

4-14-2021

## Mesoscopic Traffic Simulation Model and Calibration Considering Stretching-segment Design

Zhaocheng He

*1. Research Center of Intelligent Transport System, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China; ;2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transport System, Guangzhou 510006, China; ;*

Xuanhua Lin

*1. Research Center of Intelligent Transport System, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China; ;2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transport System, Guangzhou 510006, China; ;*

Peilin Nie

*3. Foshan University, Foshan 528011, China;*

Ronghui Zhang

*1. Research Center of Intelligent Transport System, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China; ;2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transport System, Guangzhou 510006, China; ;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Mesoscopic Traffic Simulation Model and Calibration Considering Stretching-segment Design

## Abstract

**Abstract:** In order to make the simulation model fit the characteristics of urban traffic, both high accuracy and high performance, a lightweight mesoscopic traffic simulation system and the process of calibration are established. The speed-density model and vertical queue model are equivalent to the vehicle movement processes, *the simulation accuracy and calibration efficiency are improved by the stretching-segment design at urban intersections of vertical queuing model, and the real individual vehicle information is used as the calibration data source.* The application of the model in Xuancheng urban road network shows that, compared with the vertical queuing model, it can better reflect the actual road characteristics. The accuracy of the traffic sequence can be improved by 139 veh/2h on average, the saturation and overflow scenes of the stretching-segment can be restored. The generalization ability of calibrated parameters is strong, and the error of calibrated parameters in practical application is less than 8.7%, which can effectively ensure the accuracy of the simulation model.

## Keywords

intelligent transportation, mesoscopic traffic simulation, vertical queue model, parameter calibration, automatic vehicle identification

## Recommended Citation

He Zhaocheng, Lin Xuanhua, Nie Peilin, Zhang Ronghui. Mesoscopic Traffic Simulation Model and Calibration Considering Stretching-segment Design[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 781-791.

## 考虑展宽设计的中观交通仿真模型及其标定

何兆成<sup>1,2</sup>, 林炫华<sup>1,2</sup>, 聂佩林<sup>3\*</sup>, 张荣辉<sup>1,2</sup>(1. 中山大学 智能交通研究中心, 广东 广州 510006; 2. 广东省智能交通系统重点实验室, 广东 广州 510006;  
3. 佛山科学技术学院, 广东 佛山 528011)

**摘要:** 为使仿真模型契合城市交通特点、兼具高精度及高性能, 建立了轻量化的中观交通仿真系统与标定流程: 以速度—密度模型和点排队模型刻画车辆的运动过程; 将点排队模型进行交叉口展宽设计改进, 以提升仿真准确性和标定效率; 以真实个体检测信息作为标定数据源。模型在宣城城区路网中应用, 结果表明: 相较于传统点排队模型, 展宽设计下的模型能较好反映实际道路特性, 通行次序准确率平均可提升 139 veh/2 h, 且还原了展宽段饱和、溢出场景。标定参数泛化能力强, 应用标定结果后的误差在 8.7% 以下, 能够有效保证模型的准确性。

**关键词:** 智能交通; 中观交通仿真; 点排队; 参数标定; 车辆身份检测

中图分类号: U491; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 04-0781-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0661

## Mesoscopic Traffic Simulation Model and Calibration Considering Stretching-segment Design

He Zhaocheng<sup>1,2</sup>, Lin Xuanhua<sup>1,2</sup>, Nie Peilin<sup>3\*</sup>, Zhang Ronghui<sup>1,2</sup>

(1. Research Center of Intelligent Transport System, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transport System, Guangzhou 510006, China; 3. Foshan University, Foshan 528011, China)

**Abstract:** In order to make the simulation model fit the characteristics of urban traffic, both high accuracy and high performance, a lightweight mesoscopic traffic simulation system and the process of calibration are established. The speed-density model and vertical queue model are equivalent to the vehicle movement processes, *the simulation accuracy and calibration efficiency are improved by the stretching-segment design at urban intersections of vertical queuing model, and the real individual vehicle information is used as the calibration data source.* The application of the model in Xuancheng urban road network shows that, compared with the vertical queuing model, it can better reflect the actual road characteristics. The accuracy of the traffic sequence can be improved by 139 veh/2h on average, the saturation and overflow scenes of the stretching-segment can be restored. The generalization ability of calibrated parameters is strong, and the error of calibrated parameters in practical application is less than 8.7%, which can effectively ensure the accuracy of the simulation model.

**Keywords:** intelligent transportation; mesoscopic traffic simulation; vertical queue model; parameter calibration; automatic vehicle identification

## 引言

对交通系统进行准确高效的模拟、量化分析与反馈调节, 是实现网络调控策略推演、动态交通分

配、最短路搜寻等技术的重点和难点。而交通模型是精细化设计与定量评估的极佳工具, 为此需要建立一套能准确反映交通网络运行状态, 且运行性能高效的轻量化交通仿真模型。传统宏观模型精

收稿日期: 2019-12-19 修回日期: 2020-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(U1811463); 广东省自然科学基金(2014A030313617); 广州市科技计划(201804020012)

第一作者: 何兆成(1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向为交通流建模与系统仿真。E-mail: hezhch@mail.sysu.edu.cn

通讯作者: 聂佩林(1980-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为三维交通地理信息系统。E-mail: zsunpl1999@gmail.com

细不足,难以获取和分析路口的量化指标;而微观模型建模范围较小,难以把握整体交通影响,且建模效率低,难以在城市片区中实施<sup>[1]</sup>。因此,进行区域一级的交通分析时,中观交通模型被认为是较合适的方法。

在城市交叉口中,展宽车道设计因对通行能力的提升作用而得到极为广泛的应用。现有的中观仿真模型有 MesoTS<sup>[2]</sup>, DynaMIT<sup>[3]</sup>, DTALite<sup>[4]</sup>等,其共同点是路段内的车辆运动分为路段行驶和路口排队 2 部分,且分别采用宏观速密关系刻画车辆行驶、排队服务模型刻画路口处排队过程。但上述模型在路口排队部分假设了各车道相互独立、互不影响,没有充分考虑展宽部分的交通特性,模型无法准确描述展宽车道中排队车辆之间的交互、排队溢出、车道选择等复杂的交通状况,对城市交通的还原性有限;若对展宽设计的刻画过于微观,将降低模型的运行性能,脱离了中观仿真模型高效运行的建模理念,因此有必要对考虑展宽设计下的中观仿真模型进行深入研究。鉴于此,本文将建立一套准确刻画城市道路展宽设计、兼具高效计算的中观交通仿真模型,并分别对模型的模块组成及模型体系进行介绍。

