

基于交通流元胞自动机模型的小区开放问题研究

房明超, 王艳红*

河南理工大学数学与信息科学学院, 焦作 河南
Email: wangyh81@hpu.edu.cn

收稿日期: 2020年8月24日; 录用日期: 2020年9月4日; 发布日期: 2020年9月11日

摘要

本文以小区开放问题为实际研究背景, 建立基于微观交通流元胞自动机模型的车辆通行能力模型。利用NaSch模型进行小区开放问题的数值模拟, 分析了不同预设参数下小区开放对交通平均速度和流量的影响。选取河南省郑州市的紫云小区和响水湾小区作为分析实例, 对模型进行分析验证。分析表明: 小区开放对周边局部交通拥堵的缓解作用不是绝对的, 需要通过对小区和周边环境具体交通参数做综合分析才能得到结论。

关键词

交通流, 元胞自动机模型, 小区开放, 车辆通行能力模型

Research on Community Opening Based on Traffic Flow Cellular Automata Model

Mingchao Fang, Yanhong Wang*

School of Mathematics and Information Science, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan
Email: wangyh81@hpu.edu.cn

Received: Aug. 24th, 2020; accepted: Sep. 4th, 2020; published: Sep. 11th, 2020

Abstract

In this paper, a vehicle capacity model based on micro-traffic flow cellular automata model is established based on the practical research background of community opening problem. The NaSch

*通讯作者。

model is used to simulate the opening problem of a small area, and the influence of opening of a small area on the average speed and flow of traffic under different preset parameters is analyzed. Ziyun and Xiangshuiwan communities in Zhengzhou, Henan province are selected as examples to verify the model. The analysis shows that the easing effect of community opening on local traffic congestion in the surrounding area is not absolute, and the conclusion can only be reached through comprehensive analysis of specific traffic parameters of the community and the surrounding environment.

Keywords

Traffic Flow, Cellular Automata Model, Opening of the Community, Vehicle Capacity Model

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

交通问题已成为制约经济社会发展的重要因素,而道路建设的发展却远远跟不上交通需求的快速增长,因此越来越受到人们的关注。科学的交通管理措施能够有效地提高交通运行效率,缓解交通拥堵。因此如何利用交通理论模型分析研究交通拥堵规律,寻求缓解交通拥挤的有效策略,进而科学地运用交通管理措施,提高现有道路的使用效率,具有一定的科学意义和应用价值。

在过去的几十年间,国内外许多学者从不同角度提出了各种各样的交通流模型。从20世纪五六十年代的运动学模型和车辆跟驰模型[1][2][3],到七十年代和八十年代流体力学模型的蓬勃发展[4][5][6],以及过去30年中元胞自动机模型[7][8][9][10]的异军突起,这些模型解释、再现和预测了交通中复杂的物理现象,揭示了交通流的内在机理[1]-[10]。其中微观元胞自动机(CA)模型作为一种网格动力学模型[8],能够有效地研究并描述交通流系统的演化及发展[8][9][10][11][12]。贾斌、高自友等[8]系统总结了元胞自动机模型在交通系统建模与模拟中的具体应用。

小区开放是近年来共享概念引领下的政策导向,小区开放问题也是近年来学者们讨论的热点问题。小区是否应该开放、如何开放、开放后效果如何,是小区开放进程中亟需解决的关键问题。李向朋[13]通过研究封闭式小区交通开放来缓解城市交通拥堵。徐美林进行了封闭街区道路开放适宜性评价研究[14]。小区开放问题下的讨论车辆通行能力影响的模型也层出不穷,有采用模糊综合评判法、模糊聚类分析、主成分分析方法等[15][16]。文献[17]采用CA模型研究了最大车速和车流量对小区周边道路状况的影响,进而讨论其对小区的影响,但其对最大速度的设置不够合理,且对小区开放带来的影响缺乏实际案例支撑。本文基于交通流元胞自动机NaSch模型,建立考虑道路周边环境的车辆通行能力模型,并进行数值仿真,通过对流量密度图的分析 and 实际案例分析来讨论小区开放的效果。

