文章编号:1005-0523(2023)03-0066-11

基于轨迹数据的过饱和信号路口排队长度估计

刘旭星,邓明君,彭理群

(华东交通大学交通运输工程学院,江西 南昌 330044)

摘要:针对交通过饱和情况,利用网联车轨迹数据提供的车辆到达和停车位置等信息,提出一种基于交通冲击波的周期初始队列长度和最大排队长度的估计方法。基于网联车车辆轨迹确定车辆到达时刻、排队时刻、启动时刻及驶离时刻4个临界点的时空数据,并根据时空信息建立到达率估计模型,运用冲击波理论对每个周期初始队列长度及最大排队长度进行估计,应用微观交通仿真软件SUMO对模型进行仿真验证。实验结果表明:在网联车渗透率不低于20%的情况下,当v/c=1.0(v为实际交通流量,c为道路通行能力)时,初始队列长度MAE值小于6.5 m,MAPE值小于10%,最大排队长度的MAE值小于16.0 m,MAPE值小于11%,说明基于车辆轨迹的交叉口排队长度估计模型能够较为有效地估计过饱和交叉口的最大排队长度和初始队列长度。

关键词:过饱和交叉口;交通冲击波理论;轨迹数据;排队长度估计;SUMO仿真

中图分类号:U491.2 **文献标志码**:A

本文引用格式:刘旭星,邓明君,彭理群. 基于轨迹数据的过饱和信号路口排队长度估计[J]. 华东交通大学学报,2023,40(3):66-76.

Estimation of Queue Length at Oversaturated Signal Intersections Based on Trajectory Data

Liu Xuxing, Deng Mingjun, Peng Liqun

(School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330044, China)

Abstract: For the traffic oversaturation situation, it proposed a method to estimate the cycle initial queue length and maximum queue length based on the traffic shock wave by using the information of vehicle trajectory data such as vehicle arrival and parking location. Based on the trajectory of connected vehicles, the four critical points of vehicle arrival time, queuing time, start time and departure time were determined according to the arrival rate of each cycle according to the information provided by the critical point, and the initial queue length and maximum queuing length of each cycle were estimated by using shock wave theory, and the model was simulated and verified by the micro traffic simulation software SUMO. The experimental results show that the penetration rate of connected vehicles is not less than 20%, when v/c=1.0, the initial queue length MAE value is less than 6.5 meters, the MAE value is less than 10%, the MAE value of the maximum queue length less than 16.0 meters, and the MAPE value is less than 11%, indicating the intersection queuing length estimation model based on vehicle trajectory can still estimate the maximum queuing length and initial queue length of supersaturated intersections more effectively.

Key words: supersaturated intersection; traffic shock wave theory; trajectory data; queue length estimate; SUMO

收稿日期:2022-11-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51965021,52062015)

simulation

Citation format：LIU X X，DENG M J，PENG L Q. Estimation of queue length at oversaturated signal intersections based on trajectory data[J]. Journal of East China Jiaotong University，2023，40(3)：66-76.

排队长度是信号控制交叉口运行状态的关键评价指标之一，也是信号控制优化的重要目标之一[1]。传统的周期最大排队长度估计研究主要依赖线圈、地磁等定点检测器采集的交通流信息，在交叉口处于过饱和情况下，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。

近年，随着移动互联、智能网联的快速发展，基于网联车车辆轨迹数据的交叉口排队长度估计得到国内外学者的广泛关注。利用车辆轨迹数据估计排队长度的方法主要分为两大类。一类是概率方法。谈超鹏等[2-3]利用历史轨迹推导经验非参数到达分布，提出了一种概率方法，将队列长度估计公式化为参数估计问题，并估计了周期中具有最大概率的排队长度。然而，该方法仅基于观测样本构建概率函数估计排队长度，在样本充足的高渗透率条件下可以得到较为可靠的估计，而低渗透率条件下则精度难以保证。在该研究基础上，谈超鹏等[4]又提出了一种抽样车辆轨迹数据的队列估计模型，无须假设特定的车辆到达、信号配时、交通量或排队特征等信息，不考虑渗透率的随机性，提高了模型的准确性和一致性。张伟斌等[5]基于贝叶斯定理推导出排队长度与联网车辆停车位置的概率关系，结合历史排队数据分析在高斯及非高斯情况下排队长度的置信区间估计，用概率分布偏差来描述排队长度。Zhang 等[6]采用期望最大法，根据交通状况对不同的到达分布进行建模，估计每个周期的到达率，然后根据冲击波理论估计队列末端和初始队列，该方法即使渗透率较低的情况下也可以产生精确的估计。Zhao 等[7]通过利用探测车在队列中的停车位置，建立并求解探测车渗透率的单变量方程，获得探测车辆渗透率，基于渗透率预测总队列长度和总交通量。Yu 等[8]提出了一种基于贝叶斯网络的随机学习方法，在渗透率低的情况下，也能达到相当好的精度。总的来说，现有的大部分基于概率方法估计交叉口排队长度的研究，需要假设车辆的到达分布已知，其实用性受到限制，尤其是在交通高峰时期交叉口出现过饱和的情况下，难以确保其精度及稳定性[9-10]。