实际应用中为确保模型的准确性,必须根据仿真区域的交通特性对仿真模型的参数进行调整、标定。目前多以各类优化算法进行多次仿真寻求最优标定参数解,如模拟退火算法<sup>[5]</sup>、遗传算法<sup>[6-7]</sup>等。以往的仿真模型多以线圈检测、浮动车轨迹点等集计数据作为标定数据源,漏检率高、精度低且缺乏个体级别的真实数据,标定结果和道路实际的交通特性相差较大。因此,本文将建立的以中观仿真模型为基本平台,以车辆个体身份检测(Automatic Vehicle Identification, AVI)数据为标定数据源。AVI 数据具有全网车辆出行的路径和行程信息,能提供更全面更持续的个体出行信息<sup>[8]</sup>。针对 AVI 数据特点,本文提出相应的标定方法和目标函数,使模型达到车辆在路段的仿真行程与实际等效,简化模型的同时保留车辆在交叉口的关键信息。将本仿真模型应用于宣城路网,结果表明本模型在引入展

宽设计后对城市交通刻画更为精准,并验证了标定方法及流程的有效性。

## 1 仿真系统模块

仿真系统是中观仿真模型加载与运行的平台。因此,在详细介绍模型之前,有必要结合仿真系统的核心模块设计对本文所构建的中观仿真模型体系逻辑进行梳理。仿真系统具体由 5 个模块组成:

(1) 基础路网模块:提供仿真路网的数字化描述,路网对象包含有向路段单元、车道单元、路口单元和停车场单元,其中路段单元包含了长度、上下游节点、车道构成等属性,且模型假定每个路段靠近上游节点处均设有停车场,车辆在不满加载路网的条件时会先在停车场等候,停车场容量不设限;车道单元是组成路段的最小单元,包含了车道的通行能力、展宽设计等信息;

(2) 信号控制模块:负责网络交通信号灯运行,通过给定的信号方案生成仿真时段内各仿真时刻的灯态,据此控制交叉口各向车流的通行;

(3) 需求加载模块:负责组织真实的(Automatic Vehicle Identification, AVI)数据并加载至路网。交通需求的单元即指定出行路径、出发时间的车辆对象,当仿真时间达到出发时间时,车辆会立即加载至路网,当不满足驶出条件如路段没有剩余容量时,则加载至路侧停车场排队;

(4) 车辆运动模块:即本研究的核心内容,中观交通仿真模型,负责所有加载车辆的运动状态更新,包括车辆运动模型、点排队模型、点转换模型,分别刻画车辆行驶、排队、转移下游路段等出行过程;

(5) 统计输出模块:负责在仿真过程中收集和输出仿真运行信息及评价结果。

模型启动后,基础路网模块读取数据库中存储的路网信息,需求加载模块处理、组织 AVI 需求数据。在每个仿真间隔中会加载新需求至路网,并以车辆运动模块来控制路网中车辆的运动,由信号控制模块控制抵达交叉口的车辆驶出,仿真全程由统计输出模块负责输出预设的评价指标。仿真系统运行过程及模块功能如图 1 所示。

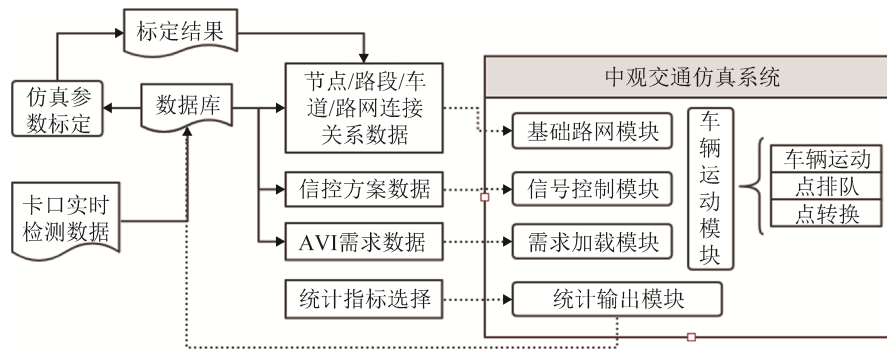


图 1 仿真系统及仿真框架  
Fig. 1 Traffic simulation system and framework

## 2 中观交通仿真建模

### 2.1 车辆运动模型

中观仿真模型并不描述车辆个体的微观驾驶行为及其与周边车辆的相互作用, 而注重于刻画交通流速密关系、路口排队现象等关键交通流特征, 因此本研究以宏观速度—密度模型描述车辆运动:

$$v = v_{\min} + (v_{\max} - v_{\min})(1 - (k / k_{\text{jam}})^\alpha)^\beta \quad (1)$$

式中:  $v$  为速度;  $k$  为密度;  $v_{\max}$  为期望畅行速度, 即给定交通设施在低交通量情况下的车辆平均速度, 取各路段的最高限速;  $k_{\text{jam}}$  为堵塞密度, 以饱和车头间距计算得到;  $v_{\min}$  为阻塞密度对应的速度下限值, 为车辆在路口排队的最低速度, 即在高密度情形下, 除非路段出现交通事故引起的堵塞, 否则车辆速度再低也能缓缓驶入下游, 而非  $v_{\min}=0$ , 即该速度下流量不小于排队服务率  $c$  (veh/(s·lane)), 即满足式(2):

$$k_{\text{jam}} v_{\min} \geq c \quad (2)$$

式(1)中的形状参数  $\alpha, \beta$ , 式(2)中的  $c$  为后续待标定参数。车辆行驶抵达下游停车线后, 转为排队状态或进入下游路段。

### 2.2 点排队模型及展宽设计改进

点排队模型更关注排队车辆的通行情况而非车辆的具体位置, 因此采用点排队服务模型描述排队车辆数变化。点排队模型中, 排队车辆在停车线前沿垂直空间堆叠, 忽略了车身长度, 不占据排队空间, 在驶出时按堆叠顺序依次排放。车道上的排

