后除以车道数 4,得到平均到每个车道上的流量,单位为 veh/(h · m)。在不同的随机慢化概率  $p$  下分别计算单车道的流量,从而可得到图 3 所示的流量-密度曲线。当密度较小时( $k < 0.3$ ),在随机慢化概率  $p = 0.3$  下的曲线能够包络服务水平等级曲线上的分隔点,说明模型误差在允许范围内。

从图 3 可以看出,单车道流量在密度上升到 0.2~0.25 时获得最大流量,且曲线顶部平缓,意味着自行车的通行能力能够维持在一定的密度范围内,不易出现性能的突然性下降。这与机动车交通流的流量-密度关系相差很大,且随着随机慢化概率的增大,自行车的通行能力随之下降,密度范围也向后延伸。如当  $p = 0.3$  时,4 车道自行车 CA 模型的单车道最大通行能力约为 1750 veh/(h · m),出现在密度约为 0.2 时;当  $p = 0.2$  时,单车道最大通行能力约为 1900 veh/(h · m),出

现在密度约为 0.22 时;当  $p=0.1$  时,4 车道自行车 CA 模型的单车道最大通行能力约为 2130 veh/(h·m),出现在密度约为 0.25 时。与文献 [5]中对自行车通行能力的研究和取值比较一致。说明图 3 中仿真得到的通行能力结果无论是定性分析还是定量研究均有其合理性,基本与理论数值相符。

2.3 车道数目对通行能力的影响

当车道数目选取不同数值时,即车道有效宽度  $n=2,3,4,5$  时,利用单向自行车 CA 模型( $p=0.1$ )做仿真,最大速度为每秒 3 元胞长度,仿真条件同速度-密度仿真。按照仿真结果计算单车道的通行能力,结果绘制在图 4 中。

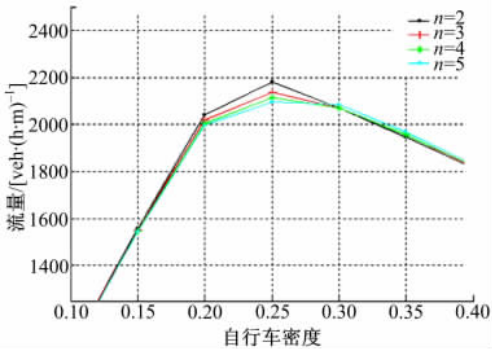


图 4 不同车道数目下的流量-密度图

Fig. 4 Flow-density curve under different roadways

由图 4 得知:当车道有效宽度为 5 个单位宽度时,单车道的最大通行能力约为 2100 veh/(h·m);随着车道宽度的减少,单车道最大通行能力随之增大,当  $n$  从 5 减少到 2 时,单车道最大通行能力由 2100 增长到 2180 veh/(h·m)。仿真结果表明:在  $n=8$  时,单车道的通行能力基本停止减少,最大车道通行能力维持在 2080 veh/(h·m)。不仅如此,随着车道数目的增长,流量-速度曲线的形状也发生了变化,顶部逐渐由较为凸起变得平缓,获得最大通行能力取值的密度范围也随之增加。这是由于车道较多时,车辆的换道比较容易,因此,当密度发生变化时,多车道保持较大通行能力比较容易实现;而当车道数很少时,在最大通行能力周围,较小的扰动都会打破原来的平衡,使通行能力下降较快。

2.4 不同最大速度的仿真分析

机动车的最大速度一般取决于道路限速。但是自行车最大速度基本取决于骑车人的身体状况。因此,不同情况下最大速度分布也不一样。以下的仿真实验旨在研究不同最大速度分布对流量和平均速度的影响。仿真程序拟定道路长度为 400 元胞,随机慢化概率  $p=0.2$ ,同前面一样从 1000 步后开始计数,其余仿真条件同速度-密度仿真。

均速度的影响。仿真程序拟定道路长度为 400 元胞,随机慢化概率  $p=0.2$ ,同前面一样从 1000 步后开始计数,其余仿真条件同速度-密度仿真。

仿真结果如图 5 和图 6 所示。当密度小于 0.25,  $v=4$  m/s 时,不管是平均速度还是流量,都明显要高于其他情况,说明当密度较小时,自行车可以较为自由地行驶,此时,最大速度越大,平均速度和流量也越大;当密度为  $[0.25, 0.4]$  时,最大速度为 4 和 3 m/s 的曲线基本重合,且高于最大速度为 2 m/s 的曲线,说明此时的平均速度达不到最大速度 3 m/s,因此不管最大速度是 4 的曲线还是最大速度是 3 m/s 的曲线,它们的流量和平均速度几乎是一样的;当密度大于 0.4 时,平均速度曲线与流量曲线几乎重合,说明此时骑车者都不能以期望的速度行驶,那么最大速度就体现不出它的价值。从图 5 和图 6 中可以看出,在行驶条件较好的路段(即车速可达到 20 km/h 以上),以 15 km/h 为临界点,当平均速度小于它时,最大速度对流量基本没有影响;在行驶条件较差时(即车速在 15 km/h 以下时),以 9 km/h 为临界点,当速度小于它时,最大速度对流量基本没