另一类是基于车辆轨迹的方法。Liu 等[11]利用最近一个周期内的排队流量过程来解决交叉口排队长度的测量问题，但模型在过饱和状态下会有局限性。姚佼等[12]根据车辆在队列中的不同位置，分别建立了延误最小的最大排队长度估计模型。王爽等[13]提出了基于交通流历史时间序列的自相关分析，采用不同算法进行多输入步长的交通流预测。Rameazni 等[14]利用车辆轨迹数据通过对排队过程和消散过程拟合，绘制排队轮廓曲线，达到排队长度估计的目的。王志建等[15]提出通过浮动车轨迹数据来估计信号交叉口的排队长度，在早晚高峰及平峰流量及不同渗透率的情况下估计排队长度。Li 等[16]通过对驾驶员进入交叉口前的行驶状态分析，将排队过程分成几个阶段，在前人的基础上提高了加入排队点和离开排队点的估计精准度，实现了排队长度更精准地估计。Tan 等[17]，羊钊等[18]通过交通冲击波理论分析排队的形成及消散过程，提出了一种最大广义排队长度估算模型。Yang 等[19-20]通过分析高精度车辆的车辆轨迹，提出一种基于阈值的临界点提取算法，确定车辆停车和启动的临界点，结合交通波理论计算车辆排队长度和延误。Osman 等[21]提出了一种基于冲击波的逐周期估计最大队列长度和初始队列的算法，定义了队列形成覆盖指数，并证明该指数对队列长度估计精度有显著影响，但没有考虑交叉口车辆溢出回流情况下的排队估计。Cai 等[22]融合点传感器和移动传感器观测到的探测车行驶轨迹，提出了基于交通冲击波理论的最大队列长度估计模型，该模型在交叉口欠饱和及过饱和的情况下均保证一定精度。Comert 等[23]提出了一种从配备距离测量传感器的连接车辆估计队列长度的方法，该方法适用于欠饱和及过饱和情况。然而，大多数研究未能充分考虑初始排队对周期排队长度估计的影响。基于上述问题，提出了一种基于冲击波理论的网联车车辆轨迹估计过饱和交叉口排队长度的方法。

1 问题描述与模型假设

1.1 问题描述

当城市交叉口出现交通过饱和状态时,车辆可能在进入交叉口后不能在一个绿灯周期时间内驶离交叉口而进行二次甚至多次排队。图1表现了在交通不饱和的情况下车辆到达交叉口的分布,网联车1和网联车2均在一个信号周期到达交叉口;而在图2中,在过饱和情况下,车辆进行多次排队,在道路队列中的车辆可能来自多个信号周期。出现过饱和情况时,周期开始时就可能存在车辆排队且车辆的到达分布及轨迹均与不饱和状态时不同。因此,对于不饱和状态交叉口的排队长度估计方法在过饱和情况将不再适用。针对这一问题,本研究的主要目标是解决过饱和信号交叉口逐周期的初始队列长度和最大排队长度估计问题。即通过对每个网联车车辆轨迹进行分析,识别出车辆行驶的临界点,运用交通冲击波理论对过饱和信号控制交叉口的初始队列长度和最大排队长度的估计进行了研究分析。

为了简化讨论,模型作出以下假设:

1) 已知给定交叉口的信号配时;

2) 一个周期中至少存在一辆网联车车辆轨迹,确保模型可用;

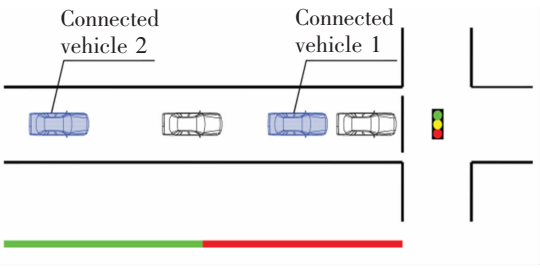


图1 欠饱和情况下车辆分布

Fig.1 Distribution of vehicles under unsaturated conditions

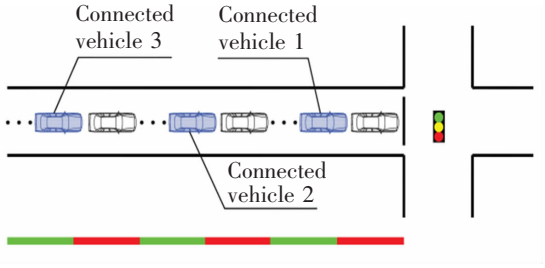


图2 过饱和情况下车辆分布

Fig.2 Distribution of vehicles under oversaturation conditions

3) 除在排队状态下,所有车辆都以自由流速度行驶;

4) 若周期存在初始队列,则同一个阶段内交通冲击波波速 u_2 与 u_4 相等;

5) 本研究仅以南北向直行车流进行实验,且不考虑车辆换道影响。

1.2 交通冲击波分析

在交叉口流量过饱和时,由于信号控制引起的车辆行驶状态变化,车辆排队经历"形成—消散—未完全消散—形成初始排队"过程,从而信号交叉口会产生多股交通冲击波。一般来说,可以用以下4个阶段来解释过饱和情况下车辆排队过程。

1) 第1阶段。当红灯起亮时,即周期开始时,到达车辆被迫停止。因此,到达车辆和停止车辆之间形成排队累积冲击波 w_1,向交叉口上游传播。因此,在这一阶段,排队正在增加。

2) 第2阶段。在绿灯起亮时,排队的车辆开始以饱和流率排放,从而引发排队消散冲击波 w_2,其从排队的头部开始,并向交叉口的上游移动,冲击波 w_2 的传播速度通常比 w_1 快。

3)第3阶段。一旦 w_1 和 w_2 相遇,就会形成一个向停车线移动的排队压缩冲击波 w_3。由于在过饱和情况下该周期结束时仍存在排队车辆,w_3 不能到达停车线。

4) 第4阶段。过饱和条件下,周期结束时存在初始队列,生成初始队列形成波 w_4,向上游移动,直到其与 w_3 相遇,之后形成下一个周期的新排队波。

图3说明了过饱和条件下的冲击波传播过程。图3中 L_{min} 为初始队列长度,L_{max} 为最大排队长度,

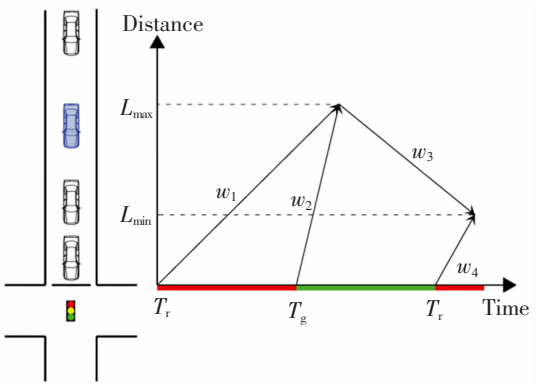


图3 冲击波产生原理及传播过程

Fig.3 Shock wave generation principle and propagation process

T_r 为红灯起亮时刻，T_g 绿灯启亮时刻。排队累积冲击波和排队消散冲击波的速度可通过以下函数计算

$$\begin{cases} u_1=\dfrac{0-q_a}{k_j-k_a} \\ u_2=\dfrac{q_s-0}{k_s-k_j} \\ u_3=\dfrac{q_s-q_a}{k_s-k_a} \\ u_4=u_2 \end{cases} \tag{1}$$