队车辆数按式(3)计算:

$$q(t) = q(t - \Delta t) + (m(t) - n(t)) \quad (3)$$

式中:  $q(t)$  为  $t$  时刻车道的排队车辆数;  $m(t)$  为间隔  $(t - \Delta t, t]$  内加入排队的车辆数;  $n(t)$  为间隔内的放行车辆数。放行车辆数取决于该车道的通行能力  $c$ , 按式(4)计算:

$$n(t) = \begin{cases} 0, & \text{红灯} \\ c\Delta t, & \text{绿灯} \end{cases} \quad (4)$$

点排队模型由 Vickrey<sup>[9]</sup>提出, 用于解决道路收费站的瓶颈问题, 模型假设了所有收费车道长度、通行能力、速度一致, 且车道之间相互独立、车辆排队互不影响。但城市交叉口中, 展宽车道广泛应用, 使得不同车道间排队车辆有可能相互影响, 且展宽车道本身也具有排队溢出、容量限制、车头时距等特性<sup>[10-11]</sup>, 多种展宽车道组合具有更复杂的特性, 如图 2 中路段兼有展宽直行车道(S2, S3)及右转车道(R)设计。为使得模型对城市交通的刻画和数值分析更为精确、加快参数标定的收敛速度, 本文对点排队模型进行改进, 引入展宽车道设计。

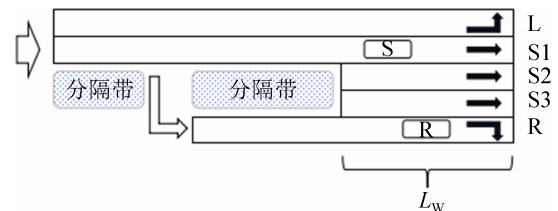


图 2 展宽直行、右转车道设计  
Fig. 2 Stretching-segment design of straight and right-turn lanes

交叉口展宽车道一般分为拓宽转向、借道转向

等类型，根据各路段进口展宽设计，设置展宽段长度  $L_w$ ，以图 3 对展宽右转车道(R)的建模为例，当右转车辆行驶到达停车线后，先判断此刻直行车道排队长度是否大于展宽段长度，若是，则出现“直堵右”情形，该车辆加入直行车道排队集合中，即：

$$\begin{cases} L(q_S(t)) > L_w, q_S(t) = q_S(t) \cup car_R(t) \\ L(q_S(t)) < L_w, q_R(t) = q_R(t) \cup car_R(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $car_R(t)$  为  $t$  时刻到达停车线的右转车辆集合； $S$  和  $R$  为直行与右转车道； $q_R(t), q_S(t)$  分别为  $t$  时刻右转、直行车道的排队集合，定义  $L(q(t))$  为统计排队集合  $q(t)$  元素数量的函数，则  $L(q_R(t)), L(q_S(t))$  分别代表图 3 中右转、直行车道的排队长度。绿灯时，排队车辆按顺序以所在车道组通行能力依次排放。每次车辆排放，模型将遍历直行排队集合中每个右转车辆所处位置是否抵达展宽段位置  $L_w$ ，若是则把该车辆转移至右转车道的排队集合中。

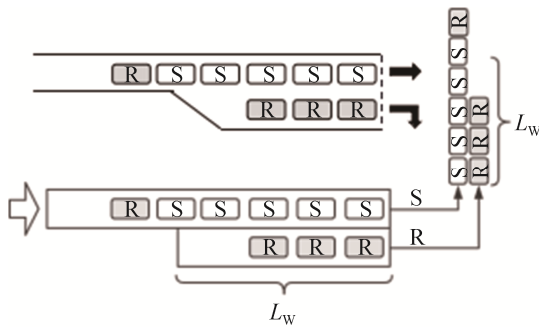


图 3 展宽右转设计下的点排队建模

Fig. 3 Vertical queue model with stretching-segment design of right-turn lane

对于一些特殊的展宽设计，如图 2 所示展宽直行与右转兼有的路段，直行车辆在  $S1$  车道行驶，到达停车线后，将在直行车道组( $S1, S2, S3$ )中选择加入当前排队长度最小车道的排队集合中，如式(6)所示，其参数含义同式(5)。其他各类展宽形式的点排队计算方法与式(5)，(6)一致。

$$\begin{cases} L(q_{S1}(t)) > L_w, q_{S1}(t) = q_{S1}(t) \cup car_S(t) \\ L(q_{S1}(t)) < L_w, q_S^*(t) = \arg \min_{x \in \{q_{S1}(t), q_{S2}(t), q_{S3}(t)\}} L(x) \\ q_S^*(t) = q_S^*(t) \cup car_S(t) \end{cases} \quad (6)$$

### 2.3 点转换模型

点转换模型主要用于描述车辆驶入下游路段的转换过程。以图 4 为例，车辆从路段  $l1$  进入下游路段  $l2$  时先做 2 步判断：第 1 步判断目标车道组容量是否有剩余；第 2 步判断并选择车道组中排队长度最短的车道，并驶入。

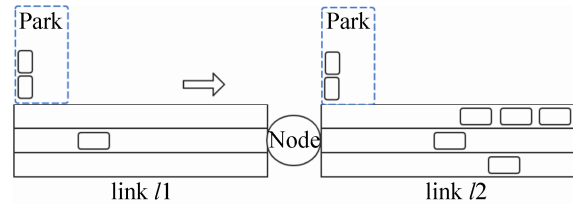


图 4 点转换模型

Fig. 4 Node transfer model

$$\text{step 1: } R_{l2}^i(t) = \frac{L_{l2} - L(q_{l2}^i(t) + f_{l2}^i(t))}{L} \geq 0 \quad (7)$$