2. 模型

本部分在小区开放问题背景下考虑影响小区周边主路通行能力的影响因素,建立基于交通流元胞自动机NaSch模型的车辆通行能力模型,用来模拟分析预设参数下小区开放对周边主路交通流的影响情况。

2.1. NaSch 模型

NaSch模型是1992年由学者Nagel和Schreckenberg[7]提出的最经典的一维CA交通流模型。其假

设第 n 辆车的速度和位置分别是 v_n 和 x_n , 其中, 速度 v_n 可以在 $0, 1, 2, \dots, v_{\max}$ 内取值, 而第 n 辆车和第 $n+1$ 辆车之间的距离 $d_n = x_{n+1} - x_n - l$, 其中 x_n 表示第 n 辆车的位置, l 为车长, 则所有车辆的状态按以下演化规则并行更新:

- 加速: 若 $v_n(t) \leq d_n(t)$, 则车辆加速, $v_n(t+1) = \min\{v_n(t)+1, d_n(t), v_{\max}\}$;
- 减速: 若 $v_n(t) > d_n(t)$, 则车辆减速, $v_n(t+1) = \min\{v_n(t+1), d_n(t)\}$;
- 以概率 p 随机慢化: $v_n(t+1) = \max\{v_n(t+1)-1, 0\}$;
- 位置更新: $x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t)$ 。

2.2. 基于 NaSch 模型的小区开放问题分析

在小区开放问题中, 我们基于 NaSch 模型分析小区开放前后周边主路交通流的变化情况, 包括交通速度和交通流量随密度的改变, 讨论小区开放对道路车辆通行能力的影响。在实际情况中, 我们还考虑了道路通行能力的修正系数, 包括路旁干扰系数、道路宽度修正系数以及侧向净宽修正系数所带来的影响。从而分析不同内部结构、不同周边道路结构、不同车流量的小区开放对车辆通行能力的影响程度[18]。

2.2.1. 路旁干扰系数 α

对于一般的城市道路, 路段上的车辆会受到行人和非机动车的干扰, 这些因素对机动车道的综合影响程度, 即路旁干扰系数[19]。一般认为, 路边干扰越大, 路段上的车速下降得越快, 从而导致道路通行能力越小。因此, 使用车速下降率作为路旁干扰系数, 即路旁干扰系数 $\alpha = v_a/v_b$, 其中 v_a 为受干扰后的车速, v_b 为未受干扰的车速。一般把受干扰道路的情况划分为以下四类[19]: 不受非机动车干扰, 不受行人干扰的车道: 即四块板道路及有行人隔离的两块板机动车专用道; 不受非机动车干扰, 受行人干扰的车道: 即无行人隔离的两块板机动车专用道[18]; 受非机动车干扰, 不受行人干扰的车道: 即两块板有行人隔离的机非混行车道[20]; 受非机动车干扰, 受行人干扰的车道: 两块板机非混行车道[19]。由此路旁干扰系数是基于一系列车辆速度观测和各种道路的车速下降率得到的, 具体如下:

- (1) $\alpha_1 = 1$; (2) $\alpha_2 = 1 - 0.00054p$; (3) $\alpha_3 = 1 - 0.0027x$; (4) $\alpha_4 = (1 - 0.00201x)(1 - 0.00054p)$ 。

其中, p : 行人流量/3 分钟; x : 自行车流量/10 分钟。

2.2.2. 路宽及侧向净宽修正系数

车道宽度决定于通行车辆的类型和计算车速。一般的新建道路都要按照规范要求的路宽及侧向净宽去进行设计, 当在研究小区开放这种路宽与侧向净宽不定的时候, 需要路宽及侧向净宽修正, 在这里我们参考日本的数字要求[18], 具体如表 1 所示:

Table 1. The correction coefficient ω of the lane width

表 1. 车道宽度修正系数 ω

车道宽度(m)	修正系数 ω
>3.50	1.00
3.25	0.94
3.00	0.85
2.75	0.77

侧向净宽是指车道边缘至路侧设施带、障碍物的净距离。日本标准规定对小于 1.75 m 的侧向净宽予以修正, 美国通行能力手册[21]规定 1.82 m 为临界值。根据我国城市道路设计规范[22]规定, 建议侧向净宽标准值为 1.50 m, 不足 1.50 m 时予以修正。修正系数如表 2 所示:

Table 2. The correction coefficient γ of the lateral width
表 2. 侧向净宽修正系数 γ

侧向净宽(m)	修正系数 γ	
	单侧不足	两侧不足
>0.75	1.00	1.00
0.50	0.98	0.95
0.25	0.95	0.91
0.00	0.93	0.86

为使设计的道路在建设初期有一个宽适的交通条件, 并为后期交通需求增长留有余地, 在设计通行能力时, 运用服务水平概念还是必要的。即设计通行能力应使道路达到某种服务水平[22]前提下的通行能力。在小区开放问题中, 我们也引入交通服务水平的概念, 如表 3 所示:

Table 3. Service level and corresponding traffic status
表 3. 服务水平及相应的交通状态

服务水平	饱和度 v/c	交通状态
I	0.25	城市道路自由流
II	≤ 0.50	道路稳定流
III	≤ 0.70	交叉口溢流周期低于 3%
IV	≤ 0.85	稳定溢流
V	≤ 0.95	交通堵塞

则设计通行能力 C_d 为:

$$C_d = C_{ap} \times (v/c) \times \alpha \times \omega \times \gamma \quad (5)$$

其中, C_{ap} : 相应于某种设计车速下的饱和度; v/c : 相应于某一服务水平下的饱和度; α : 路旁干扰修正系数; ω : 车道宽度修正系数; γ : 侧向净宽修正系数。基于上述分析, 我们考虑到可以将路段通行能力与交叉口通行能力以适当的权重作和, 即公式为:

$$y = \rho_1 \times C_d + \rho_2 \times N \quad (6)$$

其中, ρ_1 为路段通行能力的权重; ρ_2 为交叉路口处通行能力的权重, 当交叉口数量增加时, 权重相应减少[23]。 N 为一个小时内所有交叉路口的车辆通行能力, 表达式为:

$$N = 3600 \cdot s \cdot \lambda / T_e \quad (7)$$

其中, s 为交叉路口数量。 λ 为在一个交叉路口内车辆“穿越空档”的平均车头总时距, T_e 为红绿灯周期时长, 单位均为秒。

小区开放与否会影响道路分布, 进而对车辆通行情况产生一定的影响。本文建立的车辆通行能力模型, 先进行数据的初始化, 产生初始的位置和速度, 定义车头间距, 再根据元胞自动机 NaSch 模型的模型规则和随机慢化概率, 进行速度的演化和位置的更新, 进而求取一定时间步长内车辆的平均速度, 同时利用交通流三参数之间的关系, 求取日交通流量。根据建立的模型, 在数值仿真过程中, 关键问题是需要代入实际小区的影响因素参数, 模拟出小区开放前后周边主路的交通流量和平均速度随交通密度变化的关系图, 以此来分析小区开放对周边道路通行能力的影响, 从而分析该小区开放的利弊。而实际小区的影响因素参数, 在数值模拟过程中, 通过预设的方法进行取值, 旨在比较小区开放前后的道路通行

能力变化情况。在实际案例中, 还需要结合影响车辆通行能力的实际道路因素进行分析。而实际小区的影响因素参数取值则根据实际小区内部结构情况和外部环境因素进行分析得到。通过代入实际参数到模型中来实现对实际小区的开放效果分析。

