

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.05.015

基于车辆行驶轨迹的信号交叉口排队长度估计

姚 佼, 戴亚轩, 倪屹聆, 韦 钰
(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 为了研究如何结合移动检测数据来确定交叉口排队长度, 并以此来衡量交通拥堵程度的问题, 利用车辆行驶轨迹, 分析了通过交叉口车辆的排队特点。根据车辆在队列中的不同排队位置, 分车辆通过交叉口时所存在的 A, B, C 这 3 种位置, 建立了面向延误最小的排队长度估计模型。其中, 通过虚拟线圈检测器后开始减速停止在停车线前的 A 位置车辆排队估计模型基于基本延误模型; 减速进入虚拟线圈检测区域停车的 B 位置车辆排队估计模型基于简化车辆跟驰模型, 对可获得车辆行驶轨迹的网联车减速过程进行了重建; 减速停止在虚拟线圈检测器前的 C 位置车辆排队估计模型基于 LWR 消散模型以及交通流理论算法, 并利用网联车车辆行驶轨迹数据进行了加速过程的重建。在此基础上, 根据不同位置车辆与队尾网联车的距离不同, 对其到达率赋予不同的权重, 计算总的排队长度。最后, 通过图新地球地图软件投影并筛选车辆在案例交叉口的车辆行驶轨迹, 利用微观交通仿真软件 VISSIM 对本研究的模型进行仿真验证。结果表明, 排队长度估计模型与真值的最大误差为 12.4%, 最小为 2.2%, 平均误差为 8.75%, 方差为 12.595%², 绝对与相对误差均保持在可接受范围之内, 说明基于车辆行驶轨迹的信号交叉口排队长度估计模型能够较为有效地估计城市道路交叉口的排队长度。

关键词: 城市交通; 排队长度估计模型; 交通流理论算法; 车辆排队位置; 车辆行驶轨迹; 虚拟线圈检测器

中图分类号: U491.54

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)05-0123-08

Estimation of Queue Length at Signalized Intersection Based on Vehicle Trajectory

YAO Jiao, DAI Ya-xuan, NI Yi-ling, WEI Yu

(School of Business, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to study how to combine movement detection data to determine the queue length at intersection and to measure the degree of traffic congestion, the vehicle queue characteristics at intersection is analysed by using vehicle trajectory. According to the different queue positions of the vehicle in the queue and the stop positions of A, B and C when vehicle passes the intersection, the model of queue length estimation with minimum delay is established. The vehicle queuing estimation model of position A, which starts to decelerate and stops in front of the parking line after passing the virtual loop detector, is based on the basic delay model. The vehicle queuing estimation model of position B, which decelerates into the virtual loop detection area and stops, is based on the simplified car following model, and the deceleration process of the networked vehicle that can obtain the vehicle trajectory is reconstructed. The vehicle queuing estimation model of position C, which decelerates to stop in front of the virtual loop detector, is based on the LWR dissipation model and traffic flow theory algorithm, and the acceleration process is reconstructed by using the networked vehicle trajectory data. On this basis, according to the distance between vehicles at different positions and connected vehicle at the queue end, different weights are given to their arrival rates to calculate the total queue length. Finally, the vehicles are projected by map software and the vehicle trajectories at the

收稿日期: 2019-08-30

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目(17YJCZH225); 上海市青年科技英才扬帆计划项目(19YF1435100)

作者简介: 姚佼(1982-), 男, 山西芮城人, 博士, 副教授. (yaojiao@126.com)

case intersection are screened, and the proposed model is verified by the microscopic traffic simulation software VISSIM. The result shows that the maximum error between the value obtained by the queuing length estimation model and the true value is 12.4%, the minimum error is 2.2%, the average error is 8.75%, and the variance is 12.595%^[2]. The absolute and relative errors are kept within the acceptable ranges, indicating that the estimation model of queue length at signalized intersection based on vehicle trajectory can estimate the queue length of urban road intersection more effectively.

Key words: urban traffic; queue length estimation model; traffic flow theory algorithm; vehicle queuing position; vehicle trajectory; virtual loop detector

0 引言

信号交叉口的排队长度是检测城市干道通行能力的关键参数之一,通常使用检测器来估计排队长度。在交叉口堵塞严重的情况下,排队车辆可能超过检测区域,形成长队列问题,此时难以用固定位置检测器来估计排队长度^[1]。相关研究表明:交通信号的变化会对交叉口附近的干道交通流造成扰动,导致排队车辆时间和空间上的复杂变化。如今移动检测器可以实时更新车辆的最新位置,返回的交通信息数据用于重建车辆轨迹,进而建立排队长度估计模型^[2]。