式中： $R_{l2}^i(t)$  为  $l2$  路段  $i$  车道的剩余容量； $L_{l2}$  为路段  $l2$  长度； $q_{l2}^i(t); f_{l2}^i(t)$  分别为  $i$  车道对应的排队及行驶车辆集合； $L(q_{l2}^i(t) + f_{l2}^i(t))$  为对应的排队及行驶车辆数。

$$\text{step 2: } i^* = \arg \min_{y \in \{q_{x2}^{h1}(t), q_{x2}^{h2}(t)\}} L(y) \quad (8)$$

式中： $i^*$  为选择的目标车道； $y$  为可选车道集； $x$  为当前路段； $h$  为可选的各个车道。此外，车辆从停车场驶入路段时也通过 2 步判断确定目标车道。当第一步判断不满足时，车辆以点排队形式在停车场堆叠，待满足要求时，以预设的饱和车头时距排放。

## 3 仿真参数标定方法设计

### 3.1 标定参数与目标函数

考虑到各路段的信息检测相互独立，选取各路段宏观速度、密度公式中的  $\alpha, \beta$  及各车道组通行能力  $c$  作为待标定参数，分别独立标定。

本文将以车辆身份检测(AVI)数据作为标定数据源。AVI 数据是通过安装在路段或交叉口的检测设备识别经行车辆身份，并记录车辆在路段两端的出行时空信息，可获取真实、完整的车辆个体出行信息。本文采用的 AVI 数据包含的个体

信息包括车牌、驶入及驶出路段时间、经过车道转向及编号等。

针对 AVI 数据能准确记录车辆在路段两端的进出信息这一特点, 以车辆在路段的行程时间误差作为标定目标函数。由于车辆到达下游交叉口的时间可能属于不同信号放行灯态, 各车辆驶出路段的时间差异较大, 导致车辆个体在路段的仿真行程时间难以逼近观测值。因此, 利用集计指标减少波动影响, 采用各车道组的平均路段旅行时间作为标定的性能度量, 以平均相对误差建立拟合优度函数, 通过最小化平均相对误差确定最优参数值。

$$Z_{\delta} = \frac{\sum_{h \in H_l} n_h |\bar{t}_{l,h}^{obs} - \bar{t}_{l,h}^{sim}| / \bar{t}_{l,h}^{obs}}{\sum_{h \in H_l} n_h} \quad (9)$$

式中:  $l$  为路段;  $h$  为车道组;  $n_h$  为车道组对应的车道数量;  $\bar{t}_{l,h}^{obs}$ ,  $\bar{t}_{l,h}^{sim}$  为车道组对应的平均实测行程时间及仿真行程时间。

### 3.2 标定方法流程

因本文标定参数数量较少, 进行二维搜索时等同于直角坐标系, 因而使用粒子群优化算法 (PSO) 搜索效率较高。PSO 是一种进化计算技术, 和遗传算法相似, 它也是从随机解出发, 通过迭代寻找最优解, 以适应度来评价解的品质, 并通过群体中个体(粒子)之间的协作和信息共享来寻找最优解<sup>[12]</sup>。

本文以 python 为编程语言, 结合 PSO 算法开发了与仿真模型相对应的参数标定程序, 对每个路段进行独立标定, 步骤如下:

step 1: 初始化粒子群的规模( $M=15$ )及位置, 给每个粒子随机分配  $\alpha$ ,  $\beta$  取值, 各车道组通行能力取默认值 2 veh/(s-lane);

step 2: 仿真得到每个粒子的适应值, 即目标函数对应的误差值;

step 3: 按式(10)更新每个粒子  $i$  的位置和速度:

$$\begin{aligned} V_i &= V_i \times w + C \times r \times (p_{besti} - x_i) + \\ & C \times r \times (g_{best} - x_i) \\ x_i &= x_i + V_i \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $V$  为粒子的速度;  $x$  为粒子的位置;  $w$  为惯性因子;  $C$  为学习因子;  $r$  为 0~1 的随机数;  $p_{best}$ 、 $g_{best}$  分别是  $i$  粒子及粒子群适应值最佳的位置, 在每次循环中更新  $p_{best}$ ,  $g_{best}$ ;

step 4: 重复 step 3, 满足收敛条件时结束对  $\alpha$ ,  $\beta$  的标定, 保留  $g_{best}$  对应的  $\alpha$ ,  $\beta$  的标定结果;

step 5: 代入  $\alpha$ ,  $\beta$  的标定结果, 仿真计算各个车道组的仿真与实测的平均行程时间误差, 如式 (11)所示:

$$Z_{h,\delta} = (\bar{t}_{l,h}^{obs} - \bar{t}_{l,h}^{sim}) / \bar{t}_{l,h}^{obs} \quad (11)$$

step 6: 根据 step 5 得到各车道组的行程时间误差, 当某车道组误差 > 0 时, 说明该车道组车辆仿真速度过快的可能性越高, 按预设步长降低车道组的通行能力, 若误差 < 0 则相反。重复 step 5, 直到满足收敛要求。仿真参数标定流程见图 5。

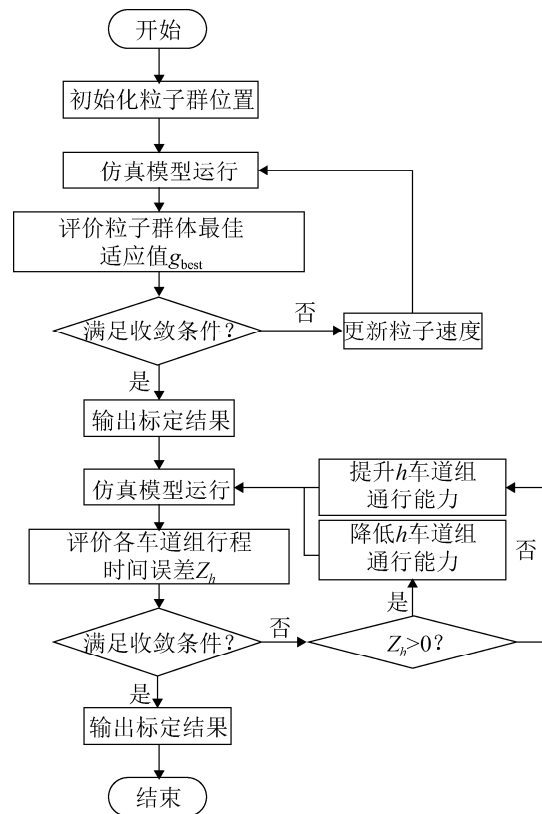


图 5 参数标定流程图

Fig. 5 Flow diagram of parameter calibration

### 3.3 参数训练流程

为了标定参数在新样本上也能表现出良好的泛

化效果,应从训练样本中尽可能学习出适用于所有潜在样本的普遍规律。本文采用交叉验证法训练标定参数,即把训练样本分为  $k$  份,每次取  $k-1$  份训练标定参数,余下 1 份作为测试集,重复  $k$  次后取这  $k$  次标定结果的平均值作为最终标定参数<sup>[13]</sup>。

