

9-23-2022

Mesoscopic Modeling and Simulation of Mixed Traffic Flow of Buses and Vehicles

Yiting Zhu

1.School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yan-sen University, Guangzhou 510006, China;2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Guangzhou 510006, China;; zhuyt3@mail2.sysu.edu.cn

Yun Yan

1.School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yan-sen University, Guangzhou 510006, China;2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Guangzhou 510006, China;

Zhaocheng He

1.School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yan-sen University, Guangzhou 510006, China;2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Guangzhou 510006, China;; hezhch@mail.sysu.edu.cn

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 Modeling and Simulation of Mixed Traffic Flow of Buses and Vehicles

Abstract

Abstract: Aiming at the problem that the existing mesoscopic simulation models only convert buses into several standard vehicles and ignore the movement difference between buses and vehicles, a mesoscopic simulation model of mixed traffic flow is proposed. In the process of road driving, on the one aspect, *we consider the feature that bus speed is usually lower than vehicle speed, and correspondingly establish the reduction function of bus speed*; on the other aspect, *we consider the influences of bus-station queue overflow on the adjacent lanes, and correspondingly construct the lane-based speed model of mixed flow*. Moreover, we use the point queuing model to describe the processes of station stop and intersection queuing. The individual-based data from vehicle identity recognition to calibrate the model parameters is introduced. The experimental results show that the mean absolute percentage errors of link travel time simulation of buses and vehicles are respectively less than 4.55% and 8.20%, the proposed model has good simulation accuracy and can effectively simulate the bus-station overflow scenarios.

Keywords

urban transportation, mesoscopic traffic simulation, mixed traffic flow, bus, vehicle particle, swarm optimization

Recommended Citation

Yiting Zhu, Yun Yan, Zhaocheng He. Mesoscopic Modeling and Simulation of Mixed Traffic Flow of Buses and Vehicles[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(09): 2019-2027.

公交与社会车辆混合的中观交通建模与仿真

朱依婷^{1,2}, 闫云^{1,2}, 何兆成^{1,2*}

(1. 中山大学 智能工程学院, 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)

摘要: 针对现有中观仿真模型仅将公交换算为标准社会车辆处理而忽略了公交与社会车辆差异性的问题, 构建了公交与社会车辆混合交通流的中观仿真模型。在路段行驶过程, 一方面考虑公交速度低于社会车辆速度的特征, 建立公交速度折减函数; 另一方面考虑站点溢出对邻近车道的影响, 建立分车道的混合流速度模型, 站点停靠与路口排队过程采用点排队模型描述。采用车辆身份检测的个体数据完成仿真标定, 实验结果表明公交与社会车辆路段旅行时间的仿真误差不超过 4.55% 与 8.20%, 模型的仿真精度良好, 并且可以有效刻画公交站点溢出的场景。

关键词: 城市交通; 中观交通仿真; 混合交通流; 公交; 社会车辆; 粒子群算法

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2022) 09-2019-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0286

Mesoscopic Modeling and Simulation of Mixed Traffic Flow of Buses and Vehicles

Zhu Yiting^{1,2}, Yan Yun^{1,2}, He Zhaocheng^{1,2*}

(1. School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yan-sen University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing mesoscopic simulation models only convert buses into several standard vehicles and ignore the movement difference between buses and vehicles, a mesoscopic simulation model of mixed traffic flow is proposed. In the process of road driving, on the one aspect, we consider the feature that bus speed is usually lower than vehicle speed, and correspondingly establish the reduction function of bus speed; on the other aspect, we consider the influences of bus-station queue overflow on the adjacent lanes, and correspondingly construct the lane-based speed model of mixed flow. Moreover, we use the point queuing model to describe the processes of station stop and intersection queuing. The individual-based data from vehicle identity recognition to calibrate the model parameters is introduced. The experimental results show that the mean absolute percentage errors of link travel time simulation of buses and vehicles are respectively less than 4.55% and 8.20%, the proposed model has good simulation accuracy and can effectively simulate the bus-station overflow scenarios.

Keywords: urban transportation; mesoscopic traffic simulation; mixed traffic flow; bus; vehicle particle swarm optimization

引言

交通流仿真是支撑交通系统状态准确模拟与量化分析的重要手段^[1]。城市交通流主要由公交与社会车辆混合组成, 公交的行驶速度一般低于社会

车辆且需要完成站点停靠, 其行驶特征会影响与其混行的社会车辆的运动状态^[2-3], 因此, 城市交通流仿真需要充分考虑公交的行驶特征及其对社会车辆运行的影响。

收稿日期: 2021-04-02 修回日期: 2021-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(U21B2090); 南沙区营运车辆安全监管示范项目(2019SF03)

第一作者: 朱依婷(1991-), 女, 博士生, 研究方向为交通系统建模与调控。E-mail: zhuyt3@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 何兆成(1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向为交通大数据分析。E-mail: hezhch@mail.sysu.edu.cn