对于移动车辆的信息采集,张辉等人提出了一种基于信息标识识别来进行车辆定位的方法^[3];万芳等人基于信息采集设备数据和点检测器数据,构建了一种基于卡尔曼滤波的实时数据融合方法^[4];王庞伟等人基于城市车路协同系统动态获取路网信息优势,提出一种利用车路信息融合的实时交通状态评价方法^[5]。进而,利用所采集到的移动数据对实时排队长度进行估计。Xu等人使用配备了智能基础设施合作系统的车辆,利用插值法对单交叉口进口道的车辆排队长度进行估计^[6];Liu等人基于网联车辆的实时数据,建立队列长度时间序列,利用马尔科夫链模型进行排队长度估计^[7];王东柱等人提出了一种基于网联车的停车点数据计算交叉口前车辆排队长度的方法^[8];庄立坚等人提出了一种基于低普及率的网联车数据,利用队尾网联车位置估算最大排队长度的方法^[9]。将虚拟线圈检测器(Virtual Loop Detector, VTL)与移动检测器技术结合更是使此类研究逐渐成为热点。Hoh等人提出了VTL的概念,用于获取通过车辆的位置、时刻和速度信息^[10];Ban等人利用VTL系统,使用从移动检测器收集的交叉口行程时间来估计信号交叉口的实时队列长度^[11];Hao等人基于VTL系统,提出了一种基于运动方程的方法来研究车辆的排队位置,进而估计一个周期的排队长度;他们还基于贝叶斯网

络方法,结合VTL系统使用移动检测器收集的网联车行程时间来估计信号交叉口的排队长度分布^[12]。

但这些方法都是假设排队不会超过上游VTL的情况下提出的,如果车辆在进入VTL区域之前排队并且形成了长队列,则测量延误与车辆的实际延误不一致,不能用这些方法进行估计排队长度。针对这一问题,Izadpanah等人提出了一种基于轨迹的冲击波检测模型,识别网联车形成波与行驶轨迹的交点,使用线性回归模型来估计排队长度^[13];Cheng等人提出了一种从车辆轨迹中提取关键点来判断其运动状态,进而基于冲击波模型来估计交叉口实时排队长度的方法^[14];Hao等人提出了一种利用重建车辆运动轨迹来计算延误,进而建立排队长度估计模型的方法,但其排队长度等于队尾网联车到停车线的距离,忽略了后续加入的排队车辆^[15]。

综上所述,现状大多数对于排队长度估计的研究在遇到长队列问题时会比较棘手,且忽略了后续排队车辆。本研究旨在使用移动检测器在VTL区域中收集轨迹信息进行排队长度估计,特别是利用VTL区域内所能获取的较短的车辆轨迹来解决长队列问题,使用车辆轨迹重建方法估计样本车辆的总交叉口延误。当车辆减速通过上游VTL时,应用简化车辆跟随模型;当车辆加速通过上游VTL时,基于LWR理论使用排队消散模型重建其排队轨迹,在重建缺失加速行驶轨迹之后,基于延误最小化方法估计队尾车辆到停车线的距离。最后根据各个车辆与队尾可收集行驶轨迹网联车的距离不同,对其到达率赋予不同的权重计算总的排队长度。

1 交叉口车辆的排队特点分析

图1描绘了一个信号交叉口中一部分车辆的行驶轨迹信息,X轴表示经过的时间,Y轴表示到停车线的距离(正值表示停车线的上游位置),长队列VTL1为当排队长度超过97.5 m时所设置的虚拟线圈检测器,短队列VTL1为当排队长度大于37.5 m

且小于 97.5 m 时所设置的虚拟线圈检测器, VTL2 为设置在停车线另一侧 97.5 m 的虚拟线圈检测器, VTL1 与 VTL2 共同组成了 VTL 区域。如果上游 VTL1 足够远, 如图水平粗实线所示, 距离停车线 97.5 m, 则到达流量可视为自由流量; 如果上游 VTL1 靠近停车线, 如图水平粗虚线所示, 距离停车线 37.5 m, 则认为通过上游 VTL1 的车辆受到未检测到的交通流干扰。