## 4 实例应用

本文选取的实验区域为安徽宣城市宣州区核心区域如图 6 所示,区域内包含 48 条有向路段、18 个信号交叉口,实验区域中有 30 条路段具有展宽段设计,其展宽类型及数量如表 1 所示。每个交叉口均安装卡口检测设备,记录车辆过车时间、所在车道等个体信息。挑选实验数据为 2018 年 8 月该区域内早高峰、晚高峰卡口过车数据、信号方案、信号配时数据。

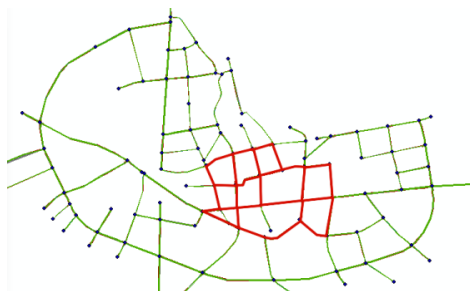


图 6 宣城实验路网区域

Fig. 6 Experimental region of Xuancheng road network

表 1 展宽车道类型及数量

Tab. 1 Type and number of stretching-segment

展宽车道类型	数量
左转车道	1
右转车道	18
左转直行混合车道	3
右转直行混合车道	1
直行车道+右转车道	7

### 4.1 点排队改进模型验证

#### 4.1.1 标定效率提升验证

为验证改进模型在仿真及参数标定中的效果,2018 年 8 月 6 日-10 日早高峰 07:00-09:00 数据进行标定测试,得到各个工作日 30 条路段平均标定误差及标定收敛耗费的迭代次数,如表 2 所示。

表 2 改进模型与原模型标定误差、迭代次数对比  
Tab. 2 Comparison of calibration errors and iteration times

日期	平均迭代次数		平均误差	
	原模型	改进模型	原模型/%	改进模型/%
2018-08-06	463	372	6.24	5.34
2018-08-07	466	364	6.19	5.14
2018-08-08	371	290	4.77	4.25
2018-08-09	414	327	5.66	4.95
2018-08-10	331	319	5.45	5.02
合计	2 045	1 672		

从表 2 的实验结果可见,改进模型在引入展宽设计后,其标定精度、标定收敛速度均明显优于原点排队模型,表明展宽设计更契合城市路段的实际交通特性,使标定精度、效率均有较大提升。

#### 4.1.2 通行次序验证

为进一步验证改进模型对通行次序、展宽车道饱和等高需求情形的刻画,取相同天晚高峰 17:00-19:00 数据进行标定、仿真测试,选取在标定迭代、仿真过程中出现上述展宽段溢出情形的路段作为实验路段。统计车辆经过停车线时的通行次序准确率,如式(12)所示:

$$S_l = \frac{\sum_{t=0}^T (n_t \sum_{i=0}^{n_t} y_{t,i})}{\sum_{t=0}^T n_t}, y_{t,i} = \begin{cases} 1, car_{sim}^{i,t} = car_{obs}^{i,t} \\ 0, car_{sim}^{i,t} \neq car_{obs}^{i,t} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $car_{sim}^{i,t}$ ,  $car_{obs}^{i,t}$  分别为  $i$  车仿真、实际通行时在统计间隔内所处的通行次序,  $t$  为当前统计间隔;  $y_{t,i}$  为  $t$  间隔内第  $i$  辆通行的车辆准确度计数,若一辆车在仿真与实际观测中通行次序相同记为 1, 否则为 0;  $n_t$  为  $t$  间隔通行的总车辆数。车辆在交叉口的车道选择也是反映模型准确程度的一个重点,因此本文将车道选择准确率作为另一个统计指标,即在原通行次序对比基础上,再做一次车道选择对比,即:

$$S_l^* = \frac{\sum_{t=0}^T (n_t \sum_{i=0}^{n_t} y_{t,i}^*)}{\sum_{t=0}^T n_t}, y_{t,i}^* = \begin{cases} 1, car_{sim}^{i,t} = car_{obs}^{i,t}, h_{sim}^{i,t} = h_{obs}^i \\ 0, other \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $h_{sim}^{i,t}$ ,  $h_{obs}^i$  分别为车辆在仿真及实测中选择



的车道。经过筛选, 2018 年 8 月 6 日-10 日分别有 11, 11, 12, 11, 11 条路段符合实验要求。以 3 min 为统计间隔, 经仿真统计得到 2 种模型的误差对比, 如图 7 所示。

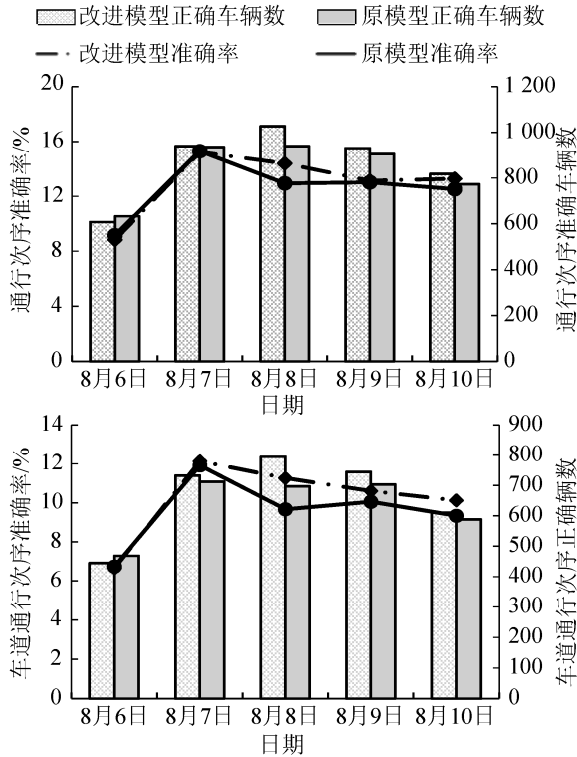


图 7 改进模型与原模型通行次序准确率对比  
Fig. 7 Comparison of sequence accuracy between improved model and original model