式中：q_a 为到达率；k_a 为到达密度；q_s 为饱和流率；k_s 为相应的密度；k_j 为堵塞密度；u_1,u_2,u_3,u_4 分别表示交通冲击波 w_1,w_2,w_3,w_4 的波速。

2　到达率分析

2.1　到达过程分析

为了利用所有排队的网联车轨迹，让 U_i 表示在一个周期内从每个停止的网联车轨迹中提取的信息

$$U_i=\{t_{a(i)},t_{s(i)},t_{o(i)},t_{d(i)},l_i,N_a,N_e\},i=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

式中：$t_{a(i)}$为第 i 辆网联车到达的时刻；$t_{s(i)}$为第 i 辆网联车停止的时刻；$t_{o(i)}$为第 i 辆网联车开始启动的时刻；$t_{d(i)}$为第 i 辆网联车驶离停车线的时刻；l_i 为第 i 辆网联车从停车线到其停车位置之间的距离；N_a 为周期内到达交叉口的网联车车辆数；N_e 为周期内驶离交叉口的网联车车辆数。

交叉口在过饱和条件下运行，由于上一个周期中排队的车辆无法完全排出，因此在当前周期红灯起亮时可能会出现初始排队，此时初始排队中的网联车车辆在驶离交叉口前会出现二次排队的轨迹。如图 4 所示，网联车在第 $n-1$ 个周期进入排队，并且在第 n 个周期开始时属于初始排队。即一次排队车辆轨迹和二次排队车辆轨迹可以通过排队的网联车是否在第 $n-1$ 个周期结束时驶离交叉口来判断，如果网联车在第 $n-1$ 个周期结束时仍处于排队状态并且没有驶离，则在网联车驶离交叉口之前，将会经历二次排队。

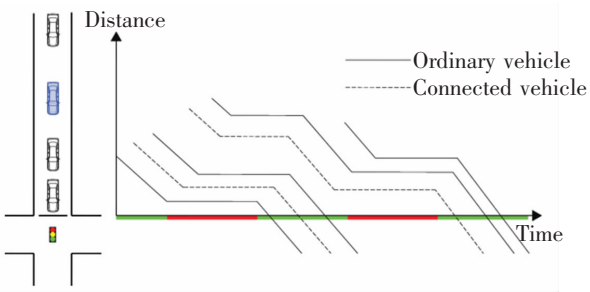


图 4　过饱和交叉口车辆轨迹

Fig.4　Vehicle trajectory at oversaturated intersections

2.2　到达率估计

根据一个信号周期内观测到的网联车车辆轨迹，可以分为仅观测到一辆网联车车辆轨迹和观测到多辆网联车车辆轨迹，并分别对其到达率进行估计。

当周期中观察到的轨迹数据中只有一辆网联车轨迹时，可以使用其停车位置到停车线之间的距离 l_i 来估计该网联车车前排队的车辆数量 N^n。为了仅考虑在当前信号周期内到达的车辆，需减去周期开始时存在的初始队列中的车辆数 N_l^n。

$$N^n=\left(\frac{q_i}{h_j}+1\right)-N_l^n \tag{3}$$

式中：N^n 为第 n 个信号周期期间网联车前排队的车辆数；N_l^n 为第 n 个周期初始队列中的车辆数量。在计算出 N^n 后，则可通过(4)式计算到达率

$$q_a=\frac{N^n}{T_{a(i)}} \tag{4}$$

式中：$T_{a(i)}$为初始队列完全形成的时刻到第 i 辆网联车的停车时间 $t_{s(i)}$之间的时间差；h_j 为饱和间距。其中 $T_{a(i)}$计算式如下

$$T_{a(i)}=(t_{s(i)}-T_r^n)-\frac{N_l^n h_j}{u_4^{n-1}} \tag{5}$$

式中：u_4^{n-1} 为第 n 个周期的初始队列形成速度；T_r^n 为第 n 个周期的红灯起亮时刻。

如果在信号周期内观测到多辆网联车车辆轨迹图 5，则将其到达率计算为第 i 辆网联车与第 $i+1$ 辆网联车之间到达率的平均值，如式(6)所示。

$$q_a=\frac{\sum_{i=1}^{N_a}\left[\dfrac{(l_{i+1}-l_i)/h_j}{T_{a(i+1)}-T_{a(i)}}\right]}{N_a-1} \tag{6}$$

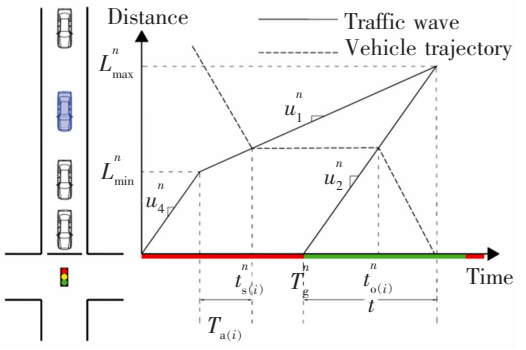


图 5　排队过程示意图

Fig.5　Schematic diagram of the queuing process

式中：N_a为一个周期中网联车的车辆数。

通过上述得到到达率后，则使用基本交通流关系来计算相关的交通密度

$$k_a=\frac{q_a}{v_f} \tag{7}$$

2.3 饱和流率估计

根据网联车是在信号周期期间驶离信号交叉口还是作为下一周期初始队列分情况计算饱和流率q_s。如果网联车在信号周期内未驶离交叉口并进行了二次排队，则参考HCM2000假设此时饱和流率为1 800 pcu[21]；如果网联车在信号周期内驶离交叉口，则使用网联车驶离交叉口的轨迹信息估计信号周期绿灯时间内驶离交叉口的车辆总数，此时q_s可计算为

$$q_s=\frac{N_l}{t_{d(i)}-T_g^n} \tag{8}$$

式中：N_l为网联车前方驶离停车线的车辆数量，$N_l=N^n+N_l^n$；$t_{d(i)}$为第n个周期第i辆网联车驶离停车线的时间；T_g^n第n个周期绿灯起亮的时间。