公交与社会车辆混合的交通流模型主要包括两类：①宏观模型，最常见的建模思路为采用路阻函数分别构建社会车辆、公交的路段旅行时间(或车速)与路段流量(或密度)的关系函数^[4-5]；②微观模型，如 VISSIM^[6]、PARAMICS^[7]等都支持公交与社会车辆跟驰、换道运动的精细刻画。上述研究中，宏观模型计算效率高，但粗颗粒尺度无法描述车辆路口排队、公交进出站等运动，微观模型描述粒度精细，但涉及大量繁琐而耗时的车辆状态计算与参数标定工作，难以支撑城市区域级交通分析。介于宏观与微观之间的中观仿真模型以个体级的车辆运动为研究对象，将车辆在路段单元的运动过程划分为路段行驶、路口排队两部分^[8-9]。在路段行驶部分，中观模型计算车辆的实时速度以表征其行驶状态，不描述车辆跟驰、换道等驾驶行为；在路口排队部分，中观模型计算车辆的实时排队次序以表征车辆的排队状态，并根据车辆的排队次序与路口通行能力计算车辆的路口通过时刻，不描述车辆停车、启动等驾驶行为。相比之下，中观模型描述粒度比宏观模型更为精细，但车辆行驶规则不精细至驾驶行为，计算效率比微观模型更为高效，由于兼顾粒度与效率的优势，中观模型已成为交通流仿真的有效手段。然而，目前具有代表性的中观仿真系统 DynasTIM^[10]、Mezzo^[11]、MesoTS^[12]等在刻画公交与社会车辆混合运行时，仅将公交换算为标准社会车辆处理，忽略了公交与社会车辆的差异性，缺乏考虑公交行驶特征及其影响的混合流建模，因此，有必要开展公交与社会车辆混合的中观交通建模与仿真研究。

鉴于此，本文参照中观仿真的建模思想，以车辆为描述对象，将公交与社会车辆的路段运动划分为路段行驶、站点停靠与路口排队，构建相应模型予以描述。在模型标定方面，为了量化公交与社会车辆的差异，需要两类车辆的实测数据予以支撑，然而传统的断面集计检测(如线圈)或抽样个体检测(如浮动车)，因缺乏车辆身份(如“车牌”)辨识能力或抽样渗透率低等原因无法获取全样、全量的车辆运动数据^[13]，鉴于此，本文采用自动车辆身份(automatic vehicle identification, AVI)数据作为标定数据源，由安装在路段两端交叉口的治安卡口采集公交与社会车辆路段级运动数据(如“路段旅行时间”)^[14-15]。针对 AVI 数据的特点，以车辆路段旅行时间的仿真误差最小化作为目标完成仿真参数标定，然后选取宣城市的真实路段、真实 AVI 数据进行实证实验。

1 公交与社会车辆混合交通流的中观仿真模型

城市公交站点主要包括港湾式、直线式两类，以图 1 所示的港湾式站点路段为例，社会车辆与不停靠公交的路段运动划分为路段行驶与路口排队，停靠公交的路段运动划分为路段行驶、站点停靠与路口排队，路段可划分为站点不相邻车道、站点相邻车道与站点车道，停靠公交在进入路段时被分配至站点车道，社会车辆与不停靠公交则根据转向需求分配车道。上述划分同样适用于直线式站点路段的车辆运动描述。

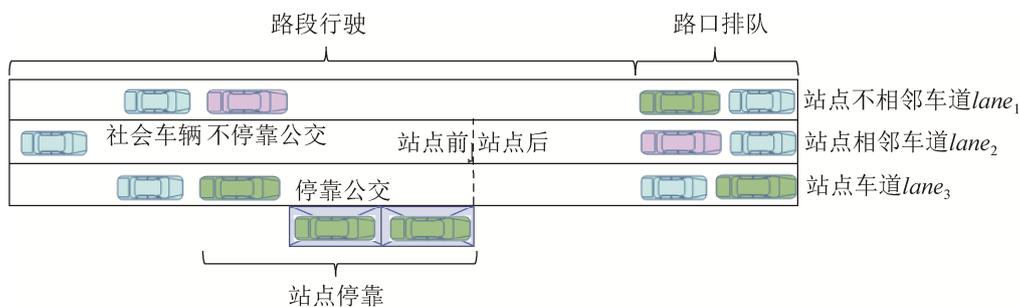


图 1 车辆在港湾式站点路段的运动示意图

Fig. 1 Vehicle movement on the road with a harbor-shaped bus stop

<http://www.china-simulation.com>

• 2020 •

1.1 路段行驶模型

在混合流运行中, 如果社会车辆跟随在更低速或站点排队的公交后面, 很可能利用相邻车道换道超车, 中观模型不描述车辆换道行为, 但将车辆的行为结果等效量化为行驶速度, 例如车辆在 08:00 进入路段, 换道 3 次之后于 08:01 完成 500 m 的路段行驶, 上述过程可等效为车辆以 30 km/h 的速度完成了路段行驶。

1.1.1 站点不相邻车道的混合流速度模型

车道 $lane_1$ 上社会车辆在 t 时刻的行驶速度 $v_s(t)$ 采用速度-密度公式计算为

$$v_s(t) = v_{jam} + (v_{free} - v_{jam}) \left[1 - \left(\frac{k_1(t)}{k_{jam}} \right)^\alpha \right]^\beta \quad (1)$$