3. 小区开放对交通流影响的结果分析

3.1. 数值模拟结果分析

在某个理想化小区模型的小区开放问题中, 我们把对车辆通行能力的研究简化为考察交通平均速度和交通流量随交通密度的变化情况。根据元胞自动机 NaSch 模型的相关理论, 我们设定某个理想化小区在小区开放前, 最大车辆平均速度为 $v_{\max} = 6$, 车辆随机慢化概率为 $p = 0.3$, 初始车辆密度为 $\rho = 0.002$, 路网车道总长度为 $L = 1800$; 在小区开放后, 最大车辆平均速度 v_{\max} 、车辆随机慢化概率 p 、初始车辆密度 ρ 均保持不变, 路网车道总长度变为 $L = 2500$ 。在模拟程序中输入小区开放前后的预设数据后, 得到了如下的结果:

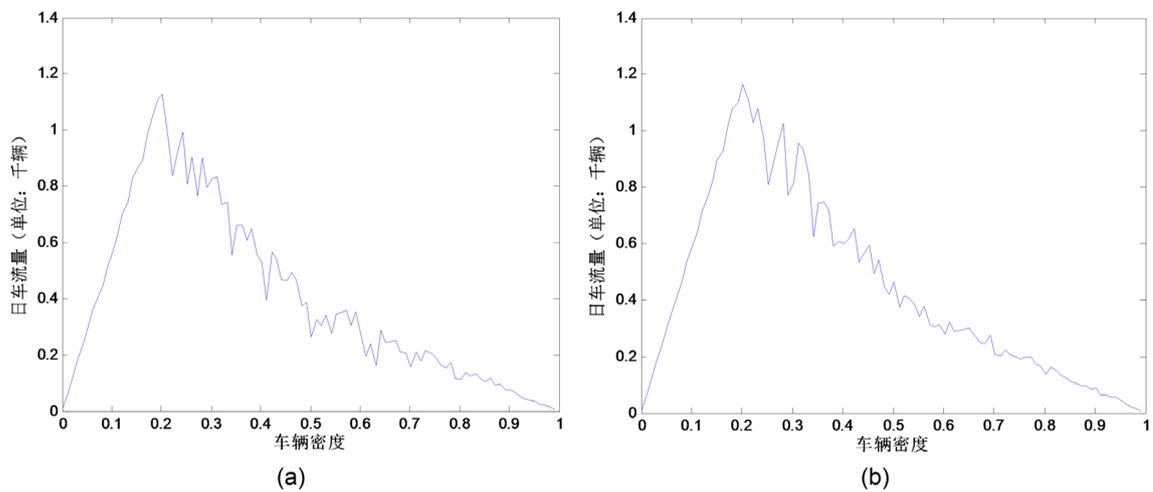


Figure 1. The flow-density diagrams: (a) Before and (b) After the community' opening