如果在信号周期绿灯时间内有多辆网联车驶离交叉口，此时q_s计算为第i辆网联车和第i+1辆网联车饱和流率的平均值。

$$q_s=\frac{\sum_{i=1}^{N_e}\left[\frac{(l_{i+1}-l_i)/h_j}{t_{d(i+1)}-t_{d(i)}}\right]}{N_e-1} \tag{9}$$

式中：N_e为一个周期内驶离交叉口的网联车车辆数。

3 排队长度估计

3.1 初始队列长度估计

为了估计初始队列长度，需要结合上一信号周期的最大排队长度和网联车轨迹。根据当前信号周期和上一信号周期的网联车轨迹类型，可以使用不同的方法估计初始队列长度。

如果在信号周期中只观测到一次排队的网联车轨迹而未观测到二次排队的网联车轨迹，如图6所示，在这种情况下需先判断当前信号周期是否存在初始队列。

根据信号周期第一辆一次排队网联车的轨迹数据，首先计算从初始队列长度末端到第一辆一次排队网联车排队位置l_1之间的距离d_m，并与l_1进行比较。基于图6的几何形状，距离d_m通过以下公式计算

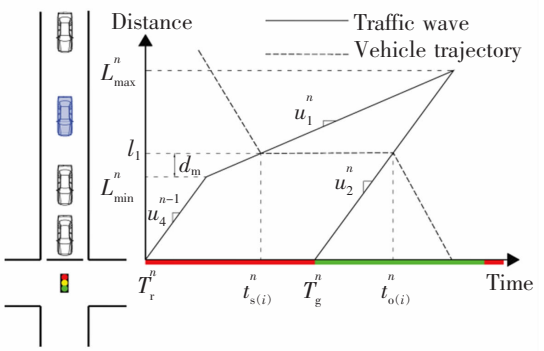


图6 周期只存在一次排队的网联车

Fig.6 Only one-time queuing of connected vehicles in the cycle

$$d_m=\frac{T_g^n-T_r^n+\frac{l_1}{u_2^n}-(t_{o(i)}^n-t_{s(i)}^n)-\frac{l_1}{u_4^{n-1}}}{\frac{1}{u_1^n}-\frac{1}{u_4^{n-1}}} \tag{10}$$

式中：l_1周期第一辆一次排队网联车停车位置d_m与l_1停车线之间的距离。将距离d_m与l_1进行比较，如果$d_m=l_1$，则判断初始队列不存在；否则该信号周期中存在初始队列且其值L_{min}^n计算为l_1和d_m之间的差值

$$L_{min}^n=l_1-d_m \tag{11}$$

如果观测到两辆及以上网联车在信号周期内到达，则到达率通过式(6)估计计算；当信号周期只观测到一辆网联车到达轨迹时，此时计算到达率应先计算初始队列中的车辆数量N_l^n，如式(4)所示。然而，在式(10)中，u_1^n要求已知到达率，这意味着u_1^n及N_1^n在计算中相互依赖。对于该特定的情况，基于图6中的冲击波三角形计算u_1^n作为d_m的函数，以求解两个方程并估计两个参数。这在数学上表示为

$$u_1^n=\frac{d_m}{t_{s(i)}^n-T_r^n-\frac{l_i-d_m}{u_4^{n-1}}} \tag{12}$$

如果在信号周期中观测到二次排队的网联车车辆轨迹时，说明此周期中存在初始排队，如图7所示。这种情况下初始队列长度L_{min}^n可以基于上一周期绿灯时间内驶离交叉口的车辆数量N_d^{n-1}进行估计。其中N_d^{n-1}可通过以下公式计算

$$N_d^{n-1}=q_s(T_r^n-T_g^{n-1}) \tag{13}$$

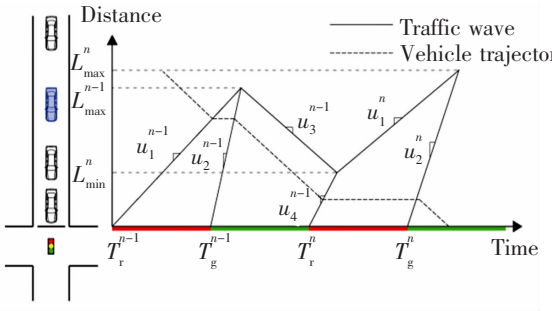


图 7　周期存在二次排队的网联车

Fig.7　Twice queuing of connected vehicles in the cycle

式中：N_{d}^{n-1} 为第 $n-1$ 个周期驶离交叉口的车辆数；T_{r}^{n} 第 n 个周期红灯起亮时间；T_{g}^{n-1} 为第 $n-1$ 个周期绿灯起亮时间。

然后计算上一周期到达的网联车车辆数 N_{a}^{n-1} 与上一周期中驶离交叉口的网联车数量 N_{e}^{n-1} 之间的差值。如果 $N_{\mathrm{a}}^{n-1}=N_{\mathrm{e}}^{n-1}$，说明在信号周期期间到达并在排队等待的所有网联车车辆均驶离信号交叉口。在这种情况下，将 N_{d}^{n-1} 与队列中的车辆总数 N_{q}^{n-1} 进行比较。N_{d}^{n-1}，N_{q}^{n-1} 这意味着在周期结束时所有车辆均驶离交叉口。否则，所形成的下一周期初始队列中的车辆数量 N_{I}^{n} 通过以下公式计算

$$N_{\mathrm{I}}^{n}=N_{\mathrm{q}}^{n-1}-N_{\mathrm{d}}^{n-1} \tag{14}$$

式中：N_{q}^{n-1} 为第 $n-1$ 个周期队列中的车辆数量，其中 $N_{\mathrm{q}}^{n-1}=\dfrac{L_{\max}^{n-1}}{h_j}+1$。

