

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022120424021987

文章编号:1674-599X(2024)01-0116-11

引用格式:江航,杨光,邱皓,等.基于三维宏观基本图的城市机非混行交通研究[J].交通科学与工程,2024,40(1):116-126.

Citation:JIANG Hang, YANG Guang, QIU Hao, et al. Urban mixed traffic flow model based on 3D macroscopic fundamental diagram [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2024, 40(1): 116-126.

基于三维宏观基本图的城市机非混行交通研究

江航^{1,2}, 杨光¹, 邱皓², 顾文钊²

(1. 河南科技大学 车辆与交通工程学院, 河南 洛阳 471000;

2. 江苏中设集团股份有限公司, 江苏 无锡 214125)

摘要:为解决城市交通中机动车与非机动车混合行驶造成的交通拥堵,提出一种三维宏观基本图的理论分析方法,探究机动车与非机动车混行交通流的微观运行特征和宏观演化规律,揭示在非机动车干扰下交通拥堵的形成、传播和消散机理。先分别建立描述非机动车流的元胞自动机模型和机动车流的元胞传输模型,并借助非机动车越线次数函数将两个模型耦合;然后,在Simulink仿真平台上,运行该耦合模型以求得路网的三维宏观基本图,并以此分析非机动车驶入流量与路网平均流量、冲突次数三者间的相互关系;最后,提出提高路网硬隔离占比和加大非机动车道宽度的两种方法,借助三维宏观基本图来验证其缓解交通拥堵的效果。研究结果表明:三维宏观基本图的分析方法可量化机动车和非机动车冲突的影响,指导混行交通拥堵的治理,该结论为改善中国城市交通出行秩序和出行环境提供了参考。

关键词:混合交通流;元胞自动机模型;元胞传输模型;三维宏观基本图

中图分类号:U491

文献标志码:A

Urban mixed traffic flow model based on 3D macroscopic fundamental diagram

JIANG Hang^{1,2}, YANG Guang¹, QIU Hao², GU Wenzhao²

(1. College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471000, China;

2. Jiangsu Zhongshe Co., Ltd., Wuxi 214125, China)

Abstract: Mixed Vehicle-bicycle flow is a typical feature of urban traffic. Vehicles are frequently interfered by Bicycles will lead to increased delays in vehicle travel, reduced Vehicle speed of traffic flow, and decreased the accumulation of vehicles on local roads. In this paper, a theoretical analysis method of 3D-Macroscopic Fundamental Diagram is proposed to explore the microscopic operation characteristics and macroscopic evolution law of mixed traffic flow. Firstly, a cellular automaton model describing the bicycle traffic flow and a cellular transmission model describing the vehicle traffic flow are established respectively. Then, the Simulink simulation platform was built and the coupled model was run to obtain the 3D-Macroscopic Fundamental Diagram of the road network. Finally, two methods were designed to improve the proportion of isolation in the road network and to increase the width of bicycle lanes The results show that the 3D-Macroscopic Fundamental Diagram can quantify

收稿日期:2022-12-04

基金项目:河南省科技攻关计划项目(212102310040);河南省高等学校重点科研项目(21A580003)

作者简介:江航(1987—),男,江苏中设集团股份有限公司高级工程师。E-mail: jianghang221@163.com

the impact of conflict, guide the governance of mixed traffic congestion, and provide technical support for improving the travel order and environment of urban traffic.

Key words: mixed traffic flow; cellular automata model; cell transmission model; 3d-macroscopic fundamental diagram

机动车和非机动车混合行驶是中国城市交通的典型特征之一。在交叉口与无隔离的路段上,非机动车会因竞争行驶空间而干扰机动车运行,与机动车形成复杂的异质交通流。在异质交通流内部,非机动车频繁干扰机动车运行,导致机动车行程延误陡增,交通流运行速度降低,车辆在局部道路聚集,进而触发交通拥堵。因此,了解在非机动车干扰下交通流在城市路网上的演化规律,成了近年来科研人员关注的焦点之一。

国内外对异质交通流特性的研究已取得较为丰富的成果,如机动车与非机动车的横向冲突^[1-2],机动车与非机动车冲突导致的碰撞行为^[3-5],行人、非机动车、机动车组成的混合流特征^[6],自行车与机动车组成的混合流特征^[7]等。当前,许多研究者采用改进的元胞自动机模型对其进行分析。DONG等^[8]利用元胞自动机建立了机动车、电动自行车和自行车的三股混合交通流模型,并利用 MATLAB 数值软件验证了其模型的可靠性,发现冲突率随道路占用率的增加先增加后降低,并随着机动车辆比例系数的提高而增加。VASIC等^[9]在路段与交叉口两种场景下分别模拟了小汽车与自行车混合流。JIN等^[10]提出了一种改进的多值元胞自动机模型,将普通自行车与电动自行车分开进行考虑,发现改进的扩展元胞自动机(extend burgers cellular automata, EBCA)模型比以前的模型更符合现场观察结果,且改进模型更贴近实际的自行车行驶过程。魏丽英等^[11-12]发现摩擦干扰是机动车通行能力下降的主要原因。梁经韵等^[13]研究了最大速度多样性、侧向摆动性及车流异质性等自行车特性对机非混合交通流的影响。游诗广等^[14]基于 Nasch 模型,制定了新的换道规则,搭建了一种机动车与电动自行车混行的混合交通流模型。其研究表明:机动车与电动自行车的数量比例与电动自行车的换道行为对混合交通流的影响较大。姚凯斌等^[15]突破了元胞传输模型(cell transmission model, CTM)中元胞长度必须相等的局限性,建立了新模型,该新模型对混合交通流的排队、消散特性的模拟更贴近实际情

况。冯雪等^[16-17]建立了一种考虑机动车与非机动车的异质性与鸣笛效应的改进元胞自动机模型(cellular automata, CA),该模型能更加真实地模拟混合交通流运行状况。郑容森等^[18]建立了双车道混合交通流模型,并考虑了超车影响,得出混合交通流的若干重要特性。应力天^[19]建立了最大速度差异的 CA 模型,发现随机慢化与速度呈正相关,且在阻滞摩擦干扰下,机动车的通行能力将明显下降。邱夫成等^[20]建立了不同混合比例的混合交通流 CA 模型,研究了混合交通流中机动车与非机动车的相互干扰机理。