图 1. 小区: (a) 开放前; (b) 开放后的流量 - 密度图

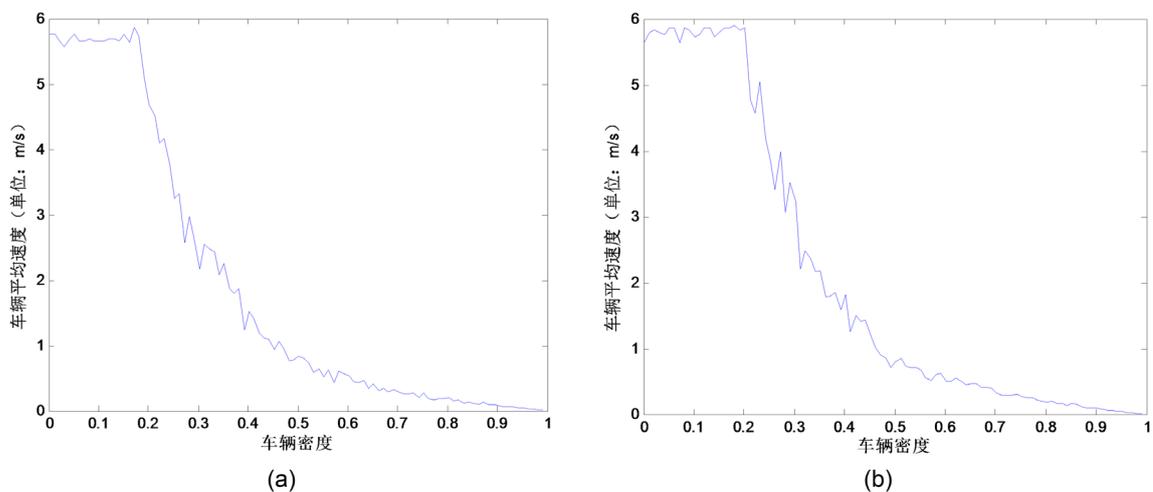


Figure 2. The velocity-density diagrams: (a) Before and (b) After the community' opening

图 2. 小区: (a) 开放前; (b) 开放后速度 - 密度图

首先, 如图 1 所示可以看出小区开放前后日交通流量都是随着车辆密度的增加先快速增加, 然后再缓慢减少, 如图 2 所示可以看出小区开放前后车辆平均速度随着车辆密度的增加先保持平稳, 然后再快速减少, 车辆密度趋于 1 时, 日交通流量和平均速度均趋于 0。这符合交通流参数之间的关系, 并且达到临界密度后, 随着车辆密度的继续增加, 速度和流量越来越小, 因此堵塞现象越来越严重。但是小区开放之后, 临界密度有所增加, 从大约 0.2 变到了大约 0.22, 最大流量也从大约 1.15 增加到了 1.19, 且拥堵状态下的速度和流量也在小区开放后有所提高。这说明在预设参数下, 开放小区可以提高交通流量, 适度缓解交通拥堵。另一方面, 从分析结果来看, 我们的车辆通行模型也是可靠的。

结合小区的实际情况, 我们也能明显地感觉到, 小区开放后, 在原有的路网结构基础上新增了若干条支路, 作为周边道路的“毛细血管”, 分担了部分车流量, 使得车辆分布没有之前那么集中了, 车速也随之增加了。而模拟过程中, 当改变预设参数使车辆密度再次增加时, 这种优势没有那么明显了。由此可见, 小区开放也不是万能的, 只能在一定条件下对道路通行有积极地影响。

3.2. 实例分析

本部分选取两个实际的小区, 来验证建立的车辆通行能力模型和数值模拟分析结果, 从而研究小区开放对交通流的影响。我们选取了交通较为拥堵的河南省郑州市的两个不同的小区作为实际例子进行分析, 并将小区实际参数代入到两个具体小区开放前后的数据信息对比中进行分析。如路旁干扰系数 α 、小区道路交通服务水平 β 、侧向净宽修正系数 γ 、路宽修正系数 ω 、交叉路口数量 s 等, 我们依据具体小区周边道路的车速限制、车道宽度及小区路网结构、交叉路口数量变化等, 来对各个参数进行合理化取值, 再将各个参数的具体数据代入至小区开放前、开放后的车辆通行能力模型中, 以车辆通行能力值的增减来评判小区开放是否会起到缓解周边道路拥堵的作用。

3.2.1. 外围车辆经过小区——以紫云小区为例

紫云小区南区位于河南省郑州市管城回族区货站街与未来路交叉口处, 小区住宅楼总体呈东西对称分布, 内部路网为方形网格状路网, 共有两个出入口, 属于典型的封闭式小区。如图 3(a)所示为高德地图显示紫云小区的地理位置和路网情况, 如图 3(b)所示为使用 AutoCAD 软件绘制的紫云小区矢量地图。