如果 $N_{\mathrm{a}}^{n-1}>N_{\mathrm{e}}^{n-1}$，这意味着上一周期内并非所有网联车车辆都能在绿灯时间结束前驶离交叉口，其中一部分网联车车辆必须等待下一个信号周期，形成下一周期的初始队列。在这种情况下，确定上个周期初始队列中的第一个网联车并标记为 x，则初始队列中网联车 x 前的车辆总数 n_x 可计算为

$$n_x=\frac{l_x}{h_j} \tag{15}$$

式中：l_x 为网联车车辆 x 停车位置与停车线之间的距离。如果 $n_x>N_{\mathrm{d}}^{n-1}$，则使用式(14)计算初始队列车辆数；如果 $n_x\leqslant N_{\mathrm{d}}^{n-1}$，此时初始队列内的车辆数量 N_l^n 计算为

$$N_{\mathrm{I}}^{n}=N_{\mathrm{d}}^{n-1}-n_x \tag{16}$$

然后初始队列长度可以计算为

$$L_{\min}^{n}=N_{\mathrm{I}}^{n}h_j \tag{17}$$

当交叉口下游车辆发生溢出回流时，由于回流堵塞，在信号绿灯期间不会出现车辆流出，在这种极端情况下，应首先利用网联车轨迹检测溢出的发生。如图 8 所示，部分车辆在周期 1 和周期 2 驶入交叉口，在进行排队后一直保持静止状态，直到周期 3 启动并驶离交叉口，因此可以相应地检测到周期 1 和周期 2 期间下游发生的溢出情况。

如图 9 所示，对于溢出回流信号周期期间的初始队列长度估计，由于没有车辆离开，可通过以下公式进行计算

$$L_{\min}^{n}=L_{\max}^{n-1} \tag{18}$$

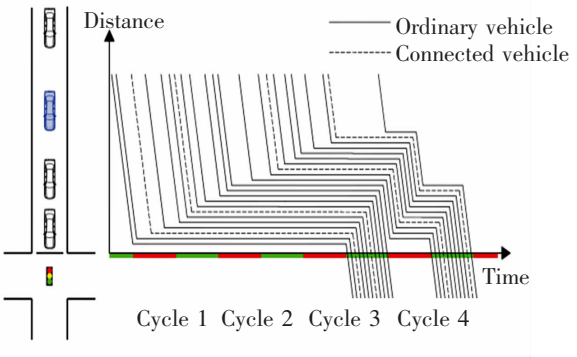


图 8　溢出回流期间的车辆轨迹

Fig.8　Vehicle trajectory during spillback cycles

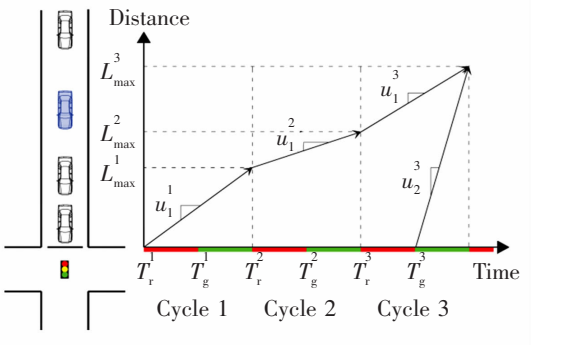


图 9　溢出回流期间交通冲击波示意图

Fig.9　Schematic diagram of a traffic shock wave during spillback cycles

3.2　最大排队长度估计

若信号周期中存在初始队列，如图 5 所示，则使用下式来估计周期结束时的队列长度，最大排队长度 $L_{\min}^{n}$ 估计为

$$L_{\max}^{n}=l_i+u_2^{n}[t-(t_{o(i)}^{n}-T_g^{n})] \tag{19}$$

式中：t 表示从绿色起亮时刻到队列达到最大长度时的时间。时间 t 计算为

$$t=\frac{u_1^{n}\left(T_g^{n}-T_r^{n}-\frac{L_{\min}^{n}}{u_4^{n-1}}\right)}{u_2^{n}-u_1^{n}} \tag{20}$$

对于溢出回流信号周期期间的最大排队长度估计，如图 9 所示，由于没有车辆离开，排队消散冲击波的速度等于 0，而排队累积冲击波一直传播到信号周期结束。在这种情况下，可通过以下公式估算溢出周期的最大排队长度

$$L_{\max}^{n}=u_1^{n}(T_r^{n+1}-T_r^{n})+L_{\min}^{n} \tag{21}$$

4 实验分析

4.1 场景设置

仿真案例以南昌市八一大道——中山路交叉口为背景建立 SUMO 微观仿真模型，研究对象为北进口的 3 条直行车道，如图 10 所示。信号配时采用定时控制，周期时长为 134 s，有效绿灯时间为 70 s。为了还原真实的交通场景，仿真模型利用实地调查采集的交通流量、转向比例等数据进行标定，数据

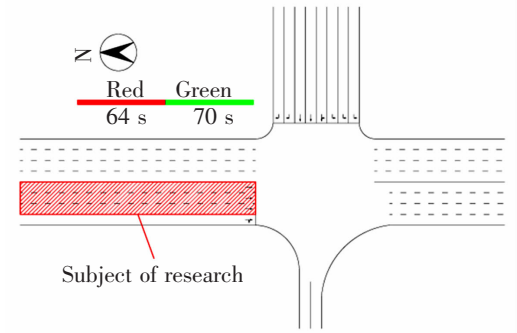


图 10 仿真交叉口结构设计

Fig.10 Design of intersection structure simulating

采集时间为 2017 年 5 月 8 日 17:00—19:00 的交通高峰时段。

将调查的交通数据输入到 SUMO 已建立好的目标交叉口仿真环境，按照每 5 min 时间间隔对排队长度输出结果误差作校验，评价仿真交叉口建立的合理性。选取交叉口北进口道 17:30—17:35 仿真输出的排队长度与实测排队长度进行对比分析，分析结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出，交叉口排队长度仿真值与实测值十分接近，且交叉口排队长度实测值均是以 5 m 为最小度量进行采集和统计的，且道路交通流本身存在很大的随机性，所以仿真模型整体应用导致的误差可以接受。