然而,机动车和非机动车在驾驶行为上有明显的区别,很难用同一个模型来描述机动车与非机动车混合交通流的演化规律。因此,也有研究者将两种不同的交通流仿真模型进行耦合,分别描述两种车辆的行为特征,并搭建模型。张兴强等^[21]建立了交叉口混合交通流元胞自动机模型(NaSCh-Burgers cellular automata, NS-BCA),从流量-车辆到达率关系、交通流相位-到达率-混合交通流状态等方面研究了交叉口混合交通流的相互干扰机理。邝先验等^[22-23]建立了(speed-strictive effect of transverse space-cellular automata, SST-CA)耦合模型,发现机动车道混行交通产生的偏析现象是由非机动车主导的,该偏析效应会随着非机动车换道概率的降低与车辆密度的上升而加强。贾宁等^[24-25]用 Nasch 模型来描述机动车流的行为,并用 EBCA 模型描述自行车流的行为,建立了在自行车干扰下的机动车流模型,其发现在机动车流中,机动车与非机动车的车流的密度决定了它们之间的主要干扰形式。其中,自行车对机动车的干扰主要影响的是低密度的机动车流。胡庆华^[26]将 NaSch 模型和 BCA 模型进行了耦合,从交通流量与车辆到达率的关系的角度分析了机动车与非机动车干扰的机理。夏亮等^[27]基于 EBCA2 模型,从最大速度的角度进行了扩展。其研究表明:不同速度的随机慢化行为对交通流有着不同的影响。杨海飞等^[28]提出一种宏观与微观相结合的混合交通流模型,该模型可模拟不同层次的

交通流。

目前,国内外的研究多是针对单个路段或交叉口,路网级别机非混行交通流的相互作用机理和拥堵传播关系的研究鲜见。为既从微观层面描述机非相互作用关系,又从宏观路网层面揭示该关系对交通流传播的影响,提出一种耦合元胞自动机和元胞传输模型的建模方法,获取路网宏观基本图,对机动车与非机动车的干扰机理进行量化评估,以期在城市交通规划提供参考。

1 模型建立

1.1 非机动车流模型

本研究采用EBCA模型来模拟非机动车流。在模拟过程中,该模型可实时获得路网各路段非机动车道上的非机动车数量。

在EBCA模型中,路段划分为多个等距元胞,每个元胞可容纳多辆非机动车,在单位时间内,非机动车只能向前走1或2个元胞,即非机动车辆最大前进速度为1或2元胞/s,速度为1元胞/s的非机动车拥有优先通行权。EBCA模型车辆更新方程为

$$U_j^a(t+1) = U_j^a(t) + b_{j-1}^a(t) - b_j^a(t) + c_{j-2}^a(t) - c_{j-1}^a(t) \quad (1)$$

$$b_j^a = \min(U_j^a(t), M - U_{j+1}^a(t)) \quad (2)$$

式中: $U_j^a(t+1)$ 为a路段在t+1时刻元胞j上的非机动车数;

$b_j^a(t)$ 为a路段在t时刻元胞j中向前移动1个元胞的非机动车数;

$c_{j-2}^a(t)$ 为a路段在t时刻元胞j中向前移动2个元胞的车辆数;

M为元胞内能容纳的最大非机动车数量。

1.2 宏观机动车流模型

元胞传输模型(cell transmission model, CTM)能较好地模拟路网中各个路段车流相互影响的状态,且该模型具有良好的改进空间。林琴等^[29]提出了改进的元胞传输模型,研究了合流区域交织区的交通流特征。在该模型中,路段被划分为多个等距且尺寸较大的元胞,每个元胞可容纳多辆机动车。而CTM节点模型则同时考虑了交叉口的渠化以及信号控制等因素,能较好地描述车流在路网中的流动状态,其路段之间车流传播的方程为

$$y_{ab}(\xi) = \min \{ n_{r,b}(\xi), \delta_{ab}(\xi) Q_{ab}(\xi), R_l^b(\xi) \} \quad (3)$$

式中: $y_{ab}(\xi)$ 为在ξ时刻路段b的首元胞来自路段a末尾元胞的流入量;

$n_{r,b}(\xi)$ 为在ξ时刻路段a末尾元胞去往路段b的车辆数;

$\delta_{ab}(\xi)$ 为0-1变量, $\delta_{ab}(\xi)=1(0)$ 表示ξ时刻路段a、b间的控制信号灯为绿灯(红灯);

$Q_{ab}(\xi)$ 为ξ时刻路段a尾元胞分配给去往路段b方向车流的流出能力;

$R_l^b(\xi)$ 为ξ时刻b路段第l个元胞在最大承载能力下,能接受上游元胞l-1驶入下游元胞l的机动车数量。

$$y_{r,b}(\xi) = \min \{ n_{r,b}(\xi), R_l^b(\xi) - \sum_{a \in A_r} y_{ab}(\xi) \} \quad (4)$$

式中: $y_{r,b}(\xi)$ 为ξ时刻路段b的首元胞来自节点产生的流入量;

$n_{r,b}(\xi)$ 为ξ时刻节点r产生的经由路段b的车辆数(包括ξ时刻前滞留的车辆)。

$$R_l^b(\xi) = \min \left\{ Q_l^b(\xi), \frac{w [N_l^b(\xi) - n_l^b(\xi)]}{v_{free}} \right\} \quad (5)$$

式中: $Q_l^b(\xi)$ 为ξ时刻b路段第l个元胞承载上游元胞的流入能力;

w为反向激波速度;

v_{free} 为自由流车速;

$N_l^b(\xi)$ 为ξ时刻b路段第l个元胞的最大承载能力;

$n_l^b(\xi)$ 为ξ时刻b路段第l个元胞的车辆数。

采用修改后的CTM节点模型,考虑机动车与非机动车的软隔离路段及在机动车与非机动车混合交通流中,非机动车往往会占用机动车元胞的空位。用 N_2 表示机动车与非机动车的软隔离路段上的元胞最大承载能力, N_2 的计算表达式为

$$N_2 = E(N_1 - \eta \times 0.5) \quad (6)$$

式中:E为向零取整函数;

N_2 为没有非机动车影响下元胞的最大承载能力;