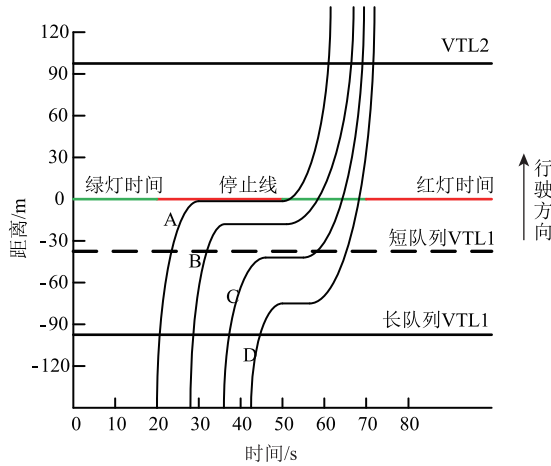


图1 不同位置车辆的行驶轨迹图

Fig. 1 Curves of traveling trajectory of vehicles at different locations

每个排队车辆的交叉口延误由 3 部分组成: 减速延误, 排队延误和加速延误, 而自由流车辆没有任何延误。对于每辆车, 我们首先根据 VTL 区域捕获的短轨迹确定车辆是否排队以及其所属延误方式, 再根据排队中的不同车辆类型进行排队长度的估计。其中有 4 种可能的车辆类型: (1) A 位置车辆: 以自由流速通过上游 VTL1, 然后减速停止并加速到 VTL 区域内; (2) B 位置车辆: 减速进入 VTL1 区域, 然后因排队停止再加速通过交叉口; (3) C 位置车辆: 加速进入 VTL 区域并直接离开交叉口; (4) D 位置车辆: 以自由流速通过 VTL 区域的车辆。

2 交叉口停车线前 3 种典型位置车辆的排队估计模型

2.1 A 位置车辆的排队长度估计模型

通过 VTL 测量的 A 位置车辆的延误与交叉口延误完全相同, 交叉口延误在一个周期内近似于线性减少。我们使用最后一个 A 位置排队车辆的轨迹作为输入, 基于延误模型, 利用延误减小到零的时间来估计一个信号周期内的排队长度。在本研究中, 我们使用车辆数来表示排队长度。

研究表明, 当车辆行驶速度不同时, 队列的车头间距也会不同^[16]。假设队列中第 1 辆车的排队位置为 0, 以车辆数量表示最后一个 A 位置排队车辆在队列中的位置:

$$L_A = k_j D_A + 1, \quad (1)$$

式中, k_j 为交叉口的特定堵塞密度; D_A 为最后一个 A 位置排队车辆到停车线的距离。

最后一个 A 位置排队车辆在无交叉口延误的情况下到达停车线的时间 (NAT):

$$t_{NAT}^A = t_1^A + t_{min}, \quad (2)$$

式中, t_1^A 为车辆到达 VTL1 的时间; t_{min} 为车辆能从 VTL1 到停车线的最小通过时间。

车速对于排队队列既有相互制约的关系, 也有相互独立的关系。车速影响着队列行驶状态, 导致车头时距发生变化^[17]。一个周期内的排队长度:

$$Q_A = L_A + \frac{t_{SL}^A - t_{NAT}^A}{h_d - h_{ds}} = k_j D_A + \frac{t_{SL}^A - t_{NAT}^A}{h_d - h_{ds}} + 1, \quad (3)$$

式中, t_{SL}^A 为最后一个 A 位置排队车辆的出发时间; h_d 为车辆到达的平均车头时距; h_{ds} 为车辆离开的饱和平均车头时距。

2.2 B 位置车辆的排队长度估计模型

2.2.1 基于简化车辆跟驰模型的减速过程重建

我们假设第 1 辆车在不同周期到达交叉口时有相同的减速行为^[18], 跟随车辆与主车辆具有基本相同的时空轨迹, 因此身后的排队车辆遵循相同的轨迹进行减速。

设 $S = Y(t)$ 是某个给定排队车辆的时空轨迹函数, 则:

$$S + \Delta S(x) = Y[t + \Delta t(x)], \quad (4)$$

式中, S 为从车辆到停车线的距离; $\Delta S(x)$ 为车辆在位置上的变化量; x 为主车辆的累积流量; t 为实际时间; $\Delta t(x)$ 为车辆在时间上的变化量。

车辆在点 (a, b) 处的速度如下, 并令 $G(*)$ 为 $-Y(*)$ 的反函数:

$$c = -\frac{\partial S}{\partial t} = -Y'[t + \Delta t(x)], \quad (5)$$

$$t + \Delta t(x) = G(c). \quad (6)$$

因此, 减速中任何轨迹点的坐标都可以表示为累积流量 x 和速度 c 的函数:

$$a(c, x) = G(c) - \Delta t(x), \quad (7)$$

$$b(c, x) = Y[G(c)] - \Delta S(x). \quad (8)$$

第 x^* 辆的坐标为:

$$a(c, x^*) = G(c) - \Delta t(x^*), \quad (9)$$

$$b(c, x^*) = Y[G(c)] - S(x^*). \quad (10)$$

取式(9)的一阶导数:

$$\frac{dt}{dc} = G'(x)。 \quad (11)$$

当已知车辆通过 VTL1 的时间和速度时:

$$a(c_1, x^*) = t_1, \quad (12)$$

$$b(c_1, x^*) = d_1, \quad (13)$$

式中, c_1 为车辆在 VTL1 处测量的速度; t_1 为车辆在 VTL1 处测量的时间; d_1 为从 VTL1 到停车线的距离。

减速过程中任何速度 c 下的相应轨迹点的坐标:

$$a(c, x^*) = t_1 + \int_{c_1}^c \bar{G}'(v) dv, \quad (14)$$

$$b(c, x^*) = d_1 + \int_{c_1}^c v \bar{G}'(v) dv, \quad (15)$$

式中 $\bar{G}'(v)$ 为 $G(v)$ 的平均值。

2.2.2 排队长度估计

由图2所示, 我们可以得到车辆开始从自由流速度开始减速时的坐标, 并通过绘制假想自由流车辆轨迹来估计 B 位置车辆的 NAT。

将自由流速度 c_f 代入式(11), 我们可以得到车辆开始从自由流速度减速时的位置坐标 (a_f, b_f) 。通过图2可以得到 B 位置车辆的 NAT:

$$t_{\text{NAT}}^B = a_f + \frac{b_f - b_1}{c_f} + t_{\min}。 \quad (16)$$

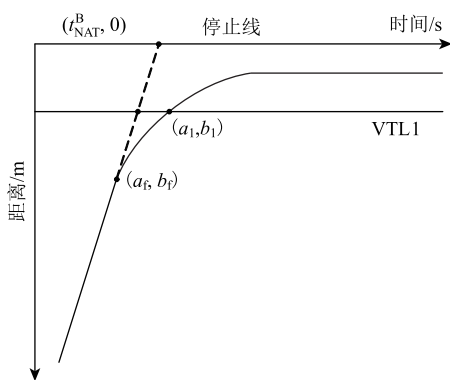


图2 B位置车辆的 NAT 计算

Fig. 2 Calculation of NAT for vehicle at position B

将 t_{NAT}^B , t_{SL}^B 和 L_B 代入式(3)可得排队长度:

$$Q_B = L_B + \frac{t_{\text{SL}}^B - t_{\text{NAT}}^B}{h_d - h_{\text{ds}}} = k_j D_B + \frac{t_{\text{SL}}^B - a_f - \frac{b_f - b_1}{c_f} - t_{\min}}{h_d - h_{\text{ds}}} + 1, \quad (17)$$

式中, t_{NAT}^B 为最后一个 B 位置排队车辆在无交叉口延误的情况下到达停止线的时间; t_{SL}^B 为最后一个 B 位置排队车辆的出发时间; L_B 为以车辆数量表示最后一个 B 位置排队车辆在队列中的位置; D_B 为 B 位置排队车辆到停车线的距离。

2.3 C 位置车辆的排队长度估计模型

2.3.1 排队消散模型

基于 Lighthill、Whitham 和 Richards (LWR) 理论, 密度 k 和流速 q 之间有如下关系:

$$\frac{\partial q(a, b)}{\partial a} + \frac{\partial k(a, b)}{\partial b} = 0。 \quad (18)$$

对于均匀的路段, 流速 q 是某些给定函数 M 密度 k 的函数:

$$q(a, b) = M[k(a, b)]。 \quad (19)$$

因为 $M[k(a, b)] = M(k)$, 这个方程独立于 a 和 b , 则 $q(a, b)$ 的偏微分方程为:

$$\frac{dM}{dx} \cdot \frac{\partial k(a, b)}{\partial a} + \frac{\partial k(a, b)}{\partial b} = 0。 \quad (20)$$

因此, $q(a, b)$ 沿由以下微分方程定义的直线特征曲线保持不变:

$$\frac{db}{da} = \frac{dM}{dk} \equiv N, \quad (21)$$

式中, N 为在流速为 q 和密度为 k 时的波速, 也可以认为是流密度基本图中点 (a, b) 处切线的斜率。

我们可以计算出沿着速度特征线 c 时 x 的变化率:

$$\frac{dx}{dk} = \frac{\delta x}{\delta b} \cdot \frac{db}{da} + \frac{\partial x}{\partial a} = kN + q。 \quad (22)$$

将 (a_0, b_0) 为由 $x(a, b) = 0$ 定义的曲线上给定速度的点。在时间为 a , 速度为 c 时特征线上的累积流量为:

$$x = (kN + q)(a - a_0)。 \quad (23)$$

然后沿着速度特征线计算, 相应的 (a, b) 坐标如下:

$$a = a_0 + \frac{x}{kN + q}, \quad (24)$$

$$b = b_0 + N(a - a_0) = b_0 + \frac{Nx}{kN + q}。 \quad (25)$$

2.3.2 基于交通流理论算法的加速过程重建

当时间为 a_i 和位置为 b_i 时, 第 i 辆 A/B 位置车辆加速到速度 c , 此时:

$$b_i = N(a_i - T_g^i) + o, \quad (26)$$

式中, N 和 o 是速度 c 特征线的斜率和截距; T_g^i 是车辆离开交叉口时的绿灯开始时间。

我们利用线性拟合的方法来找到合适的斜率和截距, 以最大限度地减少时间误差:

$$\min_{N, o} \sum_{i=1}^n \left(a_i - T_g^i - \frac{b_i - o}{N} \right)^2。 \quad (27)$$