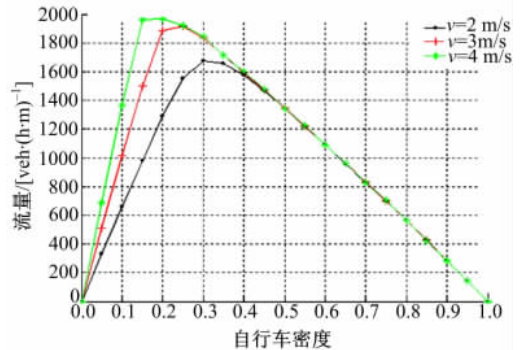


图 5 不同最大速度下的流量-密度曲线

Fig. 5 Flow-density curve at different maximum speeds

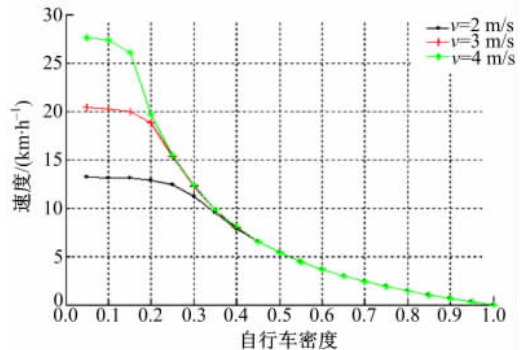


图 6 不同最大速度下的速度-密度曲线

Fig. 6 Speed-density curve at different maximum speeds

有影响。

3 模型的验证

以实际数据为基础验证模型的可靠性。选择的调查地点需满足以下条件:①不受机动车与行人交通流的影响;②不受上下游交通信号控制的影响;③调查地点上下游一定距离内没有自行车驶入与驶出干扰。

综上所述,本研究选择北京市有隔离带的路段——学院南路(北京邮电大学南门附近)为调查对象,于 2008 年 4 月 24 日 17:00~18:00 对该路段的自行车流量、密度进行调查。车流从观测起点 A 流向观测终点 B,  $L_{AB}=40\text{ m}$ , 车道有效宽度  $N=3\text{ m}$ 。在观测时间段内,经处理共获取 240 组数据,包括自行车流量与密度。表 1 中的数据是以 150 s 为时间段计算得到的值,流量为 150 s 内的自行车流量,密度为 150 s 内 10 个密度调查值的平均值。表 1 是模型验证表,表中的实测流量=观测流量/ $n$ ,即分配到每一车道上的自行车流量;表中的密度是实测密度与阻塞密度的比值,阻塞密度取仿真模型的计算值  $0.5\text{ veh/m}^2$ 。模

表 1 模型验证表

Table 1 Table of model validity

序号	密度与阻塞 密度比值	实测流量/ [veh·(s·m) <sup>-1</sup> ]	仿真流量/ [veh·(s·m) <sup>-1</sup> ]	误差 /%
1	0.0180	0.0462	0.0473	2.3256
2	0.0472	0.1070	0.1200	10.8333
3	0.0685	0.2000	0.1817	10.0715
4	0.0936	0.2410	0.2493	3.3293
5	0.0834	0.2103	0.2225	5.4831
6	0.0246	0.0513	0.0603	15.2727
7	0.0312	0.0872	0.0836	4.3062
8	0.0354	0.1077	0.0940	14.5745
9	0.0960	0.2564	0.2566	0.0779
10	0.1267	0.3179	0.3305	3.8124
11	0.0438	0.1128	0.1172	3.7543
12	0.0278	0.0718	0.0740	2.9730
13	0.0221	0.0615	0.0594	3.6051
14	0.0747	0.2051	0.2000	2.5500
15	0.1214	0.3026	0.3176	4.7229
16	0.1354	0.3333	0.3509	5.0157
17	0.0386	0.1026	0.1038	1.1561
18	0.0262	0.0615	0.0701	12.2932
19	0.0550	0.1385	0.1479	6.3556
20	0.0747	0.2000	0.2000	0.0000
21	0.1210	0.2923	0.3162	7.5585
22	0.0965	0.2359	0.2566	8.0670
23	0.0504	0.1179	0.1341	12.0805
24	0.0635	0.1436	0.1706	15.8265

型仿真假定最大速度为 6 m/s,即 3 元胞/s,随机慢化概率为 0.3。具体数据如表 1 所示,大多数误差都在 15% 以下,平均误差为 6.51%,基本满足要求。

4 结束语

建立了一种自行车元胞自动机模型,在考虑不同车道数、不同最大速度等条件的前提下,对路段自行车流的速度、流量等特性进行了仿真分析。通过与路段自行车服务水平标准以及实测数据的对比,对模型进行了验证。但实际验证中,本文只研究了自行车最大速度为 6 m/s 的情况,且随机慢化概率选取的是一个常数,对于不同最大速度和随机慢化概率对流量和平均速度的影响,还需要进一步深入研究。

参考文献:

[1] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Phys I, 1992(2): 2221-2229.

[2] Ishibashi Y, Fukui M. Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed[J]. Phys Soc Japan, 1996, 65(6): 1868-1870.

[3] Ez-Zahraouy H, Jetto K, Benyoussef A. The effect of mixture lengths of vehicles on the traffic flow behavior in one-dimensional cellular automaton[J]. Eur Phys J B, 2004, 40: 111-117.

[4] 贾斌,高自友,李克平,等. 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟[M]. 北京:科学出版社,2007.

[5] 关宏志,陈艳艳,刘小明,等. 基本路段机非混合交通流的解析模型[J]. 北京工业大学学报,2001, 27(1):12-15.

Guan Hong-zhi, Chen Yan-yan, Liu Xiao-ming, et al. An analysis model for mixed traffic flow on street [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2001, 27(1):12-15.

[6] Hanaura H, Nagatani T, Tanaka K. Jam formation in traffic flow on a highway with some slowdown sections[J]. Physics A, 2007, 374: 419-430.

[7] Daganzo C F. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches[J]. Transpn Res B, 2007, 41: 49-62.

[8] Schreckenberg M, Wolf D E. Traffic and Granular Flow 97[M]. Singapore: Springer, 1998.

[9] 徐吉谦. 交通工程总论[M]. 北京:人民交通出版社,1991.