η 为非机动车越线次数。

同时,更新 $R_\lambda^a(\xi)$,其更新后的表达式为

$$R_\lambda^a(\xi) = \min \left\{ Q_\lambda^a(t), \frac{w [N_\lambda^a(t) - n_\lambda^a(t)]}{v_{free}} \right\} \quad (7)$$

$$N_\lambda^a(\xi) = \begin{cases} N_{\lambda,2}^a(\xi), & 0 \\ N_{\lambda,1}^a(\xi), & 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $N_{\lambda,1}^a(\xi)$ 为 ξ 时刻机非硬隔离路段 a 路段第 λ 个元胞的最大承载能力;

$N_{\lambda,2}^a(\xi)$ 为 ξ 时刻机非软隔离路段 a 路段第 λ 个元胞的最大承载能力;

0-1变量中,0表示机非软隔离,1表示机非硬隔离。

1.3 耦合方法

建立两项规则使两个模型中的元胞标号与仿真步长一一对应,并建立机动车与非机动车越线次数函数,将EBCA模型的数据传递至CTM模型。

1.3.1 对应规则

先将EBCA路段模型的元胞与CTM节点模型的元胞一一对应,对应关系为

$$\textcircled{1} \left\{ \left[(\lambda - 1) \frac{l_1^a}{l_2^a}, \left[(\lambda - 1) \frac{l_1^a}{l_2^a} + 1 \right], \right. \right. \quad (9)$$

$$\left. \left. \left[(\lambda - 1) \frac{l_1^a}{l_2^a} + 2 \right] \right\}, \dots, \left[\lambda \frac{l_1^a}{l_2^a} \right] \rightarrow \textcircled{2} \lambda$$

式中: $\textcircled{1}$ 部分为EBCA模型与CTM节点模型对应的位置及数量关系,表示从EBCA模型第 $(\lambda - 1) \frac{l_1^a}{l_2^a}$ 个元胞开始到第 $\lambda \frac{l_1^a}{l_2^a}$ 个元胞结束,共计 $\frac{l_1^a}{l_2^a}$;

$\textcircled{2}$ 部分为CTM节点模型 a 路段的第 λ 个元胞;

l_1^a 为CTM节点模型 a 路段单个元胞长度;

l_2^a 为EBCA路段模型 a 路段单个元胞长度。

将EBCA1路段模型的仿真步长与CTM节点模型的仿真步长一一对应,对应关系为

$$\xi = z \times \tau \quad (10)$$

式中: ξ 为EBCA路段模型的第 ξ 个仿真步长;

z 为CTM节点模型的第 z 个仿真步长;

τ 为CTM节点模型一个步长所用时间。

通过这两项规则确保了非机动车流模型和宏观机动车流模型可以进行实时数据交互。

1.3.2 机非越线次数函数

通过观测路段的机非越线次数,采集路段非机动车越线实际数据,依据实际数据的分布状态,使用MATLAB数值软件进行线性拟合。

机动车与非机动车越线次数的函数表达式为

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 w_2 \quad (11)$$

式中: x_1 为非机动车数量;

w_2 为非机动车道宽度;

η 为非机动车越线次数;

β_1, β_2 均为拟合线性函数的系数。

先将非机动车流模型中获得的非机动车数量代入到机非越线次数函数中,得到 η ;然后;将其代入宏观机动车流模型中,计算非软隔离路段元胞的最大承载能力 $N_{机非}, N_{机非}$ 表示机动车与非机动车软隔离情况下元胞的真实容量。

通过机动车与非机动车越线函数的串联,将两种不同交通流仿真模型耦合起来,以模拟路网级别的城市机非混合交通流特征。

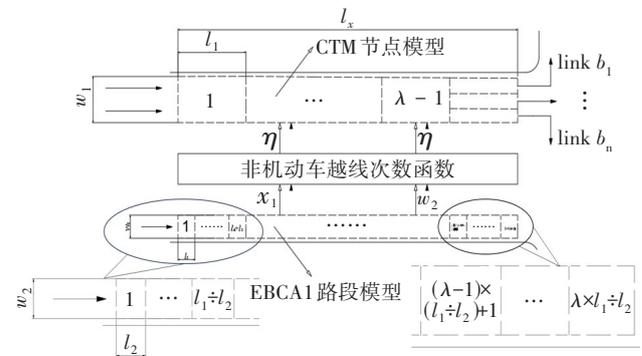


图 1 模型耦合示意

Fig. 1 Model coupling

2 仿真模拟与结果分析

2.1 仿真路网与模型参数

本研究在Simulink仿真平台上搭建EBCA-CTM耦合模型。数据采集自河南省洛阳市涧西区的路网数据,该地区共有132条道路与28个交叉口。其中,具有机动车与非机动车软隔离的道路共72条,具有机动车与非机动车硬隔离的道路共60条。机动车道均为双向四车道,非机动车道的宽度均为2 m。非机动车流模型的参数设定见表1。宏观机动车流模型的参数设定见表2。

表 1 非机动车流模型参数

Table 1 Parameters of non-motor vehicle flow model

元胞长度/ m	元胞一条车道承载 能力/辆	最大速度/ (km·h ⁻¹)	最小速度/ (km·h ⁻¹)
2	1	14.4	7.2

表2 宏观机动车流模型参数

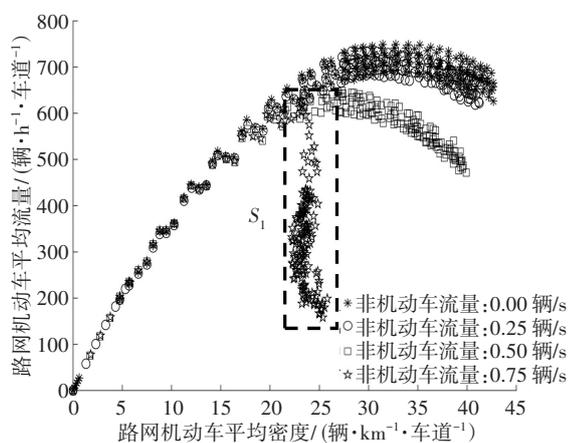
Table 2 Parameters of macro motor vehicle flow model