我们需要找到零速特征线和车辆轨迹相交的车辆排队位置, 排队消散模型如图3所示。根据位置与时间、速度的关系:

$$b = \bar{N}(c)a + \bar{o}(c). \quad (28)$$

所以 b 的总导数为:

$$db = \frac{\partial b}{\partial a}da + \frac{\partial b}{\partial c}dc = \bar{N}(c)da + [\bar{N}'(c)a + \bar{o}(c)]dc. \quad (29)$$

对式 (29) 进行计算可得:

$$\frac{db}{dc} - \frac{c}{c + \bar{N}'(c)} \cdot \frac{\bar{N}'(c)}{\bar{N}(c)}b + \frac{c}{c + \bar{N}'(c)} \cdot \frac{\bar{o}(c)\bar{N}'(c) - \bar{o}'(c)\bar{N}(c)}{\bar{N}(c)} = 0. \quad (30)$$

$$\text{令 } H(u) = \frac{c}{c + \bar{N}'(c)} \cdot \frac{\bar{N}'(c)}{\bar{N}(c)}, Z(u) = \frac{c}{c + \bar{N}'(c)} \cdot \frac{\bar{o}(c)\bar{N}'(c) - \bar{o}'(c)\bar{N}(c)}{\bar{N}(c)}, \text{ 则:}$$

$$\frac{db}{dc} - H(u)b + Z(u) = 0. \quad (31)$$

该微分方程的解为:

$$b(c) = -e^{-Y(c)} \left(\int e^{Y(c)} Z(c) dc + C \right), \quad (32)$$

式中, $Y(c) = \int H(c) dc$; C 是常数。

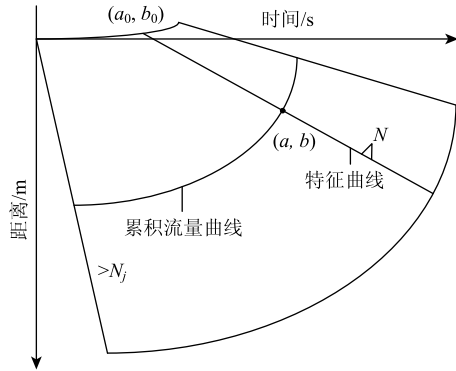


图3 排队消散模型

Fig. 3 Queue dissipative model

2.3.3 排队长度和排队位置估计

对于 C 位置车辆, 我们可以通过式 (27) 计算速度为 0 时刻的位置即 $b(0)$, 然后从重建的加速轨迹中找到队列位置。但是, 由于无法准确估计 C 型车辆的 NAT, 我们无法使用式 (2) 直接估计队列长度。但是, 最后一个 C 位置排队车辆的队列位置确定了该循环的队列长度的下限。即:

$$Q_C = L_C = k_j D_C + 1, \quad (33)$$

式中, L_C 为以车辆数量表示最后一个 C 位置排队车辆在队列中的位置; D_C 为最后一个 C 位置排队车辆到停车线的距离。

2.4 改进后的排队长度估计模型

一般认为, 一个信号周期的排队长度等于可获

得行驶轨迹的队尾网联车到停车线的距离, 加上剩余红灯时间里队尾网联车上游车辆的排队长度, 如图 4 所示。

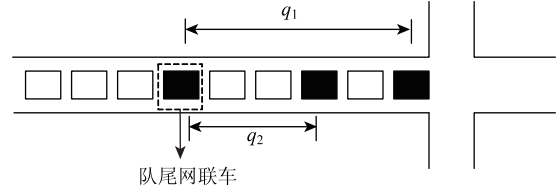


图4 到达率原理

Fig. 4 Principle of arrival rate

我们认为剩余红灯时间内的到达率是稳定的, 使用平均值表示到达率。计算队尾网联车下游中的各个网联车与其之间的到达率 q_i :

$$q_i = \frac{D_L - D_i}{h - (T_L - T_i)}, \quad (34)$$

式中, q_i 为队尾网联车下游中的每一辆网联车与其之间的到达率; D_L 为队尾网联车到停车线的距离; D_i 为第 i 辆网联车到停车线的距离; h 为平均标准车头间距; T_L 为队尾网联车进入排队的时间; T_i 为第 i 辆网联车进入排队的时间。

根据与队尾网联车的距离来确定不同到达率的权重分配, 距离越近则权重越大。

$$\begin{cases} z_i = \frac{1}{D_L - D_i} \\ \omega_i = \frac{z_i}{\sum_{i=1}^{L-1} z_i} \\ \sum_{i=1}^{L-1} \omega_i = 1 \end{cases}, \quad (35)$$