式中: α 、 β 为待标定参数; v_{free} 为自由流速度; k_{jam} 为堵塞密度, 根据饱和车头间距计算; v_{jam} 为阻塞密度下的速度, 对应车辆在路口排队的最低速度, 在实际场景下, 即使车道处于高密度情形, 若没有交通事故等引起的停车堵塞, 车辆速度再低也能缓缓驶入下游, 因此 $v_{jam} \neq 0$, 此速度下缓行的交通量不小于路口放行排队车辆的通行能力 c , 即满足 $k_{jam} \cdot v_{jam} \geq c$ 的条件; $k_1(t)$ 为 t 时刻车道 $lane_1$ 的密度。

目前, 相关研究已验证公交与社会车辆的速度差异大小与道路饱和度相关, 道路饱和度越低时, 交通流的车头时距越大, 社会车辆更有优势进行换道超车, 因此社会车辆速度高于公交车速度的差异越大, 道路饱和度越高时这种速度差异越小。中观模型不描述车辆换道等行为, 但建立公交车速度的折减函数 $\delta(v_s(t))$ 以量化上述差异, 社会车辆行驶速度 $v_s(t)$ 代表道路饱和度, 即 $v_s(t)$ 越大, 道路饱和度越低, 折减函数将采用 AVI 数据提供的公交、社会车辆真实路段旅行时间予以标定。公交在 t 时刻的行驶速度为

$$v_b(t) = v_s(t) [1 - \delta(v_s(t))] \quad (2)$$

1.1.2 站点车道的混合流速度模型

以图 1 为例, 站点车道 $lane_3$ 上, 车辆的行驶

区域可细分为站点前区域 $lane_3^f$ 与站点后区域 $lane_3^s$, 站点后区域的车辆行驶不受站点停靠影响, 速度计算参照式(1), (2)。

在站点前区域 $lane_3^f$, 当港湾公交站点排队溢出时, 溢出公交将占用车道路面空间而影响其后方车辆的行驶。溢出公交占用的车道空间越大, 站点前的车辆行驶受阻更大, 无论原地等候或换道超车, 都会降低其行驶速度。因此, 中观模型将站点溢出对车辆行驶的影响等效为车道空间密度对车辆行驶速度的影响, 区域 $lane_3^f$ 的社会车辆行驶速度参照式(1)计算, 但是此区域在 t 时刻的密度为

$$k_3^f(t) = \frac{n_3^f(t) + m_3^f(t)}{l_3^f} \quad (3)$$

式中: $n_3^f(t)$ 为区域 $lane_3^f$ 内处于行驶状态的公交换算的标准车辆数与社会车辆数的总和; $m_3^f(t)$ 为区域 $lane_3^f$ 内处于停驻状态的公交换算的标准车辆数; l_3^f 是区域 $lane_3^f$ 的长度。经相关研究分析, 大型车辆的行驶速度越低, 其对整体交通流的影响则越大, 应该采用更高的换算系数, 参照已有的分析结果^[16], 行驶公交与停驻公交的换算系数分别设置为 1.75 与 2.7。区域 $lane_3^f$ 内行驶公交的速度参照式(2)计算, 停驻公交的速度为 0。

1.1.3 站点相邻车道的混合流速度模型

以图 1 为例, 站点车道 $lane_2$ 同样划分为站点前区域 $lane_2^f$ 与站点后区域 $lane_2^s$ 。参照混合流运行的实际特征, 站点车道的站点前区域 $lane_2^f$ 内, 跟随在停靠公交车后方的社会车辆很可能借用相邻车道区域 $lane_2^f$ 进行换道超车, 从而影响此区域的车辆速度。区域 $lane_3^f$ 的密度越大, 代表站点溢出的公交数量越多, 后方社会车辆更可能换道超车, 从而对相邻车道区域 $lane_2^f$ 的车辆速度产生更大影响。中观模型不描述车辆换道行为, 但将站点溢出对相邻车道的的影响等效为区域 $lane_3^f$ 密度对区域 $lane_2^f$ 车辆速度的影响, 区域 $lane_2^f$ 的社会车辆速度计算式为

$$v_s(t) = v_{jam} + (v_{free} - v_{jam}) \left[1 - \left(\frac{\theta k_2^f(t) + (1-\theta)k_3^f(t)}{k_{jam}} \right)^\alpha \right]^\beta \quad (4)$$

式中： $k_2^f(t)$ 为站点相邻车道的区域 $lane_2^f$ 在 t 时刻的密度； $k_3^f(t)$ 为站点车道的区域 $lane_3^f$ 在 t 时刻的密度； θ 为自定义的影响系数，即考虑区域 $lane_2^f$ 与区域 $lane_3^f$ 密度影响的程度，取值区间为 $[0.50, 1.00]$ ，考虑区域 $lane_3^f$ 密度的程度更高。此外，站点后区域 $lane_2^f$ 的车辆行驶不受站点溢出的影响，社会车辆与公交的速度参照式(1)与式(2)计算。