元胞长度/m	元胞一条车道承载能力/辆	元胞单个车道通行能力/(辆·h ⁻¹)	自由流速度/(km·h ⁻¹)	反向激波速度/(km·h ⁻¹)	阻塞密度/(辆·km ⁻¹)
150	20	2 000	54	45	133

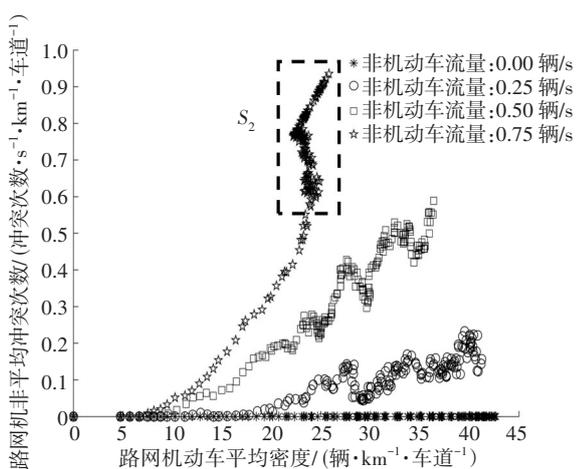
2.2 非机动车驶入量对宏观基本图的影响

2.2.1 非机动车驶入量对路网平均流量的影响

为研究非机动车驶入量对路网平均流量的影响,绘制不同非机动车驶入流量下的机动车宏观基本图,如图2所示。



(a) 机动车平均流量-机动车平均密度关系



(b) 机非冲突次数-机动车平均密度关系

图2 不同非机动车驶入流量下的机动车宏观基本图

Fig. 2 Macroscopic fundamental diagram of motor vehicles under different inbound flow rates of non-motor vehicles

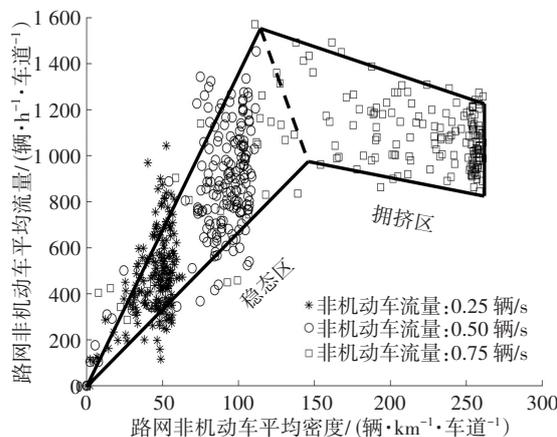
从图2(a)可以看出,当非机动车驶入流量为

0.0~0.5 辆/s时,路网机动车平均流量呈先上升,再平稳的趋势;在非机动车驶入流量达到0.75 辆/s时,路网机动车平均流量先上升,再断崖式下降,出现了S₁区域。图2(a)中的S₁区域对应图2(b)中的S₂区域。在S₂区域内,非机动车与机动车的冲突数量直线上升,两者间干扰很严重。这表明:随着非机动车驶入流量加大,机动车与非机动车之间的冲突在增加,机动车的平均流量下降,当驶入流量达到临界值后,机动车与非机动车之间的冲突数量直线上升,机动车的平均流量断崖式下降。因此,亟须研究S₂区域内机动车与非机动车冲突数量急剧增加的原因。

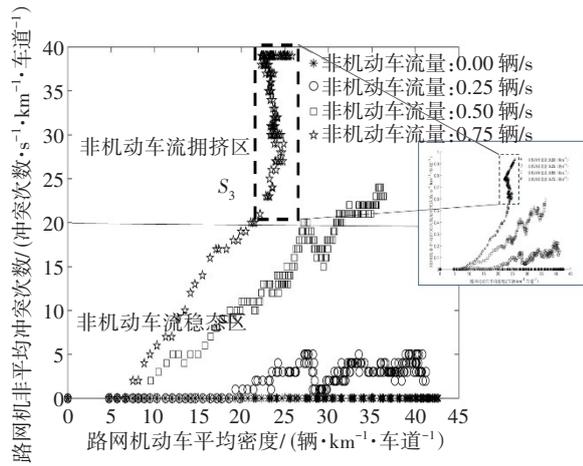
2.2.2 非机动车流状态对冲突次数的影响

为分析S₂区域内机动车与非机动车冲突急剧增加的原因,绘制非机动车平均流量与非机动车平均密度的宏观基本图,如图3所示。在图3(a)中,星号、圆圈、方块分别代表了非机动车驶入流量为0.25、0.50、0.75 辆/s的情况。可将图3(a)划分为稳态区与拥挤区,介于二者之间的非机动车临界区的密度为150 辆/km 车道。这表明:当非机动车驶入流量达到0.75 辆/s时,非机动车流的状态会逐渐越过稳态区进入拥挤区,车流开始逐渐下降。

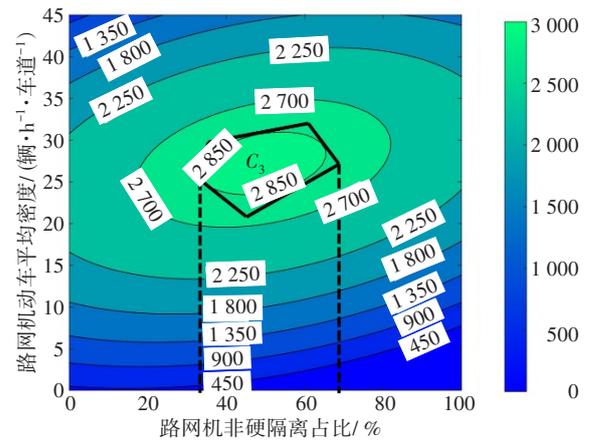
从图2(b)与图3(b)可以看出,当非机动车驶入流量为0.75 辆/s时,随着机动车平均密度的增加,机动车与非机动车冲突次数与非机动车平均密度均先平稳增加;再直线上升,即S₂与S₃区域。这表明:非机动车的密度与机动车与非机动车冲突数量有很强的正相关性,非机动车密度快速增加是机动车与非机动车冲突数量快速上升的根本原因。