可见引入展宽设计后, 除 8 月 6 日外, 车辆通行次序及相应的车道选择准确率均有所提升。但二者的准确率均不高, 且改进的模型对比原模型并无明显优势, 主要是由于现实中车辆的前后通行次序受诸多微观因素影响, 如启动加速度、车道几何特征、驾驶员心理等, 仅靠交叉口处的车道交互难以完全还原。而在中观层面, 往往更关注车辆通行所处的时间间隔窗是否符合实际, 而非具体的前后车顺序。故引入统计车辆所处的通行间隔与通行车道准确率这一指标, 如式(14)所示:

$$Q_i = \frac{\sum_{t=0}^T (n_t \sum_{i=0}^{n_t} y_{t,i})}{\sum_{t=0}^T n_t}, \quad (14)$$

$$y_{t,i} = \begin{cases} 1, & car_{sim}^{i,t} = car_{obs}^{i,t} \\ 0, & car_{sim}^{i,t} \neq car_{obs}^{i,t} \end{cases}$$

式中:  $car_{sim}^{i,t}$ ,  $car_{obs}^{i,t}$  分别为  $i$  车仿真、实际通行时所处的时间间隔,  $t$  为当前间隔;  $y_{t,i}$  为  $t$  间隔内第  $i$  辆通行的车辆准确度计数, 若一辆车在仿真与实际观测中所处间隔相同记为 1, 否则为 0;  $n_t$  为  $t$  间隔通行的总车辆数。同样, 在原通行次序对比基础上, 再做一次车道选择对比, 即:

$$Q_i^* = \frac{\sum_{t=0}^T (n_t \sum_{i=0}^{n_t} y_{t,i}^*)}{\sum_{t=0}^T n_t}, \quad (15)$$

$$y_{t,i}^* = \begin{cases} 1, & car_{sim}^{i,t} = car_{obs}^{i,t}, h_{sim}^{i,t} = h_{obs}^{i,t} \\ 0, & \text{other} \end{cases}$$

通过仿真统计得到 2 种模型的误差对比如图 8 所示。改进模型对车辆通行间隔准确率的提升十分显著, 工作日展宽路段平均提升 139 veh/2 h, 最高可提升 192 veh/2 h, 且车辆在交叉口的车道选择也更贴近实际观测, 可证明引入展宽设计的改进模型对车辆通行刻画准确性的提升。

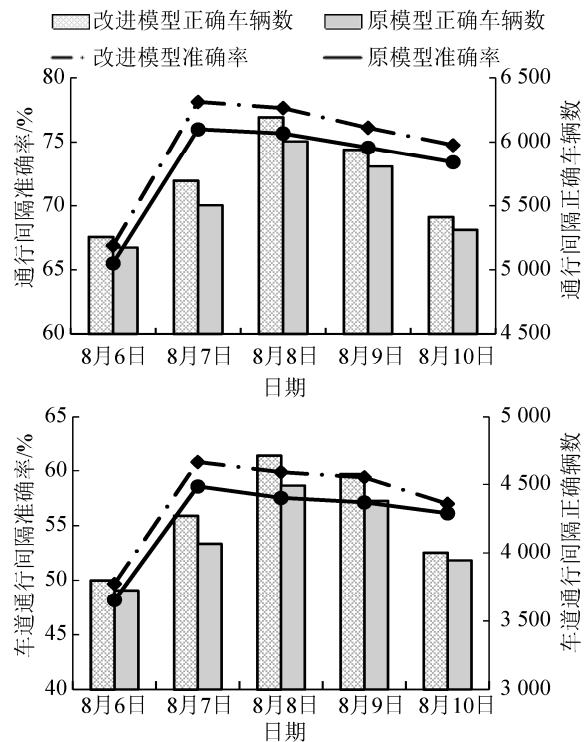


图 8 改进模型与原模型通行间隔准确率对比  
Fig. 8 Comparison of interval sequence accuracy between improved model and original model

### 4.1.3 展宽段排队溢出验证

引入展宽段设计能使模型对交叉口排队溢出

的刻画更为精确,排队溢出的实质为展宽段的需求过饱和,车辆在展宽处堵塞,使得展宽段上游的车辆无法及时驶入,造成额外的延误。

为验证改进模型对展宽段过饱和场景的刻画,设置图9所示的实验展宽左转(L)路段,对比改进模型及原模型在展宽区段延误的大小,展宽区段为图9中的阴影部分。同时,文献[14]正文已有对展宽段排队溢出状态下的区段延误计算模型,可估算出近似的区段延误值,此处引入作为区段延误的数值参考值,其计算式如式(16)所示:

$$D = 3 \left\{ C \left( \frac{L}{h} \right) + \frac{1}{2} S_e g \left( g - \frac{S_e g}{q_e} - \frac{2L}{u} \right) \right\} \quad (16)$$

式中:  $D$  为进口道展宽区段的延误值,即路段从驶入展宽段区域至驶出的延误;  $L$  为展宽段长度,包含渐变段;  $h$  为车头间距;  $C$ ,  $g$  分别为信号周期时长及绿灯时长;  $S_e$  为饱和流率;  $q_e$  为展宽区段驶入流率;  $u$  为进口道启动波波速,因本模型未引入对交通波的刻画,故取默认值 5 m/s。