1.2 站点停靠模型

如图2所示，公交停靠站点的过程包括进站、站点排队、出站3个部分。

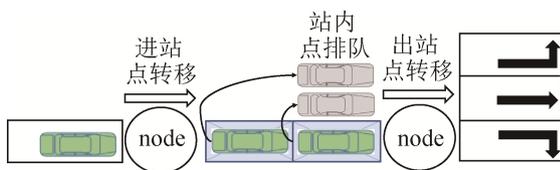


图2 公交进站、站内排队、出站的运动示意图

Fig. 2 Bus arrival, queuing and departure at a harbor-shaped stop

1.2.1 站点排队模型

采用更关注排队车辆数而非物理排队长度的点排队模型^[8]描述公交在站内服务的过程。假设站内遵循先进先出原则，公交根据到达次序垂直堆叠，堆叠数量不超过站点最大泊位数， t 时刻的站内排队公交数为

$$Q_{stop}(t) = Q_{stop}(t - \Delta t) + q_{stop}^{in}(t) - q_{stop}^{out}(t) \quad (5)$$

式中： $q_{stop}^{in}(t)$ 与 $q_{stop}^{out}(t)$ 分别为间隔 $(t - \Delta t, t]$ 内进站与出站的公交数。公交的站点上下客时间为

$$t_{stop} = P + \max \left\{ \sum_{g=1}^{n_1} a_g, \sum_{h=1}^{n_2} b_h \right\} \quad (6)$$

式中： P 为公交开关门所需时间； a_g 为任一乘客 g 上车所需时间； b_h 为任一乘客 h 下车所需时间； n_1 与 n_2 分别为上车与下车乘客总人数。

间隔 $(t - \Delta t, t]$ 内站点排队公交数、站点通行能力 $\Delta t / t_{stop}$ 两者中的较小值 $q_{stop}^{out}(t)$ 为

$$q_{stop}^{out}(t) = \min \{ Q_{stop}(t - \Delta t) + q_{stop}^{in}(t), \Delta t / t_{stop} \} \quad (7)$$

1.2.2 进出站点转移模型

公交进出站的过程由点转移模型^[8]描述，每一辆公交在进站之前，需完成2步判断。第1步：通过式(8)判断公交站内是否有剩余泊位，是则转至第2步，否则在站外排队等候；第2步：判断并驶入公交站内剩余泊位数最多的通道。

$$e_{stop}^i(t) = C_{stop}^i(t) - Q_{stop}^i(t), \forall i \quad (8)$$

式中： $e_{stop}^i(t)$ 为站点内第 i 条通道在 t 时刻的剩余泊位数； $C_{stop}^i(t)$ 为站点内第 i 条通道的泊位容量； $Q_{stop}^i(t)$ 为站点内第 i 条通道已停靠的公交数。

每一辆站内排队公交在出站之前，需完成2步判断。第1步：判断站点下游符合公交转向需求的目标车道组是否有剩余容量，是则转至第2步，否则继续站内排队；第2步：判断并驶入目标车道组中剩余容量最大的车道。

1.3 路口排队模型

如图3所示，车辆的路口排队过程由点排队模型描述，车辆根据到达次序在停车线前垂直堆叠，根据先到先出原则驶离。任意车道在时刻 t 的排队车辆数为

$$Q(t) = Q(t - \Delta t) + q_{in}(\Delta t) - q_{out}(\Delta t) \quad (9)$$

式中： $q_{in}(\Delta t)$ 为间隔 Δt 内加入排队的车辆数； $q_{out}(\Delta t)$ 为间隔 Δt 内放行的车辆数，其由信号配时、车道排队车辆数与车道通行能力 c 三者决定。

$$q_{out}(\Delta t) = \begin{cases} 0, & \Delta t \in R \\ \min \{ Q(t - \Delta t) + q_{in}(\Delta t), c \cdot \Delta t \}, & \Delta t \in G \end{cases} \quad (10)$$

式中： R 、 G 分别为红灯和绿灯的时间集合。

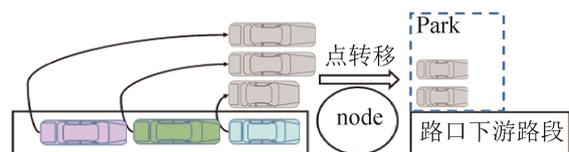


图3 车辆在路口排队与转移的运动示意图

Fig. 3 Vehicle queuing and transfer at an intersection

车辆从路口转移至下游路段的过程由点转移模型描述，绿灯放行的车辆在驶入下游路段前，第

1 步判断路口下游符合车辆转向需求或站点停靠需求的目标车道组是否有剩余容量, 是则转至第 2 步, 否则车辆将以点排队的形式在下游路段的虚拟停车场内垂直堆叠, 等候排放; 第 2 步判断并驶入下游目标车道组中剩余容量最大的车道。

2 基于 AVI 数据的仿真参数标定

本文采用治安卡口检测的 AVI 数据。治安卡口设备安装在路口各进口道停车线前的龙门架上, 拍摄经过车辆的图像, 并自动识别车辆的车牌。治安卡口的检测数据包括车牌(已脱敏)、号牌种类(社会车辆、公交)、经过时间(如: 2018-08-20 T 08:00:00)、卡口 ID、路口 ID、进口道 ID、车道转向等信息字段。