(a) 非机动车平均流量-非机动车平均密度关系



(b) 机动车平均密度-机动车平均密度关系图



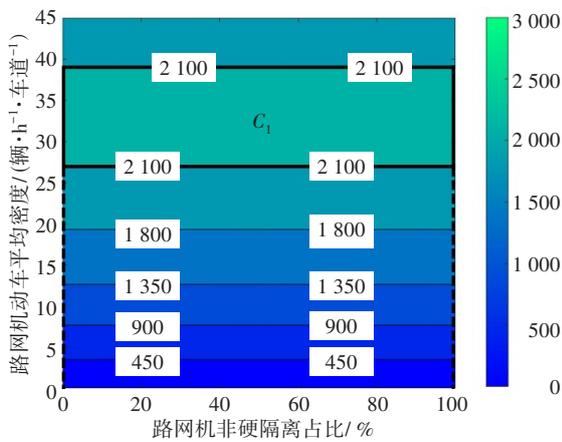
(c) 非机动车驶入量为 0.50 辆/秒

图 3 不同非机动车驶入流量下的非机动车宏观基本图

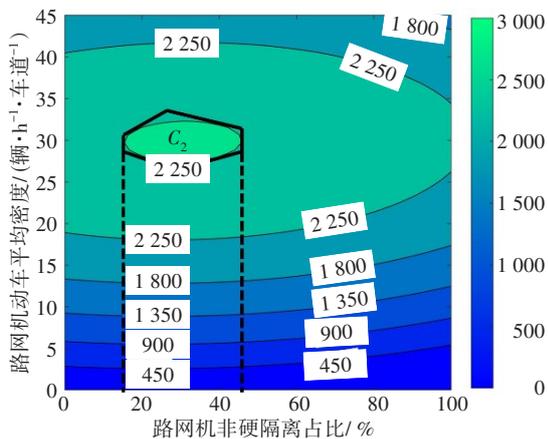
Fig 3. Macroscopic fundamental diagram of non-motor vehicles under different inbound flow rates

2.3 路网硬隔离占比对路网的效率影响

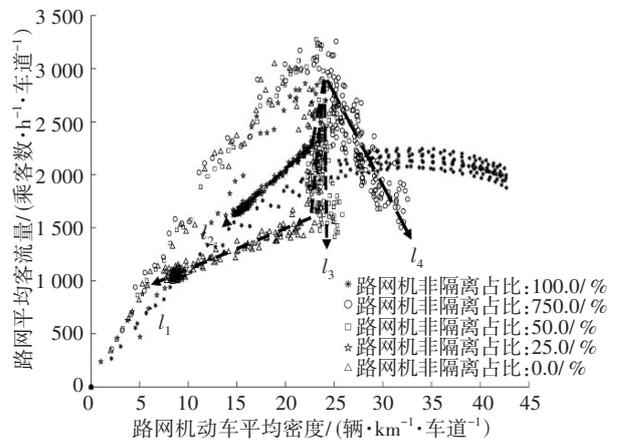
不同非机动车驶入量下路网硬隔离占比对宏观基本图的影响如图 4 所示。



(a) 非机动车驶入量为 0.00 辆/s



(b) 非机动车驶入量为 0.25 辆/秒



(d) 非机动车驶入量为 0.75 辆/秒

图 4 不同非机动车驶入量下路网硬隔离占比对宏观基本图的影响

Fig. 4 Influence of isolation ratio of road network on macroscopic fundamental diagram under different driving volume of non-motor vehicles

图 4 描述了路网平均客流量与机动车密度、路网机非硬隔离占比三者之间的关系,全面地描述了混合交通的宏观特征。在图 4(d)中,曲线在机动车临界密度处发生突变,表明拟合的三维宏观基本图效果不佳。因此,采用传统的二维宏观基本图来展示不同路网硬隔离占比下路网平均客流量的变化规律。

从图 4(a)可以看出,非机动车的驶入流量为 0.00 辆/s 时,路网平均客流量不随路网隔离占比的增加而改变,此情况下最优的路网隔离设置占比为 0%。

从图 4(b)可以看出,非机动车的驶入流量为

0.25 辆/s时,路网平均客流量随着路网隔离占比的增加先增加,再减少,路网的效率在 C_2 区域内,此时路网隔离占比为 15%~45%。当路网隔离占比为 0%~15%时,增加的机动车客流量大于减少的非机动车客流量,路网效率增加;当路网隔离占比为 45%~100%时,增加的机动车客流量逐渐小于减少的非机动车客流量,路网效率减少。这表明:选择适当的路网隔离占比能提高路网的效率。

从图 4(c)可以看出,当非机动车的驶入流量为 0.50 辆/s时,与图 4(b)的变化趋势一样,路网的效率在 C_3 区域内,此时的路网隔离占比为 35%~70%。保持路网最大效率的路网隔离占比取值范围,整体向后移动。这说明:随着非机动车驶入流量的增加,机动车与非机动车间干扰加剧,机动车与非机动车之间是恶性竞争。可通过增加路网非机动车隔离占比,减少机动车与非机动车间的干扰,将机动车客流量减少到可控范围,提高路网效率。

从图 4(d)可以看出,当非机动车的驶入流量为 0.75 辆/s时,不同路网隔离比例下宏观基本图的变化有很大区别。当路网隔离占比为 0%时,路网平均客流量在达到最大值后,快速下降而后产生回滞,如 l_1 所示,此时路面开始发生拥堵,非机动车客流和机动车客流同时减少;当路网隔离占比为 25%时,下降和回滞的幅度都明显减小,如 l_2 所示;当路网隔离占比为 50%时,路网平均客流量先达到最大值,然后急速下降,但不发生回滞现象,如 l_3 所示;当路网隔离占比为 75%时,下降幅度得到缓和,但急速拥堵现象仍会发生;当路网隔离占比为 100%时,路网平均客流量呈先增后减的趋势,最大值没有前四种情况的大,但其曲线变化较平滑,不会出现突变,机动车和非机动车也并未发生提前拥堵的情况。这表明:在非机动车驶入流量较高的区域内,随着路网中硬隔离占比的增加,回滞现象会逐渐衰减,甚至消失,但拥堵现象仍得不到很好的改善,直至将路网中硬隔离占比增加到 100%。