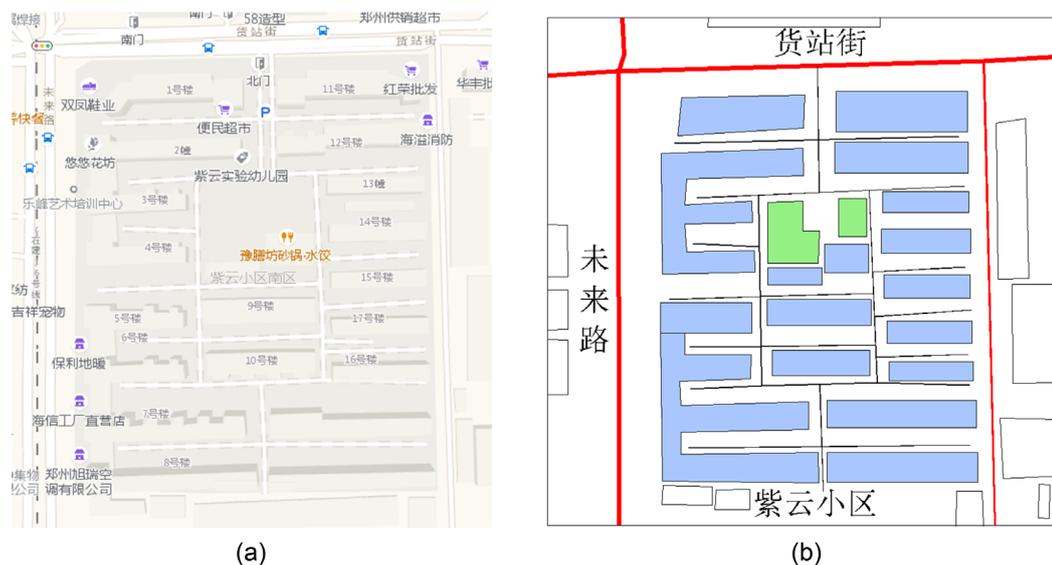


Figure 3. (a) The Gaode map and (b) The vector map of Ziyun community

图 3. 紫云小区: (a) 高德地图; (b) 矢量地图

如图 3(b)所示可以看到, 紫云小区西边的未来路和东边的货站街为郑州的主干道, 东边街道为次干道, 小区内部道路等级为支路。依据第六次人口普查的数据, 郑州市六个区人口合计 4,253,627 人, 大于 200 万人, 属于大城市, 依据《城市道路交通规划设计规范》中的规定(如表 4 所示), 紫云小区周围道路的车辆运行情况如表 5 所示。

Table 4. Recommended values of urban road projects in Urban Road Traffic Planning and Design Code
表 4. 《城市道路交通规划设计规范》城市道路各项目推荐值[24]

级别	>200 万人城市			<200 万人城市		
项目	车速(km/h)	车道数	车道宽度 (m)	车速(km/h)	车道数	车道宽度(m)
快速路	80	≥4	3.75	60~80	≥4	3.5
主干道	60	≥4	3.5	40~60	3~4	3.5
次干道	40	2~4	3.5	40	2~4	3.5
支路	20	2	3.25	30	2	3.25

Table 5. The operation of the vehicles on the road round Ziyun community
表 5. 紫云小区周边道路车辆运行情况

路名	未来路	货站街	东边街道	南边街道
道路等级	主干道	主干道	支路	支路
车速	60	60	30	30
车道数	8	6	2	2
车道宽	3.75	3.75	3.25	3.25

由表 1~5 中的数据可知: 我们设定紫云小区在开放前, 平均车速为 $v=7$, 设计车速下的饱和度 $C_{op}=0.5$, 道路交通服务水平饱和度为 $\beta=0.28$, 路旁干扰系数为 $\alpha=1$, 路宽修正系数为 $\omega=1$, 侧向净宽修正系数为 $\gamma=1$, 红绿灯周期时长 $T_e=180$, 一个交叉路口内的平均车头总时距 $\lambda=30.4$, 交叉路口数量为 $s=4$ 等; 在紫云小区开放后交叉路口数量变为 $s=9$, 道路交通服务水平变为 $\beta=0.67$, 其他参数均保持不变。