AVI 数据的处理主要包括: ①根据车牌匹配提取每一辆车经过多个路口的时空序列; ②计算每一辆车经过相邻两个路口的时间差, 获取车辆的实测路段旅行时间; ③根据号牌种类区分社会车辆、公交的实测路段旅行时间。

2.1 公交行驶速度的折减函数标定

路段上的车辆根据车牌、公交线路等信息可以划分为社会车辆、不停靠公交与停靠公交。其中, 社会车辆、不停靠公交的 AVI 实测路段旅行时间由路段行驶时间、路口排队时间组成, 如果这些车辆到达路口时可以在当前绿灯或下一个绿灯通行, 则为无二次排队车辆(简称“无排队车辆”), 否则为二次排队车辆, 前者的路段旅行时间包括很少的路口排队时间, 可以近似地表征车辆的路段行驶时间。因此, 本文首先将研究时段划分为若干间隔, 针对车辆在无排队与排队情形下的路段旅行时间差异, 采用二分 K-means 算法聚类出无排队的社会车辆与不停靠公交, 根据路段长度与 AVI 实测路段旅行时间计算这些车辆的路段行驶速度, 然后利用式(11)计算间隔 Δt 内路段 i 上的社会车辆平均行驶速度 $v_{s,i}(\Delta t)$, 再利用式(12)计算 Δt 内路段 i 上的真实公交速度折减比例, 最后收集各间隔内的若干样本, 以最小二乘法拟合折减函数。

$$v_{s,i}(\Delta t) = \frac{1}{|H_{s,i}(\Delta t)|} \sum_{n \in H_{s,i}(\Delta t)} v_{s,i}^n \quad (11)$$

$$\delta(v_{s,i}(\Delta t)) = 1 - \frac{1}{|H_{b,i}(\Delta t)|} \sum_{m \in H_{b,i}(\Delta t)} v_{b,i}^m \quad (12)$$

式中: $H_{b,i}(\Delta t)$ 与 $H_{s,i}(\Delta t)$ 分别为间隔 Δt 内路段 i 上无排队的社会车辆集合与不停靠公交集合; $v_{s,i}^n$ 与 $v_{b,i}^m$ 分别为无排队的第 n 个社会车辆与第 m 个不停靠公交在路段 i 的行驶速度。

2.2 速度-密度模型的参数标定

以路段旅行时间的仿真误差最小化作为标定目标:

$$\text{minimize } |E| = \left| \frac{1}{|D|} \sum_{i \in D} \frac{1}{|H_i|} \sum_{j \in H_i} (t_{i,j} - t_{i,j}^{\text{sim}}) \right| \quad (13)$$

式中: $|E|$ 为路网仿真的绝对误差; H_i 为路段 i 的车辆总集合; $t_{i,j}$ 与 $t_{i,j}^{\text{sim}}$ 分别为车辆 j 在路段 i 上的 AVI 实测旅行时间与仿真旅行时间; D 为路网的路段集合。

α 、 β 的取值决定车辆在路段行驶区域的速度-密度关系, θ 的取值决定站点相邻车道上计算车辆速度的密度值。任意给定的 θ 取值下, 采用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)搜索参数 α 、 β 的最优取值, 标定流程如图 4 所示。

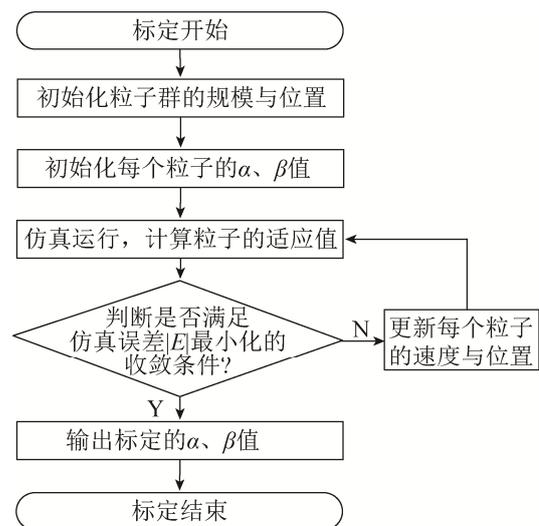


图 4 基于 PSO 算法的 α 、 β 标定流程
Fig. 4 Calibration process of α 、 β based on the PSO algorithm

任意粒子 z 的适应值为仿真运行后式(13)的误差值的倒数, 粒子 z 在第 n 次迭代的速度 $V_{z,n}$ 与位置 $x_{z,n}$ 如式(14)更新:

$$\begin{cases} V_{z,n} = wV_{z,n-1} + ur(p_z^{\text{best}} - x_{z,n-1}) + \\ \quad ur(g^{\text{best}} - x_{z,n-1}) \\ x_{z,n} = x_{z,n-1} + V_{z,n-1} \end{cases} \quad (14)$$