因此,在低、中非机动车驶入流量的区域内,设置适当的路网隔离占比,能提高路网效率,而对较高非机动车驶入流量高的区域,路段应全部设置为机动车与非机动车硬隔离。

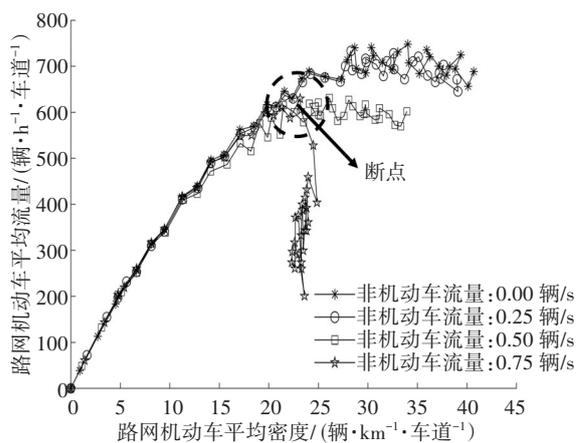
2.4 非机动车宽度对宏观基本图的影响

不同非机动车道宽度下的路网宏观基本图如

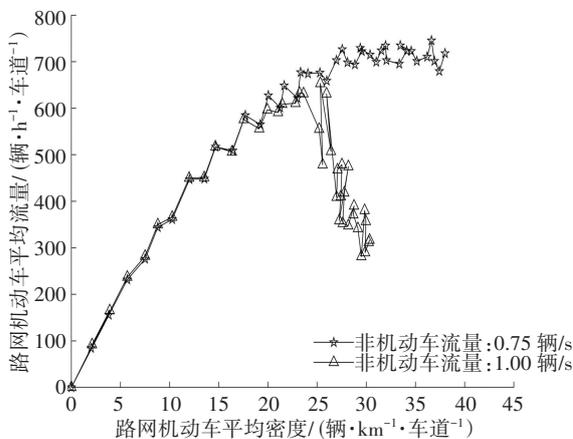
图 5 所示。图 5 展示了在不同非机动车道宽度下路网宏观基本图的变化趋势。其中,图 5(a)~5(d)分别对应的非机动车道宽度为 2、3、4、5 m。

从图 5(a)可以看出,当非机动车驶入流量为 0.00 辆/s 或 0.50 辆/s,路网平均流量先增后减,且变化较为平缓。当非机动车驶入流量为 0.75 辆/s 时,路网平均流量出现断点(将流量突变点称之为断点)。这说明:当非机动车道宽度为 2 m,0.75 辆/s 为路网能接受的非机动车临界驶入量。

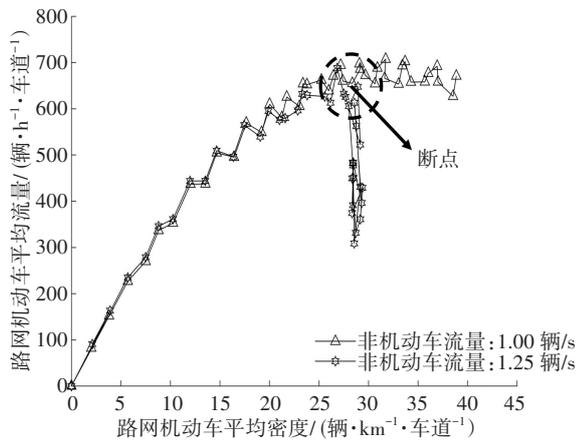
从图 5(b)可以看出,将非机动车驶入流量的初始值直接设为图 5(a)的临界驶入流量,观察增加宽度是否会消除严重的机动车与非机动车冲突现象,发现增加非机动车道宽度十分有效,当机动车驶入流量增加至 1 辆/s 时,路网平均流量又会出现断点。这说明:当非机动车宽度为 3 m 时,1.00 辆/s 为路网的非机动车临界驶入量。



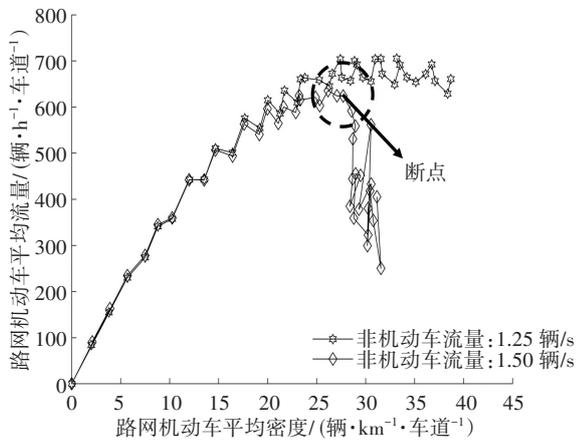
(a) $W=2\text{ m}$



(b) $W=3\text{ m}$



(c) $W=4\text{ m}$



(d) $W=5\text{ m}$

图 5 不同非机动车道宽度下的路网宏观基本图

Fig. 5 Macroscopic fundamental diagram of road network under different non-motorized lane widths

从图 5(c)~(d) 可看出,分别将车道宽度为 3、4 m 对应的临界驶入流量设置为非机动车驶入流量的初始值后,进一步验证增加非机动车道宽度可以有效缓解路网效率断崖式下降的结论,且可获得不同非机动车道宽度对应的临界驶入流量。

从图 5 还可以看出,断点的位置随非机动车道宽度的增加而向后推移。断点的位置即机动车与非机动车冲突快速上升的位置,与非机动车密度急速增加有关。该断点后移现象表明:非机动车道宽度增加使得非机动车流密度增加放缓,非机动车流将在更长时间内停留在稳态区。

这些均揭示了不同非机动车道宽度下的非机动车临界驶入流量,为科学设计非机动车道宽度提供了一种新方法,具体指标见表 3。

表 3 不同非机动车驶入流量适用非机动车宽度对应表

Table 3 The applicable width of non-motor vehicles for different driving flows

宽度/ m	流量 \in (0.00, 0.25]	流量 \in (0.25, 0.50]	流量 \in (0.50, 0.75]	流量 \in (0.75, 1.00]	流量 \in (1.00, 1.25]	流量 \in (1.25, 1.50]
2	适用	适用	不适用	不适用	不适用	不适用
3	适用	适用	适用	不适用	不适用	不适用
4	适用	适用	适用	适用	不适用	不适用
5	适用	适用	适用	适用	适用	不适用