将紫云小区的数据代入模拟程序中可以得到, 紫云小区开放前的车辆通行能力值为 480, 开放后的车辆通行能力值为 1082。从运行结果来看, 紫云小区开放后道路通行能力提高了很多。而从实际情况出发, 首先, 我们注意到, 紫云小区内部道路较宽, 与小区外道路几乎无差异; 其次, 紫云小区内部的道路可以直通外界; 除此之外, 紫云小区外路网结构简单, 开放后, 相当于道路面积增加, 能够有效缓解交通压力。所以仅从道路通行能力来讲, 此类小区开放较好。

3.2.2. 内部车辆出入小区——以响水湾小区为例

响水湾小区位于河南省郑州市二七区铭功路和沿河路交叉口西侧 200 米处, 小区住宅楼分为西北和东南方向两个建筑群, 南北方向均有建筑小区, 内部路网为方形网格状路网, 只有一个出入口与沿河路连接, 属于典型的封闭式小区。当上、下班高峰期时间时, 小区进出口便可能出现交通拥堵情况。如图 4(a)所示为高德地图显示的响水湾小区的地理位置和路网情况, 如图 4(b)所示为使用 AutoCAD 软件绘制的矢量地图。

如图 4(b)所示可以看到, 响水湾小区西边的沿河路为次干道, 小区内部道路等级为支路。响水湾小区周围道路的车辆运行情况如表 6 所示。



Figure 4. (a) The Gaode map and (b) The vector map of Xiangshuiwan community
图 4. 响水湾小区: (a) 高德地图; (b) 矢量地图

Table 6. The operation of the vehicles on the road round Xiangshuiwan community
表 6. 响水湾小区周边道路车辆运行情况

路名	沿河路	内部及环区路
道路等级	次干道	支路
车速	40	20
车道数	4	2
车道宽	3.5	3.25

由表 1~6 中的数据可知: 我们设定响水湾小区在开放前, 平均车速为 $v=7$, 设计车速下的饱和度 $C_{op}=0.5$, 道路交通服务水平饱和度为 $\beta=0.46$, 路旁干扰系数为 $\alpha=1$, 路宽修正系数为 $\omega=0.9$, 侧向净宽修正系数为 $\gamma=1$, 红绿灯周期时长 $T_c=180$, 一个交叉路口内的平均车头总时距 $\lambda=30.4$, 交叉路口数量为 $s=5$ 等; 在响水湾小区开放后, 交叉路口数量变为 $s=8$, 道路交通服务水平变为 $\beta=0.5$, 路宽修正系数变为 $\omega=0.64$, 其余参数均保持不变。

将响水湾小区的数据代入模拟程序中可以得到, 响水湾小区开放前的车辆通行能力值为 600, 开放后的车辆通行能力值为 480。从运行结果来看, 响水湾小区开放后道路通行能力有了明显的下降。从实际情况出发, 首先我们注意到响水湾小区内部的道路较窄, 会降低整个道路体系的路宽修正系数, 而且即便开放后能够分走部分车流量, 对于整个道路体系来讲, 效果也不明显。其次, 响水湾小区内部的路为环形路且有数条尽端路, 无法连接外界, 车辆进入响水湾小区势必要迂回前进甚至一时走不出去, 如此一来会造成响水湾小区内部阻塞现象加剧, 增加车辆行驶时间。所以仅从道路通行能力来讲, 此类小区不开放较好。

4. 结论

本文在小区开放问题背景下, 考虑影响小区周边主路车辆通行能力的因素, 建立了基于元胞自动机 NaSch 模型的车辆通行能力模型, 以此讨论小区开放的利弊。利用所建模型进行数值仿真, 模拟分析了预设参数下小区开放前后周边主路交通流量、平均速度的变化情况和小区开放的效果。选取了河南郑州市

的紫云小区和响水湾小区进行实例分析, 并考虑了道路通行能力修正系数, 得到了并非所有小区都适合开放的结论, 实际小区是否适合开放, 开放能否提高周边主路道路通行能力和缓解交通拥堵与小区内部结构和周边道路环境密切相关。而在未来的研究中, 进行相关地区的交通实测, 获取实测数据, 来验证模型的有效性, 将是更有意义的问题

致 谢

在此对本文提出修改意见的专家表示感谢! 对本文的资助项目表示感谢!