式中: w 为惯性因子, 为 0~1 的随机数; u 为学习因子; p_z^{best} 、 g^{best} 分别为粒子 z 及粒子群取得最高适应值所处的位置, 在每次迭代中 p_z^{best} 、 g^{best} 都将被更新。

在 θ 取值的标定方面, 首先从区间[0.50, 1.00] 内以 0.01 为步长生成不同取值的 θ , 从小至大逐步计算不同 θ 值下的最优 α 、 β 值与相应的误差值, 第 i 步的 $\theta=0.50+0.01i$, 如果第 i 步之后继续提升 θ 值无法再减少误差值, 则将第 i 步的取值作为 θ 的最优取值。

3 实例分析

如图 5 所示, 本文选取安徽省宣城市自西向东的状元南路作为实验路段, 路段最外侧车道设有一个港湾式且包含单个有效泊位数的状元山庄站点, 路段两端的交叉口安装了识别车辆身份的治安卡口。

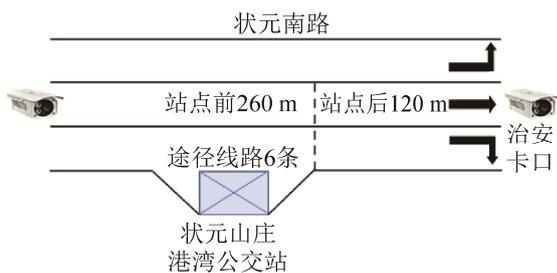


图 5 宣城市状元南路

Fig. 5 Zhuangyuan south road in Xuancheng city

3.1 标定结果分析

针对公交行驶速度折减函数标定, 选取 2018-08-20—24 覆盖高峰(07:30—09:30, 17:00—19:00)与平峰(09:30—11:30, 15:00—17:00)时段的卡口数据, 以 5 min 为间隔采集真实的折减比例样

本。图 6 展示了样本分布与基于最小二乘法拟合的折减函数, 数据表明在真实需求下, 社会车辆处于行驶状态的速度在 10~40 km/h 之间, 折减比例的样本分布呈现随社会车辆速度升高而增大的趋势, 且此趋势在社会车辆速度大于 25 km/h 之后逐渐缓和。

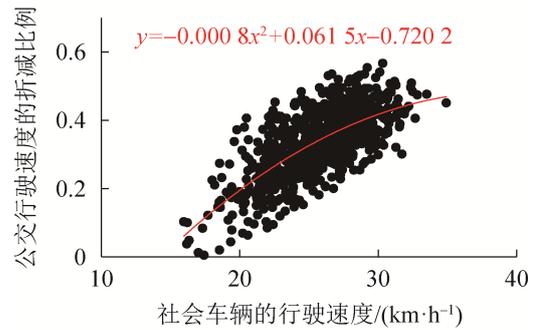


图 6 公交行驶速度的折减函数拟合

Fig. 6 Reduction function fitting of bus speed

针对速度-密度函数的 α 、 β 标定, 选取 8 月 6 日—17 日覆盖工作日早高峰的卡口数据, 采用 PSO 算法予以标定, 并引入遗传算法(genetic algorithm, GA)、模拟退火算法(simulate anneal, SA)与其进行对比实验。不同算法具有不同的迭代机制, 但在迭代过程中均需调用本文构建的中观仿真来计算评价指标, 总耗时主要来源于多次仿真的计算耗时, 因此, 以每种算法达到标定收敛条件前需要调用的仿真次数作为标定效率的衡量指标, 且每种算法都设定相同的标定目标与收敛条件。选用 8 月 8 日早高峰数据进行测试, 路口通行能力 $c=2$ pcu/(sec·lane), 利用卡口实测的停靠公交、不停靠公交的路段旅行时间差值计算公交站点的平均停靠时间, 以站点停靠时间为依据, 仿真中生成站点上下车乘客的分布。由本文方法标定的 θ 最优取值为 0.67, 因此选取 $\theta=0.67$ 情形下三种算法的标定结果如表 1 所示, 结果显示 PSO 算法需调用的仿真次数低于 SA 与 GA 算法, 在标定效率方面具备优势, 此外, PSO 算法标定结果的 MAPE (mean absolute percentage error)也低于 SA 与 GA 算法, 在标定精度方面也同样具备优势。

表 1 三种算法的标定结果

Table 1 Calibration results of three algorithms		
算法	调用仿真总次数	MAPE/%
PSO	40	6.26
SA	224	8.79
GA	139	17.06

3.2 仿真精度分析

选取 8 月 20 日(周一)、8 月 22 日(周三)与 8 月 24 日(周五)的早高峰时段验证标定结果的泛化可靠性。公交与社会车辆路段旅行时间的平均仿真误差 MAPE 如表 2 所示。结果表明实验路段公交仿真的 MAPE 不超过 4.55%, 社会车辆仿真的 MAPE 不超过 8.20%, 验证了标定后的中观模型可以保障混合流仿真的精度。具体而言, 研究路段的早高峰车辆数约 750 辆, 其中公交占比 12%, 社会车辆占比 88%。不同车辆个体的路段旅行时间具有较大的差异性, 它们的路段旅行时间误差也具有差异特征。社会车辆的个体样本数显著高于公交, 其路段旅行时间误差受个体差异性的影响更大, 因此其路段旅行时间的误差高于公交。