3 结论

本研究将模拟非机动车流的 EBCA 模型与模拟宏观机动车流的 CTM 模型耦合,将机动车与非机动车混合交通流的模拟拓展至路网层面,通过仿真详细描述了非机动车驶入流量对宏观路网运行状态的影响,得出结论:

1) 当非机动车驶入流量达到一定规模时,随着机动车密度的增加,机动车的平均流量先平稳增长,然后断崖式下降;机动车与非机动车冲突次数先平稳增长,然后直线上升。

2) 当非机动车驶入流量达到 0.75 辆/s 时,随着机动车密度的增加,非机动车流密度先平稳增长,然后直线上升,非机动车流的状态将越过稳态区,进入拥挤区,说明非机动车的密度与机动车与非机动车冲突有强正相关性。

3) 提高路网硬隔离占比可以减弱非机动车对机动车的影响,增加非机动车道宽度可以有效减轻机动车与非机动车冲突现象。本研究还分析了不同非机动车道宽度下的非机动车临界驶入流量,得到一种科学设置非机动车道宽度的方法。

本研究将描述两种车辆特征的仿真模型耦合,将仿真对象扩展至路网层面,创造性地用三维宏观基本图解析路网中各个路段混合流之间的相互影响关系,为研究中国城市复杂混合交通流提供一个新思路。

参考文献(References):

- [1] LIU Y, ALSALEH R, SAYED T. Modeling lateral interactions between motorized vehicles and non-motorized vehicles in mixed traffic using accelerated failure duration model[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2022, 18 (3): 910-933. DOI: 10.1080/23249935.2021.1908443.
- [2] 刘启远, 孙剑, 田野, 等. 机非交互路段非机动车越线超车行为建模与仿真[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(11): 1585-1592, 1599. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2019.11.007.
- LIU Qiyuan, SUN Jian, TIAN Ye, et al. Modeling and simulation of cross-line overtaking behavior of non-motorized vehicles at mixed flow road section [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(11): 1585-1592, 1599. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2019.11.007.
- [3] LIU J, JONES S, ADANU E K, et al. Behavioral pathways in bicycle-motor vehicle crashes: from contributing factors, pre-crash actions, to injury severities [J]. *Journal of Safety Research*, 2021, 77: 229-240. DOI: 10.1016/j.jsr.2021.02.015.
- [4] LU W K, LIU J, FU X, et al. Integrating machine learning into path analysis for quantifying behavioral pathways in bicycle-motor vehicle crashes [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2022, 168: 106622. DOI: 10.1016/j.aap.2022.106622.
- [5] 张燕, 龙科军, 谷健. 信号交叉口机非交通冲突安全评估[J]. *交通科学与工程*, 2021, 37(3): 98-106. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.015.
- ZHANG Yan, LONG Kejun, GU Jian. Safety assessment of vehicle-non-motor traffic conflict at signalized intersection [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2021, 37(3): 98-106. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.015.
- [6] YU Q A, ZHOU Y T. Traffic safety analysis on mixed traffic flows at signalized intersection based on Haar-Adaboost algorithm and machine learning [J]. *Safety Science*, 2019, 120: 248-253. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.07.008.
- [7] WIERBOS M J, KNOOP V L, HÄNSELER F S, et al. A macroscopic flow model for mixed bicycle; car traffic [J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2021, 17 (3): 340-355. DOI: 10.1080/23249935.2019.1708512.
- [8] DONG C H, MA R G, YIN Y J, et al. Traffic conflict analysis of motor vehicles and nonmotor vehicles based on improved cellular automata [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1-11. DOI: 10.1155/2020/2529816.
- [9] VASIC J, RUSKIN H J. Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2012, 391 (8): 2720-2729. DOI: 10.1016/j.physa.2011.12.018.
- [10] JIN S, QU X B, XU C, et al. An improved multi-value cellular automata model for heterogeneous bicycle traffic flow [J]. *Physics Letters A*, 2015, 379(39): 2409-2416. DOI: 10.1016/j.physleta.2015.07.031.
- [11] 魏丽英, 应力天. 基于元胞自动机的混合交通流机非摩擦干扰 [J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(10): 1909-1913.
- WEI Liying, YING Litian. Friction interference in mixed traffic based on cellular automaton [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(10): 1909-1913.
- [12] 贾宁, 马寿峰. 考虑摩擦干扰的机非混合交通流元胞自动机仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(2): 390-393. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2011.02.017.
- JIA Ning, MA Shoufeng. Simulation of mixed traffic flow with friction interference using cellular automata [J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(2): 390-393. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2011.02.017.
- [13] 梁经韵, 张莉莉, 栾悉道, 等. 多路段元胞自动机交通流模型 [J]. *物理学报*, 2017, 66(19): 167-176. DOI: 10.7498/aps.66.194501.
- LIANG Jingyun, ZHANG Lili, LUAN Xidao, et al. Multi-section cellular automata model of traffic flow [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(19): 167-176. DOI: 10.7498/aps.66.194501.
- [14] 游诗广, 肖文, 陈宇光. 基于NaSch模型的混合交通流研究 [J]. *公路工程*, 2017, 42(3): 64-69, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2017.03.013.
- YOU Shiguang, XIAO Wen, CHEN Yuguang. Mixed-traffic flow study based on NaSch model [J]. *Highway Engineering*, 2017, 42(3): 64-69, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2017.03.013.
- [15] 姚凯斌, 林培群. 一种考虑交叉口因素的改进元胞传输