式中, ω_i 为加权系数, 总和为 1。

则剩余红灯阶段到达车辆数为:

$$Q_r = (T_r - T_L) \sum_{i=1}^L \omega_i q_i, \quad (36)$$

式中 T_r 为剩余红灯时间。

因此, 3 种不同位置车辆的排队长度可以表示为:

$$\begin{aligned} \text{A 位置车辆: } Q_A &= k_j D_A + \frac{t_{SL}^A - t_{NAT}^A}{h_d - h_{ds}} + (T_r - T_L) \sum_{i=1}^L \omega_i q_i + 1; \\ \text{B 位置车辆: } Q_B &= k_j D_B + \frac{t_{SL}^B - a_f - \frac{b_f - b_l}{c_f} - t_{\min}}{h_d - h_{ds}} + (T_r - T_L) \sum_{i=1}^L \omega_i q_i + 1; \end{aligned}$$

$$C \text{ 位置车辆: } Q_c = k_j D_c + (T_r - T_L) \sum_{i=1}^L \omega_i q_i + 1.$$

3 案例仿真与分析

本研究选取上海市黄浦区西藏南路干道上的两个相邻交叉口（西藏南路—淮海中路、西藏南路—金陵中路）。这两个交叉口属于上海市一个小型路网，此路网位于黄浦区较为繁华地段，且交叉口处于该路网中的中心位置，无论是高峰小时交通量还是排队长度等参数在大部分交叉口中都具有一定的代表性。通过地图软件图新地球（LSV）投影网联车车辆行驶轨迹并筛选目标车辆在经过相应交叉口的行驶轨迹，分 A, B, C 这 3 类车型在交叉口遇到排队时的场景，对本研究模型的计算结果与微观交通仿真软件 VISSIM 仿真输出的真值进行分析比对。

在进行仿真试验时，对流量、土地利用以及车型的影响进行了考虑。流量影响主要是考虑到晚高峰时段流量急剧增加，排队长度会明显发生变化，并且排队长度会出现明显的增加。土地利用影响主要是考虑到平交口沿线正在进行地铁建设，这对于排队长度也有一定的影响，但这正好也能反映出对于交通运行的影响大小。车型影响主要是将不同车辆换算成了标准 PCU 进行计算。

本研究采用根据实际车辆进行参数标定的 Wiedemann74 模型来描述车辆在道路中的跟驰情况，它可以作为网联车辆的基本模型，主要用于城市内部交通，有利于对排队长度的研究。并且是 VISSIM 中自带的驾驶模型，不需要调用外部 API，可以通过对其参数进行标定，使得仿真结果与实际测量数据的差异最小化。具体的参数标定结果如表 1 所示。

表 1 基于 Wiedemann74 模型的主要参数标定结果

Tab. 1 Wiedemann74 model based calibration result of main parameters

参数	默认参数值	标定后参数值
最小车头时距/s	0.5	1.94
最大减速度/(m·s ⁻²)	-4	-2.33
安全距离折减系数	0.6	0.19
观察前方车辆数/veh	3	4.76
最大前视距离/m	250	231.81
平均停车间距/m	2	2.38
安全距离附加项	2	2.35
安全距离倍数项	3	1.29

案例中 VTL1 设置在离交叉口停车线 37.5 m 处，停车线两侧 VTL 均设置在距离停车线 97.5 m 处。VISSIM 中导入实际路网，并做相应的道路渠化设

置，输入高峰时段的小时交通量以及信号配时数据，仿真时长为 3 600 s，对 3 种车型分别进行 5 次 VISSIM 实例仿真，仿真结果取 5 次仿真的平均值。两个交叉口采集的高峰小时交通量如表 2 所示。VISSIM 仿真排队长度的仿真值与模型计算结果对比如表 3 所示。

表 2 案例交叉口高峰小时标准 PCU 统计（单位：pcu/h）

Tab. 2 Statistics of standard PCU at peak hours at case intersection (unit: pcu/h)

交叉口	进口道	左转	直行	右转
西藏南路—淮海中路	东	—	216	288
	南	264	1 152	192
	西	144	600	192
	北	456	1 200	240
西藏南路—金陵中路	东	—	386	193
	南	282	2 628	—
	西	—	—	—
	北	—	2 880	—

表 3 排队长度的 VISSIM 仿真值与模型计算结果对比

Tab. 3 Comparison of queue lengths between value of VISSIM simulation and model calculation result

交叉口	车型	VISSIM 仿真结 果/m	模型计 算结果/ m	绝对 误差/ m	相对 误差/ %
西藏南路—淮海中路	A	49	44	5	10.2
	B	76	70	6	7.9
	C	44	48	4	9.1
西藏南路—金陵中路	A	56	50	6	10.7
	B	97	85	12	12.4
	C	46	45	1	2.2