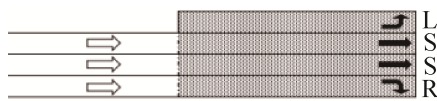


图9 实验展宽路段

Fig. 9 Experimental road with stretching-segment design

实验路段如图9所示,由1条展宽左转车道、2条直行车道和1条右转车道构成。展宽段长度为60 m,各相位绿灯时长25 s,周期112 s,单车道消散饱和流率为1 800 veh/h,进口道车流到达率为1 200 veh/h,并按间隔均匀发车。因右转车道独立且不受信号控制,故仅统计直行与左转车道延误,从排放流率趋于稳定的第9个信号周期开始统计,得到进口道区段延误的对比结果如图10所示。

实验结果中,因原模型车道独立且无交互,在停车线后60 m内产生的区段延误维持在较低值,均为1 068 s。而在改进模型中,因对“左堵直”、“直堵左”等排队溢出的刻画,其仿真得出的区段延误值有一定波动,且比原模型更接近由式(16)延误模型数值计算出的延误值。结果表明:改进模型

能更好地刻画展宽段饱和、溢出的场景,实际应用中能对城市道路能进行更精细的还原和量化分析。

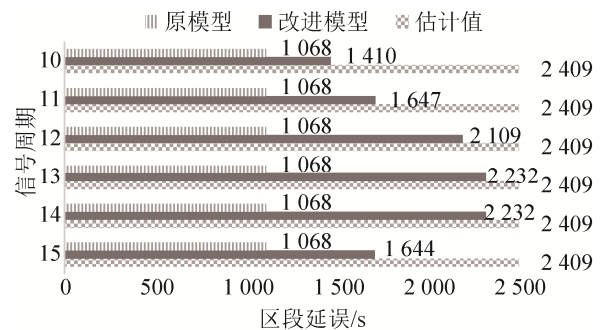


图10 3种区段延误值对比

Fig. 10 Contrast of 3 kinds of delay value

## 4.2 标定结果及分析

### 4.2.1 标定方法效率对比

为验证本文标定方法及流程在寻优效率及标定误差上的优势,将本文 PSO 算法与遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、模拟退火算法(Simulated annealing Algorithm, SA)做标定参数对比。因不同算法迭代机制不同,且每次标定参数生成及反馈均需调用本文仿真系统,耗时主要为仿真运行耗时,故以每种算法达到收敛条件所需的仿真次数作为衡量算法效率的指标。每种算法均设定相同的标定结束条件、参数取值范围、标定目标函数,并进行多次仿真取最优结果。取前文8月8日当天早高峰30条展宽路段数据进行测试,结果如表3所示。

表3 3种算法标定结果

Tab. 3 Calibration results of 3 algorithms

算法	总仿真次数	平均仿真次数	平均误差/%
PSO	1980	66	4.25
SA	4396	147	7
GA	3350	112	8.44

通过对比发现,本文算法完成一次标定所消耗的仿真次数最小,平均每条路段的仿真次数比 SA, GA 法少 55.1%, 41.1%。且标定得到的平均行程时间误差也最低,所有路段误差均在容许误差范围内,误差最大的路段误差值为 9.28%,而 SA, GA 算法最大误差则分别为 13%, 27.6%。实验表明本文的粒子群算法考虑了饱和和车头时距特性对误差

的影响, 相较其他方法搜索寻优效率更高, 对各类展览路段均具有较强适用性。

### 4.2.2 标定训练效果

以 2018 年 8 月 6 日-17 日实验区域内 48 条路段的工作日早高峰 07:00-09:00 作为训练集, 以 10 折( $k=10$ )交叉验证法训练; 因在实验中少数路段流量、行程时间呈现出明显的工作日差异, 这一部分路段将以一个月内三周各工作日数据做交叉验证训练( $k=3$ ), 另一周作验证集。为验证标定结果的可靠性和泛化能力, 取 8 月 20-24 日同时段数据作为验证, 应用训练得到的参数, 得到各个路段加权平均仿真行程时间与实测值的误差如表 4 所示。

表 4 实验区域标定参数应用结果  
Tab. 4 Application results of calibrated parameters

验证日期	平均误差/%	平均误差/s
8 月 20	8.70	4.0
8 月 21	6.30	3.9
8 月 22	6.92	4.0
8 月 23	8.29	4.9
8 月 24	8.17	4.4

以表中 8 月 21 日为例, 所有路段的标定训练后参数应用结果如表 5 所示。其中路段编号带有“\*”符号的表示该路段为展览路段。

表 5 8 月 21 日实验区域标定参数应用结果  
Tab. 5 Application results of calibrated parameters on 08-21

路段	误差/%	路段	误差/%	路段	误差/%
1*	6.55	17*	3.89	33*	6.87
2	9.53	18*	13.67	34*	8.16
3*	5.36	19*	6.05	35*	4.09
4	4.05	20	3.45	36*	13.26
5*	8.26	21	5.41	37	9.54
6*	3.45	22	1.10	38*	2.66
7	8.65	23*	2.72	39	0.42
8	4.77	24*	8.99	40	1.80
9	1.25	25	7.63	41*	7.52
10*	7.72	26*	12.58	42	6.15
11	7.50	27*	1.67	43*	6.85
12*	5.87	28*	8.85	44*	9.50
13	10.70	29	2.27	45*	3.65
14	13.58	30*	6.87	46*	9.43
15*	2.63	31*	1.87	47*	5.00
16*	1.25	32*	8.26	48	6.53

可见, 几乎所有路段的行程时间误差在 10% 以内, 表明参数标定及训练方法适用于各类展览路段及非展览路段。

以路段为单位, 将表 4 各个路段 8 月 20 日-24 日 5 个工作日仿真、实测行程时间在散点图上表示, 得到图 11。散点图中, 散点基本聚拢在对角线上, 工作日实验区域路网平均误差最高不超过 8.7%, 平均每个路段的行程时间误差不超过 5 s/2h。实验结果表明标定参数的方法和结果具有实际应用的 价值, 基本达成了路段进出等效的效果。