表 1 高峰小时交叉口实测与仿真排队长度

Tab.1 Peak hour intersection measurement and simulation queue length m

Data	1	2	3	4
Measured data	75	105	130	85
Simulation data	78	103	131	86

为了进一步测试方法对不同参数的灵敏度，以实地调查的流量数据为依据，通过增大输入流量生成饱和度(v/c)为 0.8 和 1.0 的场景(v 为实际交通流量，c 为道路通行能力)；网联车渗透率设置为 5%、10%、15%、20%、30%、40%及 50%。在仿真实验中，仿真时长为 3 600 s，包括 300 s 预热时间及 3 000 s 有效时间。此外，为模拟车联网环境，仿真环境中每辆车都可实时获取位置、速度等信息，当周期内没有网联车车辆时，则随机抽取一辆车作为网联车，即使用其轨迹信息作为排队长度估计输入。此外，仿真设定车辆平均停车车头间距取 7 m。

4.2 性能指标

为了评估排队长度的估计精度，选取平均绝对误差值(mean absolute error，MAE)和平均相对百分误差值(mean absolute percentage error，MAPE)作为评价指标，计算如下

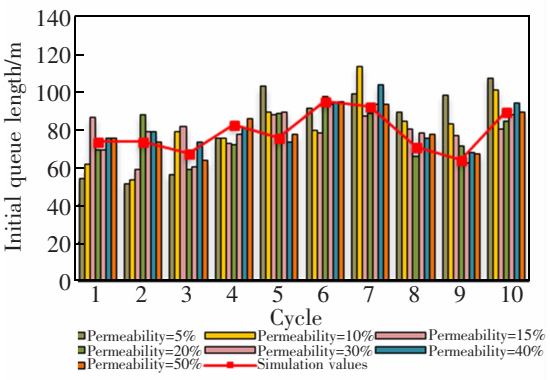
$$L_{\text{MAE}}=\frac{1}{Y}\sum_{i=1}^{Y}|\hat{L}_i-L_i| \tag{22}$$

$$L_{\text{MAPE}}=\frac{1}{Y}\sum_{i=1}^{Y}\left|\frac{\hat{L}_i-L_i}{L_i}\right| \tag{23}$$

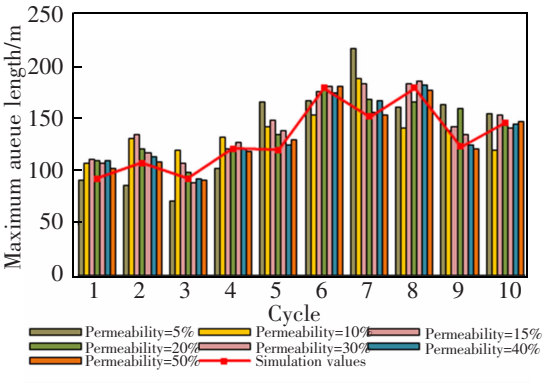
式中：L_i 第 i 个周期的真实排队长度；$\hat{L}_i$ 为相应的估计值；Y 为评估的周期数；L_{MAE}、L_{MAPE} 分别表示 MAE、MAPE 的计算参数。

4.3 仿真结果与分析

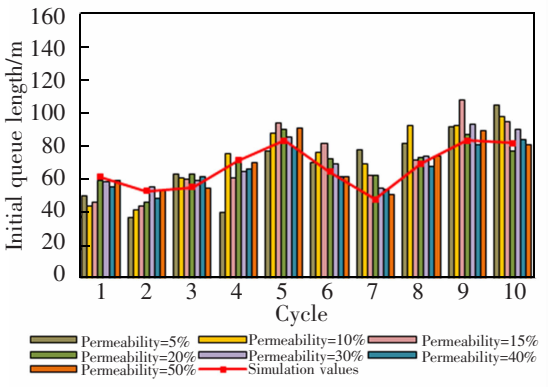
通过仿真实验数据，获得交叉口各个周期的排队长度数据；同时，采用所提出模型对排队长度进行估计。在不同渗透率和交叉口饱和度(v/c)情况下，交叉口的排队长度估计值与仿真值的对比结果如图 11 所示。



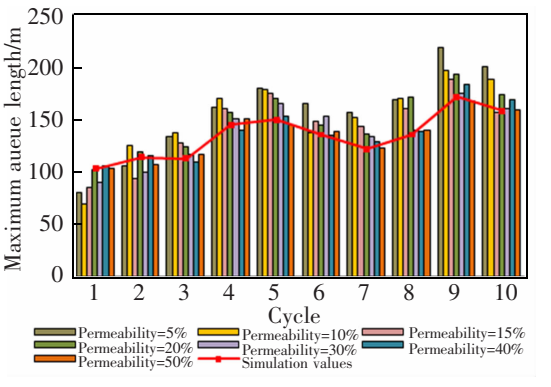
（a）Comparison of th e estimated initial queue length and the simulated value when v/c=0.8



（b）Comparison of the estimated maximum queue length and the simulated value when v/c=0.8



（c）Comparison of the es timated initial queue length and the simulated value when v/c=1



（d）Comparison of the estimated maximum queue length and the simulated value when v/c=1

图 11　不同饱和度及渗透率下排队长度估计值及仿真值对比

Fig.11　Comparison of queue length estimation and simulation value under different saturation and permeability