基金项目

本文得到中国河南省科技攻关项目(项目号: 172102210271)和中国河南理工大学博士基金项目(项目号: B2018-50)的资助。

参考文献

- [1] Reusch, B. (1950) Vehicle Movements in a Platoon. *Österreichisches Ingenieur-Archiv*, **4**, 193-215.
- [2] Pipes, L.A. (1953) An Operational Analysis of Traffic Dynamics. *Journal of Applied Physics*, **24**, 274-281. <https://doi.org/10.1063/1.1721265>
- [3] 王涛, 高自友, 赵小梅. 多速度差模型及稳定性分析[J]. *物理学报*, 2006, 55(2): 634-640.
- [4] Lighthill, M.J. and Whitham, G.B. (1955) On Kinematic Waves: II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. *Proceedings of the Royal Society of London*, **229**, 317-345. <https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0089>
- [5] Richards, P.I. (1956) Shock Waves on the Highway. *Operations Research*, **4**, 42-51. <https://doi.org/10.1287/opre.4.1.42>
- [6] Jiang, R., Wu, Q.S. and Zhu, Z.J. (2002) A New Continuum Model for Traffic Flow and Numerical Tests. *Transportation Research Part B: Methodological*, **36**, 405-419. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(01\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(01)00010-8)
- [7] Nagel, K. and Schreckenberg, M. (1992) A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic. *Journal de Physique Archives*, **2**, 2221-2229. <https://doi.org/10.1051/jp1:1992277>
- [8] 贾斌, 高自友, 李克平, 李新刚. 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: 10.
- [9] Bazzan, W.J. and Schreckenberg, M. (2002) The Impact of Real-Time Information in a Two-Route Scenario Using Agent-Based Simulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **10**, 399-417. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(02\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(02)00031-1)
- [10] Hino, Y. and Nagatani, T. (2015) Asymmetric Effect of Route-Length Difference and Bottleneck on Route Choice in Two-Route Traffic System. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **428**, 416-425. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.01.086>
- [11] 李力, 姜锐, 贾斌, 赵小梅. 现代交通流理论与应用(卷 I)——高速公路交通流[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [12] 袁耀明. 交通流元胞自动机模型的解析和模拟研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [13] 李向朋. 城市交通拥堵对策——封闭型小区交通开放研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- [14] 徐美林. 封闭街区道路开放适宜性评价研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [15] 管怡成, 颜廷晓, 龚长会. 开放式小区对道路通行的影响[J]. *物流工程与管理*, 2017, 39(1): 85-86+82.
- [16] 杨柏松, 刘飞, 陈金鹏, 蔡泉. 小区开放度对道路通行能力的影响研究[J]. *辨识建模与仿真*, 2019, 38(6): 126-132.
- [17] 张彭豪, 徐延海. 开放周边道路的分析[J]. *山东商业职业技术学院学报*, 2016, 16(6): 105-108.
- [18] 贾晓敏. 城市道路通行能力影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2009.
- [19] 交通运输部办公厅. 关于调整公路交通情况调查车型分类及车辆折算系数的通知[R]. 北京: 交通运输部, 2005.
- [20] 陈宽民, 严宝杰. 道路通行能力分析[M]. 第2版. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [21] 美国交通研究委员会, 主编. 美国道路通行能力手册[M]. 任福田, 译. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [22] 李红亮. 混合交通流的元胞自动机模型的研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 广西师范大学, 2007.
- [23] 李建鹰. 元胞自动机在城市交通中的应用[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [24] 商仲华. 居住小区开发交通影响分析研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2006.