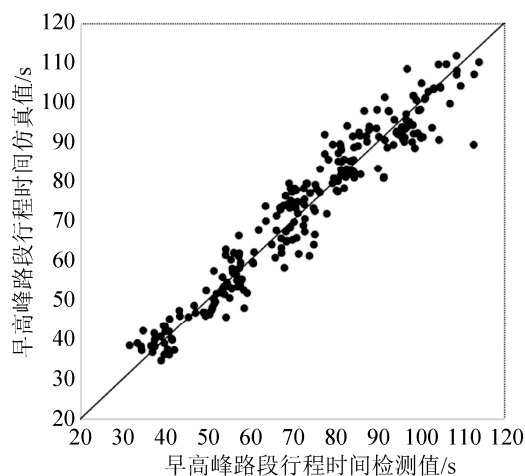


图 11 各路段工作日行程时间对比  
Fig. 11 Simulation and real travel time of each road

## 5 结论

本文设计了一套轻量化的中观交通仿真模型, 以简化交通流模型刻画车辆运动、排队过程。模型在 原点排队模型基础上考虑了展览设计的路段结构, 使模型对城市交叉口的描述及还原更为精细。模型以真实 AVI 个体检测数据作为标定数据源, 以车辆个体在路段两端的行程时间误差作为标定目标函数, 设计了标定方法与流程, 通过最小化行程时间误差等效还原车辆驶入、驶出路段的行程, 保留车辆在交叉口的关键信息。在安徽宣城实际路网中对模型和标定方法进行应用, 结果表明: 本文的展览设计改进模型更符合城市道路的交通特性, 极大提升了标定速度和车辆在时间、空间上的通行准确率, 且刻画了展览段溢出等高需求场景, 为进一

步量化分析城市交通提供有效支撑。在工作日应用训练得到的标定结果,路网行程时间的平均误差在8.7%以下,大部分路段基本实现进出行程等效,证明标定参数具有良好的泛化性能,以及标定方法、流程的有效性。

后续研究将考虑仿真过程的并行化计算,以进一步提升仿真模型的计算性能,并完善仿真系统各个模块,丰富模型在其他场景中的应用。

### 参考文献:

- [1] 丘建栋. 面向精细化交通设计的中观交通模型研究与实践[C]//中国城市规划学会城市交通规划学术委员会. 新型城镇化与交通发展——2013年中国城市交通规划年会暨第27次学术研讨会论文集. 北京: 中国城市规划学会, 2014: 1644-1653.  
Qiu Jiandong. Research and Practice of Meso-transport Model for Refined Traffic Design[C]//Urban Transportation Planning Academic Committee of China Urban Planning Society. New Urbanization and Transportation Development-2013 China Urban Transportation Planning Annual Conference and 27th Academic Symposium Proceedings. Beijing: China Urban Planning Society, 2014: 1644-1653.
- [2] Burghout W, Koutsopoulos H N, Andreasson I, et al. A Discrete-Event Mesoscopic Traffic Simulation Model for Hybrid Traffic Simulation[C]//International Conference on Intelligent Transportation Systems. Toronto Ont Canada: IEEE, 2006: 1102-1107.
- [3] Yang Q, Koutsopoulos H, Ben-Akiva M. Simulation Laboratory for Evaluating Dynamic Traffic Management Systems[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board(S0361-1981), 2000, 1710(1): 122-130.
- [4] Zhou X, Taylor J. DTAlite: A Queue-based Mesoscopic Traffic Simulator for Fast Model Evaluation and Calibration[J]. Cogent Engineering (S2331-1916), 2014, 1(1): 961345.
- [5] 成卫, 金成英, 袁满荣. 基于遗传模拟退火算法的 TRANSMODELER 仿真模型参数标定研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(3): 478-482.  
Cheng Wei, Jin Chengying, Yuan Manrong. Study on Parameter Calibration for Simulation Model TRANSMODELER Based on Genetic Simulated Annealing Algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014, 38(3): 478-482.
- [6] 李振龙, 王保菊, 金雪, 等. 针对主辅路的 Vissim 仿真模型参数标定方法[J]. 交通信息与安全, 2015, 33(2): 45-50.  
Li Zhenlong, Wang Baoju, Jin Xue, et al. Parameter Calibration of Vissim Simulation Models with a Focus on Main and Side Roads[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2015, 33(2): 45-50.
- [7] 杨艳芳, 秦勇, 努尔兰·木汉. 基于 SOGA 的 VISSIM 仿真模型参数标定方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(3): 91-97.  
Yang Yanfang, Qin Yong, Muhan Nuerlan. VISSIM Model Calibration Based on SOGA[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(3): 91-97.
- [8] 龙小强, 苏跃江, 余畅, 等. 基于卡口车牌识别数据的车辆出行分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(2): 66-72.  
Long Xiaoqiang, Su Yuejiang, Yu Chang, et al. Analyzing Methods of Vehicle' Travel Using Plate Recognition Data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(2): 66-72.
- [9] Vickrey W. Congestion Theory and Transport Investment[J]. The American Economic Review (S00028282), 1969, 59(2): 251-260.
- [10] 马艳丽, 高月娥, 冷雪, 等. 信号交叉口展宽车道交通运行特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(2): 42-45.  
Ma Yanli, Gao Yuee, Leng Xue, et al. Traffic Operation Characteristics of Auxiliary Through Lane at Signalized Intersection[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(2): 42-45.
- [11] 张小龙, 成卫, 袁满荣. 单点过饱和和信号交叉口展宽段排队控制研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(11): 113-119.  
Zhang Xiaolong, Cheng Wei, Yuan Manrong. Study on Vehicle Queue Control of Stretching Segment at Signalized Single Over-saturated Intersection[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(11): 113-119.
- [12] 李义罡, 焦朋朋, 乔伟栋. 基于改进粒子群优化 BP 神经网络的弯道转向行为预测[J]. 公路交通科技, 2019, 36(10): 128-136.  
Li Yigang, Jiao Pengpeng, Qiao Weidong. Prediction of Steering Behaviors on Curves Based on BP Neural

- Network Optimized by Modified PSO[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(10): 128-136.
- [13] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 24-26.  
Zhou Zhihua. Machine Learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 24-26.
- [14] 蔡艳锋, 孙大志, 唐贵涛. 展宽段排队溢出状态下区段延误模型研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(6): 123-127.  
Cai Yanfeng, Sun Dazhi, Tang Guitao. Study on Section Delay Model under Widening Zone Queue Overflow Condition[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(6): 123-127.