为更好地评估模型性能，计算所有仿真实验结果的评价指标。不同场景下的仿真实验结果的 I_{MAE}、I_{MAPE} 及平均值如表 2、表 3 所示。在 20%渗透率下，当 v/c=0.8 时，初始队列长度和最大排队长度的 I_{MAE} 值分别为 7.35 m 和 12.18 m，I_{MAPE} 值分别为 9.79%和 10.01%；当 v/c=1.0 时，初始队列长度和最大排队长度的 I_{MAE} 值分别为 6.28 m 和 15.52 m，I_{MAPE} 值均在 10%左右。在 10%渗透率下，当 v/c=0.8 时，初始队列长度和最大排队长度的 I_{MAE} 值分别为 14.54 m 和 24.10 m；当 v/c=1.0 时，初始队列长度和最大排队长度的 I_{MAE} 值分别为 13.30 m 和 26.06 m，I_{MAPE} 值均不超过 20%。在 50%渗透率下，当 v/c=0.8 时，初始队列长度和最大排队长度的 I_{MAE} 值分别为 2.46 m 和 3.43 m，I_{MAPE} 值均不超过 4%；当 v/c=1.0 时，初始队列长度和最大排队长度的 I_{MAE} 值分别为 3.01 m 和 2.81 m，I_{MAPE} 值分别为 4.03%和 2.81%。可知，在网联车车辆渗透率相同的情况下，随着饱和度的增加，模型的估计误差略微增大。

在网联车渗透率不低于 20%的情况下，当 v/c=0.8 时，初始队列长度 I_{MAE} 值小于 7.5 m，I_{MAPE} 值小于 10%，最大排队长度的 MAE 值小于 12.5 m，I_{MAPE} 值小于 10.5%；当 v/c=1.0 时，初始队列长度 MAE 值小于 6.5 m，MAPE 值小于 10%，最大排队长度的 I_{MAE} 值小于 16.0 m，I_{MAPE} 值小于 11.0%。结果表明，在交叉口处于过饱和的情况下，模型依旧能够获得较好的估计结果。不同饱和度及渗透率的估计误差如图12，图 13 所示。

由图 12 可知，随着渗透率增加，初始队列长度估计误差指标均逐渐减小；在渗透率达到 20%时，2个误差指标均有明显的下降。当渗透率为 10%时，即可保证 I_{MAPE} 小于 20%。由图 13 可知，在渗透率达到 15%时，最大排队长度 2 个误差指标有明显的下降，且可确保 I_{MAPE} 在 20%以内，说明模型在渗透率较低时仍有较好的估计效果。

表2 不同渗透率下初始队列长度估计性能

Tab.2 Estimated performance of initial queue length with different permeability

Performance metrics	v/c	Permeability						
		5%	10%	15%	20%	30%	40%	50%
I_{MAE}/m	0.8	16.86	14.54	11.55	7.35	4.86	4.35	2.46
	1.0	16.02	13.30	12.95	6.28	5.48	4.37	3.01
	Average	16.44	13.92	12.25	6.82	5.17	4.36	2.74
I_{MAPE}/%	0.8	22.91	18.89	15.17	9.79	6.51	5.62	3.37
	1.0	23.75	19.79	18.24	9.70	7.69	6.63	4.03
	Average	23.33	19.34	16.71	9.75	7.10	6.13	3.70

表3 不同渗透率下最大排队长度估计性能

Tab.3 Maximum queue length estimation performance with different permeability

Performance metrics	v/c	Permeability						
		5%	10%	15%	20%	30%	40%	50%
I_{MAE}/m	0.8	25.42	24.10	15.41	12.18	8.38	5.44	3.43
	1.0	30.10	26.06	18.07	15.52	9.99	5.22	3.85
	Average	27.76	25.08	16.74	13.85	9.19	5.33	3.64
I_{MAPE}/%	0.8	19.71	18.50	12.99	10.01	7.06	4.48	2.96
	1.0	21.03	18.91	13.30	10.66	7.49	3.53	2.81
	Average	20.37	18.71	13.15	10.34	7.28	4.01	2.89

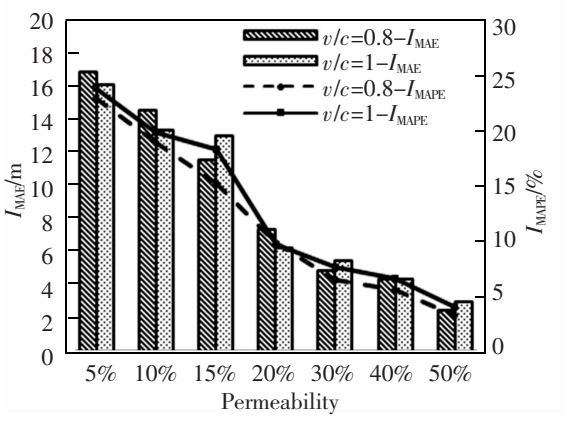


图12 不同饱和度及渗透率下初始队列长度的估计误差

Fig.12 Estimation error of initial queue length with different saturations and permeability

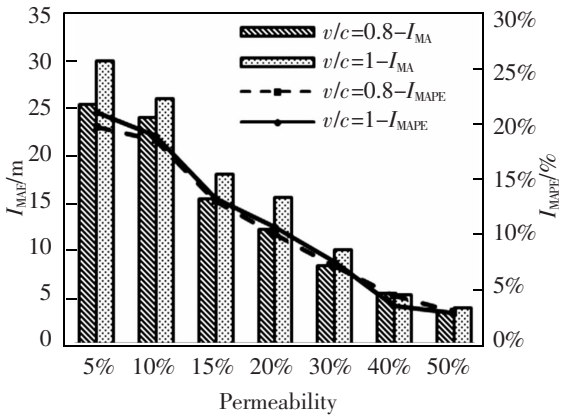


图13 不同饱和度及渗透率下最大排队长度的估计误差

Fig.13 Estimation error of the maximum queue length with different saturations and permeability