表 2 公交与社会车辆路段旅行时间仿真的 MAPE
Table 2 MAPE of link travel time simulation of buses and vehicles %

验证日期	公交	社会车辆
08-20	4.02	7.53
08-22	0.86	8.20
08-24	4.55	8.09

3.3 站点溢出的场景分析

选取 8 月 22 日早高峰(08:45:00—08:51:30)时段的数据验证中观仿真描述站点溢出场景的可靠性。图 7 展示了研究时段内站点车道站点前区域的公交行驶轨迹线, 先后 7 辆公交到达站点停靠, 第 1 辆公交无排队地进入港湾站点停靠, 后面的公交经历了不等的溢出排队时间, 同时刻溢出排队的公交数目最高达到 5 辆, 根据公交行驶轨迹将研究时段划分为溢出时段(08:46:42—08:50:26)和无溢出时段(08:45:00—08:46:41 与 08:50:27—08:51:30)。

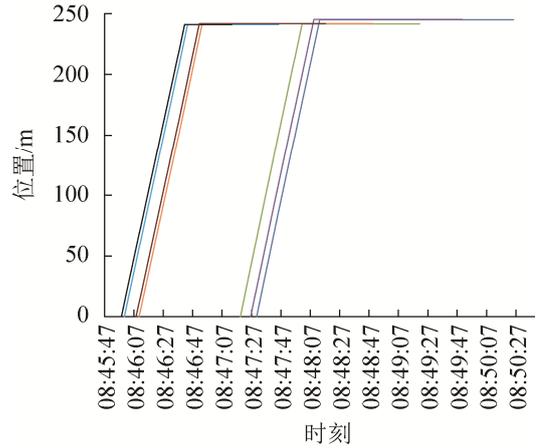


图 7 站点车道站点前区域的公交行驶轨迹线
Fig. 7 Trajectory lines of buses on the area before the station on the station-lane

表 3 展示了站点前区域的社会车辆平均行驶速度。其中, 在站点车道的站点前区域, 社会车辆的平均行驶速度 v_3^f 直接受到站点溢出的影响, 相比无溢出时段, 溢出时段的 v_3^f 降低 4.28 km/h; 在站点相邻车道的站点前区域, 社会车辆的平均行驶速度 v_2^f 间接受到站点溢出的影响, 受影响的程度小一些, 相比无溢出时段, 溢出时段的 v_2^f 降低 1.30 km/h。上述结果说明所构建的中观模型可以有效刻画各车道的社会车辆受站点溢出影响的行驶速度变化。

表 3 站点前区域的社会车辆平均行驶速度
Table 3 Average vehicle speed on the area before the station km·h⁻¹

时段	站点车道的 v_3^f	站点相邻车道的 v_2^f
溢出	37.75	39.42
无溢出	33.47	38.12

图 8 展示了 v_3^f 的时变趋势。一方面, 图中结果直观展示了溢出时段的 v_3^f 低于无溢出时段的趋势; 另一方面, 在溢出时段中, 溢出形成时段位于 08:46:42—08:48:14, 站点溢出的公交数目由 1 辆增长至 5 辆, 速度 v_3^f 呈现了下降的趋势, 溢出消散时段位于 08:48:15—08:50:26, 站点溢出的公交数目逐渐减少, 速度 v_3^f 呈现了回升的趋势, 并且速度回升的趋势比速度下降的趋势更缓慢, 所需时间更长。上述结果说明仿真刻画的溢出场景下社会车辆

行驶速度变化趋势与实际情形相符。

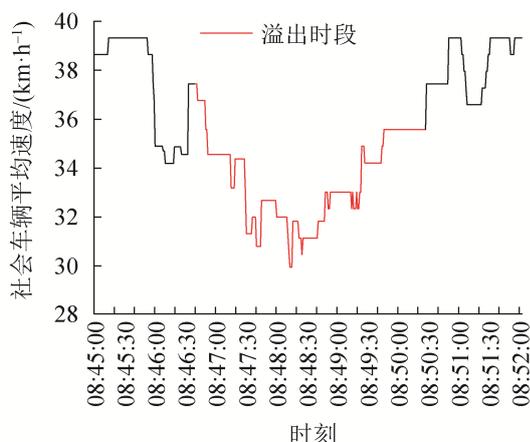


图8 社会车辆平均行驶速度 v_s^f 的时变趋势

Fig. 8 Time-varying tendency of average vehicle speed v_s^f

4 结论

本文构建了公交与社会车辆混合的中观交通仿真模型，在路段行驶过程，考虑公交行驶特征与公交站点溢出的影响，分别建立公交车速折减函数与车道的混合流速度模型，然后采用建模简洁的点排队模型描述站点停靠与路口排队过程。所提出的中观模型以识别车辆身份且观测真实路段旅行时间的 AVI 数据作为标定数据源，以车辆路段旅行时间仿真误差最小化为目标，基于 PSO 算法完成仿真参数标定。选取宣城市状元南路开展实例分析，结果表明所提出的标定算法在精度与效率上均优于其他对比算法，并且标定后的模型具有良好的泛化能力，对公交与社会车辆路段旅行时间仿真的 MAPE 分别不超过 4.55% 与 8.20%，可以保障仿真的准确性。此外，在站点溢出时段的仿真结果表明站点车道、站点相邻车道受影响的社会车辆平均行驶速度分别降低 4.28 km/h 和 1.30 km/h，模型可以有效刻画各车道的社会车辆受站点溢出影响的行驶速度变化。

参考文献:

[1] 何兆成, 朱依婷, 黄鹏元. 基于宏微观耦合模型的城市道路交通流在线估计[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(6): 79-85.