从表 2 中可以看出，两个交叉口各类车型模型的计算值和仿真真值最大误差为 12 m，最小误差为 1 m，如图 5 所示。此外，本研究模型的绝大部分计算结果较仿真真值偏小，可能是由于：（1）上述所研究交叉口位于上海市黄浦区中心地带，道路通行能力无法满足庞大的交通量，在高峰时段经常有交警进行交通疏导，与交通信号控制产生一定的冲突；（2）采集数据由于技术手段原因可能存在部分遗漏，造成误差，使得 VISSIM 仿真结果较大；（3）平均到达率小于实际到达率，排队长度估计偏大。

相对误差方面，两个交叉口各类车型最大相对误差为 12.4%，最小为 2.2%；平均为 8.75%，方差为 12.595%²，如图 6 所示。具体而言，西藏南路—淮海中路交叉口本研究模型与真值的最大相对误差为

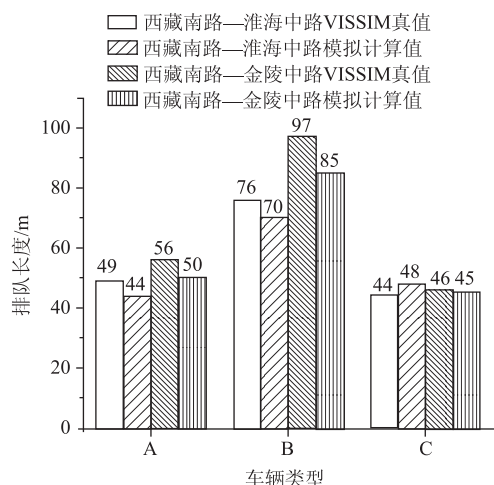


图5 仿真对比结果

Fig. 5 Comparison of simulation results

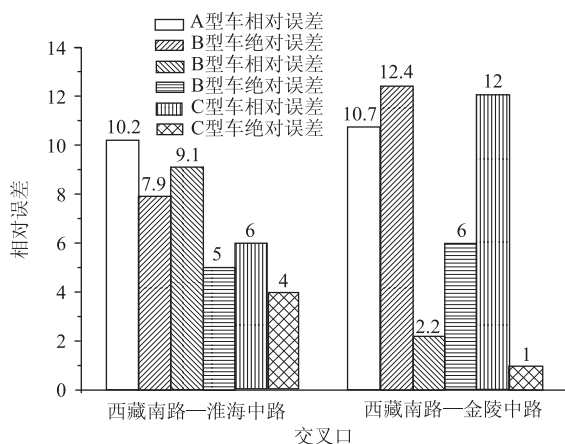


图6 相对误差对比图

Fig. 6 Comparison of relative errors

10.2%, 最小为 7.9%; 平均为 9.1%, 方差为 $1.32\%^2$; 西藏南路—金陵中路的最大相对误差为 12.4%, 最小为 2.2%; 平均为 8.4%, 方差为 $29.9\%^2$ 。此外, 西藏南路—淮海中路的相对误差起伏不大, 较为贴合平均值; 而西藏南路—金陵中路的相对误差起伏较大, 偏离平均值较大, 但在可接受范围内, 可能是由于: (1) 西藏南路—金陵中路交叉口调查期间, 周边存在地铁 14 号线的施工, 部分交叉口进口道占用封道, 造成通行能力下降; (2) 部分进口道没有设置非机动车专用车道, 在机动车与非机动车同时放行相位期间产生冲突, 机动车通行能力下降; (3) VISSIM 仿真软件中计算排队长度的模型对各项数据的精度要求高, 数据采集时存在一定的误差, 模型的参数标定亦有可能对结果产生影响; (4) 两个交叉口之间的直线距离无法保证车辆在相邻交叉口顺畅行驶。

4 结论

基于车辆行驶轨迹研究排队长度, 能够缓解交通控制对于固定检测器的严重依赖, 并可以利用轨迹数据来估计交通控制所需的关键参数, 为交通信号控制策略提供决策支持。本研究利用车辆行驶轨迹, 分成 A, B, C 共 3 类车型, 对交叉口队列中不同排队位置的车辆进行分析, 建立了面向延误最小的排队长度估计模型; 进而根据车辆与队尾网联车距离不同, 对其到达率赋予不同的权重, 计算总的排队长度。最后, 对案例交叉口中投影在图新地球地图软件中的车辆行驶轨迹进行筛选, 利用微观交通仿真软件 VISSIM 对本研究的模型进行仿真验证。仿真结果表明, 本研究的排队长度估计模型与真值的平均误差为 8.75%, 方差为 $12.595\%^2$, 这说明本模型能够较为有效地估计城市道路交叉口的排队长度。但应该注意的是, 本研究由于无法准确估计 C 型车辆的 NAT, 因此无法使用研究模型直接估计队列长度, 需要在今后对其进行进一步的研究。另外, 对于车辆在队列中的排队位置估计不够准确, 容易造成模型计算结果的偏差, 可以考虑通过对其进行约束条件的增加, 确定车辆的排队范围, 再进行排队位置的确定。