- 模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(3): 105-111. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2017.03.016.
- YAO Kaibin, LIN Peiqun. An improved cell transmission model considering intersection factor [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(3): 105-111. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2017.03.016.
- [16] 冯雪, 王喜富. 考虑自行车流特性的机非混合交通流元胞自动机仿真[J]. 公路交通科技, 2016, 33(3): 132-137. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.03.022.
- FENG Xue, WANG Xifu. Simulation of mixed traffic flow by cellular automaton considering bicycle flow characteristics [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(3): 132-137. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.03.022.
- [17] 冯雪, 王喜富, 李美羽. 考虑鸣笛效应的城市路段机非混合交通流模拟[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(3): 56-61. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291.2015.03.010.
- FENG Xue, WANG Xifu, LI Meiyu. Simulation of mixed traffic flow under the influence of honk effect[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(3): 56-61. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291.2015.03.010.
- [18] 郑容森, 谭惠丽, 孔令江, 等. 元胞自动机双车道人车混合交通流模型的研究[J]. 系统工程学报, 2006, 21(3): 273-279. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5781.2006.03.009.
- ZHENG Rongsen, TAN Huili, KONG Lingjiang, et al. Study on a cellular automaton model for pedestrian-vehicle mixing traffic in two-lane system[J]. Journal of Systems Engineering, 2006, 21(3): 273-279. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5781.2006.03.009.
- [19] 应力天. 基于元胞自动机的城市路段混合交通流建模与仿真[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- YING Litian. Models and simulations on mixed traffic in urban section road based on the theory of cellular automaton [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [20] 邱夫成, 兰时勇, 李毅. 基于元胞自动机的多车道机非混合道路交通流[J]. 计算机与现代化, 2015(3): 65-70. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2475.2015.03.014.
- QIU Fucheng, LAN Shiyong, LI Yi. Multi-lane mixed road traffic flow based on cellular automata model [J]. Computer and Modernization, 2015(3): 65-70. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2475.2015.03.014.
- [21] 张兴强, 汪滢, 胡庆华. 交叉口混合交通流元胞自动机模型及仿真研究[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 90-97. DOI: 10.7498/aps.63.010508.
- ZHANG Xingqiang, WANG Ying, HU Qinghua. Research and simulation on cellular automaton model of mixed traffic flow at intersection[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 90-97. DOI: 10.7498/aps.63.010508.
- [22] 邝先验, 吴玉刚, 刘平, 等. 考虑速度空间横向伸缩效应的混合交通流模型[J]. 公路交通科技, 2021, 38(7): 114-123. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.07.015.
- KUANG Xianyan, WU Yugang, LIU Ping, et al. A mixed traffic flow model considering stretching effect of transverse space caused by vehicle speed[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(7): 114-123. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.07.015.
- [23] 邝先验. 城市混合交通流微观仿真建模研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- KUANG Xianyan. Research on microscopic simulation modeling for urban mixed traffic flow [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [24] 贾宁, 马寿峰. 自行车干扰下机动车交通流的元胞自动机模型[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1333-1339.
- JIA Ning, MA Shoufeng. Cellular automaton model for the motor-vehicle flow under the interference of bicycles [J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2010, 30(7): 1333-1339.
- [25] 贾宁, 马寿峰. 考虑摩擦干扰的机非混合交通流元胞自动机仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(2): 390-393. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2011.02.017.
- JIA Ning, MA Shoufeng. Simulation of mixed traffic flow with friction interference using cellular automata [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(2): 390-393. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2011.02.017.
- [26] 胡庆华. 基于交叉口混合交通流特性的元胞自动机模型研究与仿真[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- HU Qinghua. Study and simulation on the CA model based on the characteristics of mixed traffic flow at

- intersections [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [27] 夏亮, 郭廷龙, 刘仰, 等. 基于多值CA模型的两轮车加速过程建模与分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(1): 112-119. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2017.01.016.
- XIA Liang, GUO Tinglong, LIU Yang, et al. Simulation and analysis of two-wheel vehicle acceleration based on multi-value CA model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(1): 112-119. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2017.01.016.
- [28] 杨海飞, 陆建, 祁玥. 基于宏观运动波和微观元胞自动机的双车道交通流混合建模[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(4): 773-778. DOI: 10.3969/j. issn.1001-0505.2012.04.037.
- YANG Haifei, LU Jian, QI Yue. Hybrid modeling of two-lane traffic flow based on macroscopic kinematic wave and microscopic cellular automata [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(4): 773-778. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-0505.2012.04.037.
- [29] 林琴, 龙科军. 基于改进CTM模型的城市快速路交通流仿真[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(4): 52-58. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.04.008.
- LIN Qin, LONG Kejun. Urban expressway traffic flow simulation based on improved CTM model [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(4): 52-58. DOI: 10.3969/j. issn.1672-9331.2018.04.008.
- (责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:刘至真)

(上接第89页)

- 407-413. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2010.04.006.
- MIAO Changqing, SUN Chuazhi, LI Aiqun. Analysis of hydration heat for block number zero of reinforced concrete beam bridge [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(4): 407-413. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2010.04.006.
- [21] 王琛, 高晓华, 边旭辉. 预应力混凝土单箱双室箱梁桥零号块水化热研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011, 7(10): 59-62.
- WANG Chen, GAO Xiaohua, BIAN Xuhui. Study on hydration heat of No. 0 block of prestressed concrete single-box double-chamber box girder bridge [J]. (Applied Technology Edition), 2011, 7(10): 59-62.
- [22] 刘守成. 预应力混凝土水化热结构耦合场分析: 以白河特大桥主桥箱梁0号、1号块为例[J]. 建筑, 2008(21): 41-43. DOI: 10.3969/j.issn.0577-7429.2008.21.015.
- LIU Shoucheng. Analysis of coupling field of hydration thermal structure of prestressed concrete—taking box girders No.0 and No.1 of main bridge of Baihe bridge as an example [J]. Construction and Architecture, 2008(21): 41-43. DOI: 10.3969/j. issn. 0577-7429.2008.21.015.
- [23] 任更锋, 常仕东, 张锦凯. 连续刚构桥零号块高强混凝土水化热效应分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(1): 309-319. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2017.0309.
- REN Gengfeng, CHANG Shidong, ZHANG Jinkai. Analysis on high-strength concrete hydration heat effect of the zero block of continuous rigid frame bridge [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2017, 42(1): 309-319. DOI: 10.13624/j.cnki. issn.1001-7445.2017.0309.
- [24] 陈志清, 刘荣桂, 蔡东升, 等. 青弋江某特大桥箱梁零号块水化热温度场分析[J]. 混凝土, 2015(9): 142-145, 150. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2015.09.039.
- CHEN Zhiqing, LIU Ronggui, CAI Dongsheng, et al. Study on the hydration heat and temperature field in zero block of Qing Yi River Bridge [J]. Concrete, 2015(9): 142-145, 150. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-3550.2015.09.039.
- [25] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- ZHU Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- (责任编辑:李脉;校对:欧兆虎;英文编辑:郭一鹏)