He Zhaocheng, Zhu Yiting, Huang Pengyuan. Online Prediction of Urban Traffic Flow Based on Macro-Micro Model[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(6): 79-85.

- [2] X Hu, Liu T, X Hao, et al. Research on the Influence of Bus Bay on Traffic Flow in Adjacent Lane: Simulations in the Framework of Kerner's Three-phase Traffic Theory[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications (S0378-4371), 2021, 563(8): 125495.
- [3] Luo Q, Zheng T, Wu W, et al. Modeling the Effect of Bus Stops on Capacity of Curb Lane[J]. International Journal of Modern Physics C (S0129-1831), 2018, 29(3): 1850022.
- [4] Zeng J W, Qian Y S, Hui W, et al. Modeling and Simulation of Traffic Flow under Different Combination Setting of Taxi Stop and Bus Stop[J]. Modern Physics Letters B (S0217-9849), 2018, 32(25): 1-13.
- [5] 陈峻, 王涛, 李春燕, 等. 城市公交车与社会车辆混合流速度模型及交通运行状态分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1):128-134.
- Chen Jun, Wang Tao, Li Chunyan, et al. Speed Models of Mixed Traffic Flow on Bus-Car and Vehicle and Analysis of Traffic Running State[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 128-134.
- [6] 宋现敏, 马林, 李丽丽, 等. 公交与右转混合型专用道仿真分析及效益评价[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 146-156.
- Song Xianmin, Ma Lin, Li Lili, et al. Simulation Analysis and Benefit Evaluation of Bus and Right Turn Exclusive Lanes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 146-156.
- [7] Gao W, Gao J, K Ozbay, et al. Reinforcement-Learning-Based Cooperative Adaptive Cruise Control of Buses in the Lincoln Tunnel Corridor with Time-Varying Topology[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2019, 20(10): 3796-3805.
- [8] 何兆成, 林炫华, 聂佩林, 等. 考虑展宽设计的中观交通仿真模型及其标定[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(4): 781-791.
- He Zhaocheng, Lin Xuanhua, Nie Peilin, et al. Mesoscopic Traffic Simulation Model with Stretching-segment Design and Its Calibration[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 781-791.
- [9] Chong L, Osorio C. A Simulation-Based Optimization Algorithm for Dynamic Large-scale Urban Transportation Problems[J]. Transportation Science (S0041-1655), 2017,

- 52(3): 637-656.
- [10] Wang Y M, He Z C. Mesoscopic Modelling and Analysis of Traffic Flow Based on Stationary Observations[J]. Procedia Computer Science (S1877-0509), 2019, 151: 800-807.
- [11] Toledo T, Cats O, Burghout W, et al. Mesoscopic Simulation for Transit Operations[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies (S0968-090X), 2010, 18(6): 896-908.
- [12] Yang Q, Koutopoulos H N, Ben-Akiva M E. Simulation Laboratory for Evaluating Dynamic Traffic Management Systems[J]. Journal of Transportation Engineering (S0733-947X), 2000, 1710(1): 122-130.
- [13] Tang K, Chen S, Liu Z, et al. A Tensor-Based Bayesian Probabilistic Model for Citywide Personalized Travel Time Estimation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies (S0968-090X), 2018, 90: 260-280.
- [14] Zhu Y T, He Z C, Sun W W. Network-Wide Link Travel Time Inference Using Trip-Based Data From Automatic Vehicle Identification Detectors[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2020, 21(6): 2485-2495.
- [15] 余志, 廖琼华, 何兆成. 基于车辆身份感知数据的路段轨迹重构方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(4): 87-93.
- Yu Zhi, Liao Qionghua, He Zhaocheng. Vehicle Trajectory Reconstruction in Signalized-Link Using Vehicle Identification Data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(4): 87-93.
- [16] 曲大义, 杨建, 陈秀锋, 等. 动态车辆换算系数的交通流特性分析方法[J]. 公路交通科技, 2012, 29(4): 132-136.
- Qu Dayi, Yang Jian, Chen Xiufeng, et al. Method of Dynamic Vehicle Conversion Factors Based on Traffic Flow Characteristic Analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(4): 132-136.
- [17] 苏荣霖, 赖元文. 站点客流对公交站点停留时间可靠性的影响[J]. 公路交通科技, 2017, 34(3): 131-137.
- Su Ronglin, Lai Yuanwen. Effect of Station Passenger Flow on Bus Dwell Time Reliability[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(3): 131-137.