参考文献:

References:

- [1] LIU H, WU X, MA W, et al. Real-time Queue Length Estimation for Congested Signalized Intersections [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2009, 17 (4): 412-427.
- [2] 张存保, 严新平. 固定检测器和移动检测器的交通信息融合方法 [J]. 交通与计算机, 2007, 25 (3): 14-17, 22.
ZHANG Cun-bao, YAN Xin-ping. Data Fusion Method for Traffic Information Detected by Fixed Detectors and Floating Cars [J]. Computer and Communications, 2007, 25 (3): 14-17, 22.
- [3] 张辉, 庄文盛, 杨永强, 等. 车路协同系统中的车辆精确定位方法研究 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (5): 137-143.
ZHANG Hui, ZHUANG Wen-sheng, YANG Yong-qiang, et al. Study on Vehicle Accurate Position Method in Cooperative Vehicle Infrastructure System [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (5): 137-143.

- [4] 万芳, 牛树云, 朱丽丽, 等. 基于 DSRC 与点检测器数据融合的实时交通状态表达方法 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (8): 123–129.
WAN Fang, NIU Shu-yun, ZHU Li-li, et al. Real-time Traffic State Expression Based on DSRC and Point Detector Data Fusion [J], Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (8): 123–129.
- [5] 王庞伟, 于洪斌, 张为, 等. 城市车路协同系统下实时交通状态评价方法 [J]. 中国公路学报, 2019, 32 (6): 176–187.
WANG Pang-wei, YU Hong-bin, ZHANG Wei, et al. Real-time Traffic Status Evaluation Method for Urban Cooperative Vehicle Infrastructure System [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (6): 176–187.
- [6] XU H, DING J, ZHANG Y, et al. Queue Length Estimation at Isolated Intersections Based on Intelligent Vehicle Infrastructure Cooperation Systems [C] // 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Los Angeles: IEEE, 2017: 655–660.
- [7] LIU H, LIANG W, RAI L, et al. A Real-time Queue Length Estimation Method Based on Probe Vehicles in CV Environment [J]. IEEE Access, 2019, 7 (2): 20825–20839.
- [8] 王东柱, 陈艳艳, 李亚檬. 基于浮动车停车点数据交叉口车辆排队长度计算方法 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (12): 119–124.
WANG Dong-zhu, CHEN Yan-yan, LI Ya-meng. Algorithm of Vehicle Queue Length in Front of Intersection Based on Floating Car Data [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (12): 119–124.
- [9] 庄立坚, 何兆成, 叶伟佳. 基于浮动车数据的排队长度检测方法研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13 (3): 78–84.
ZHUANG Li-jian, HE Zhao-cheng, YE Wei-jia. Queue Length Estimation Based on Floating Car Data [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13 (3): 78–84.
- [10] HOH B, GRUTESER M, HERRING R, et al. Virtual Trip Lines for Distributed Privacy-preserving Traffic Monitoring [C] // Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. [S. l.]: ACM, 2008: 15–28.
- [11] BAN X, HAO P, SUN Z. Real Time Queue Length Estimation for Signalized Intersections Using Travel Times from Mobile Sensors [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2011, 19 (6): 1133–1156.
- [12] HAO P, BAN X, GUO D. Cycle-by-cycle Intersection Queue Length Distribution Estimation Using Sample Travel Times [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 68: 185–204.
- [13] IZADPANAH P, HELLINGA B, FU L. Automatic Traffic Shockwave Identification Using Vehicles' Trajectories [C] // Proceedings of the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D. C.: TRB, 2009: 1–12.
- [14] CHENG Y, QIN X, JIN J. An Exploratory Shockwave Approach to Estimating Queue Length Using Probe Trajectories [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2012, 16 (1): 12–23.
- [15] HAO P, BAN X. Long Queue Estimation for Signalized Intersections Using Mobile Data [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 82 (B): 54–73.
- [16] 陈春妹, 任福田, 荣建. 理想条件下路网临界车头间距的研究 [J]. 公路交通科技, 2003, 20 (1): 118–121.
CHEN Chun-mei, REN Fu-tian, RONG Jian. Research on Critical Headway under Ideal Condition [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20 (1): 118–121.
- [17] 罗霞, 霍娅敏, 杜进有. 车头间距分布规律的研究 [J]. 西南交通大学学报, 2001, 36 (2): 113–116.
LUO Xia, HUO Ya-min, DU Jin-you. Study on the Distribution Patterns of Time Headway of Vehicles [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36 (2): 113–116.
- [18] NEWELL G F. A Simplified Car-following Theory: A Lower Order Model [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2002, 36 (3): 195–205.