5 结论

基于网联车车辆轨迹提出了逐周期的过饱和交叉口排队长度估计方法。首先根据网联车车辆轨迹上确定4个临界点,标志着车辆到达和驶离信号交叉口期间的速度和位置变化,利用临界点信息估计到达率、交通密度和饱和流率。然后使用交通冲击波估计每个周期结束时的最大排队长度和下一周期初始队列长度。使用微观模拟器SUMO在不同饱和度及渗透率情况下,对所提算法进行了测试。实验结果表明,该算法具有良好的性能,在交通过饱和的情况下,模型估计的排队长度误差也可以达到理想效果。结论如下。

1)所提出的方法是一种基于周期的初始队列长度及最大排队长度估计方法,这意味着所提出的方法在每个周期结束时估计最大排队长度及下一周期初始队列长度。因此,该算法不是实时的,后期可加强短时预测研究。

2)该方法要求每个周期至少有一辆网联车轨迹数据,在没有网联车的情况下方法不适用。下一

步可以结合历史网联车轨迹数据，完善本方法在无网联车到达条件下的排队估计。

3）该方法不适用于直行和转弯混合车道的排队估计。下一步可以将该方法扩展到混合车道的排队长度估计。

参考文献：

[1] HIRIBARRENG，HERRERA J C. Real time traffic states estimation on arterials based on trajectory data[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2014，69：19–30.

[2] 谈超鹏，姚佳蓉，曹喻旻，等. 基于网联车辆轨迹数据的周期排队长度估计[J]. 中国公路学报，2021，34(7)：140–151.
TAN C P，YAO J R，CAO Y M，et al. Cycle–based queue length estimation based on connected vehicle trajectory data[J]. China Journal of Highway and Transport.2021，34(7)：140–151.

[3] TAN C P，YAO J R，TANG K S，et al. Cycle–based queue length estimation for signalized intersections using sparse vehicle trajectory data[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2021，22(1)：91–106.

[4] 谈超鹏，姚佳蓉，唐克双. 基于抽样车辆轨迹数据的信号控制交叉口排队长度分布估计[J]. 中国公路学报，2021，34(11)：282–295.
TAN C P，YAO J R，TANG K S. Queue length distribution estimation at signalized intersections based on sampled vehicle trajectory data[J]. China Journal of Highway and Transport.2021，34(11)：282–295.

[5] 张伟斌，叶竞宇，白孜帅，等. 基于联网车辆轨迹数据的交叉口排队长度估计方法[J]. 中国公路学报，2022，35(3)：216–225.
ZHANG W B，YE J Y，BAI Z S，et al. Queue length estimation and accuracy assessment method for intersections based on trajectory data[J]. China Journal of Highway and Transport，2022，35(3)：216–225.

[6] ZHANG H，LIU H，CHEN P，et al. Cycle –based end of queue estimation at signalized intersections using low pen etration rate vehicle trajectories[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2020，21(8)：3257–3272.

[7] ZHAO Y，ZHENG J F，WONG W，et al. Various methods for queue length and traffic volume estimation using probe vehicle trajectories[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2019，107：70–91.

[8] YU M，GU W H，CHUNG E，et al. A Bayesian approach for estimating vehicle queue lengths at signalized intersections using probe vehicle data[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2019，109：233–249.

[9] ZHENG J F，LIU H. Estimating traffic volumes for signalized intersections using connected vehicle data[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2017，79：347–362.

[10] ZHAO Y，ZHENG J F，WONG W，et al. Estimation of queue lengths，probe vehicle penetration rates，and traffic volumes at signalized intersections using probe vehicle trajectories[J]. Transportation Research Record：Journal of the Transportation Research Board，2019，109(11)：233–249.

[11] LIU HENRY，WU X K，MA W T，et al. Real–time queue length estimation for congested signalized intersections[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies. 2009，17(4)412–427.

[12] 姚佼，戴亚轩，倪屹聆，等. 基于车辆行驶轨迹的信号交叉口排队长度估计[J]. 公路交通科技，2020，37(5)：123–130.
YAO J，DAI Y X，NI Y L，et al. Estimation of queue length at signalized intersection based on vehicle trajectory[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2020，37(5)：123–130.

[13] 王爽，黄海超，石宝存，等. 基于自相关分析的交通流预测输入步长研究[J]. 华东交通大学学报，2022，39(5)：78–85.
WANG S，HUANG H C，SHI B C，et al. Research on time step of traffic flow prediction based on autocorrelation analysis[J]. Journal of East China Jiaotong University，2022，39(5)：78–85.

[14] RAMEAZNI M，GEROLIMINIS N. Queue profile estimation in congested urban networks with probe data[J]. Computer–aided Civil and Infrastructure Engineering，2015，30(6)：414–432.

[15] 王志建，金晨辉，龙顺忠，等. 基于轨迹数据的信号交叉口排队长度估计[J]. 科学技术与工程，2022，22(21)：9407–9143.
WANG Z J，JIN C H，LONG S Z，et al. Queue length of signal intersection based on trajectory data[J]. Science Technology and Engineering，2022，22(21)：9407–9143.

[16] LI F L，TANG K S，YAO J R，et al. Real –time queue length estimation for signalized intersections using vehicle trajectory data[J]. Transportation Research Record，2017，2623(1)：49–59.

[17] TAN C P，CAO Y M，TANG K S，et al. A tensor decomposition method for cycle–based traffic volume estimation using sampled vehicle trajectories[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies，2020，118：102739.

[18] 羊钊,刘攀,朱仁伟等. 基于冲击波理论的信号交叉口最大广义排队长度计算方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2015,35(S1):154-159.
YANG Z,LIU P,ZHU R W,et al. Estimation of the maximum queue length at signalized intersections based on shockwave theory[J]. Journal of Chang′an University(Natural Science Edition),2015,35(S1):154-159.

[19] YANG C,XIAO Q,JING J,et al. An exploratory shockwave approach to estimating queue length using probe trajectories[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems,2011,16(1):12-23.

[20] YANG C,XIAO Q,JING J,et al. Cycle-by-cycle queue length estimation for signalized intersections using sampled trajectory data[J]. Transportation Research Record,2011,2257(2257):87-94.

[21] OSMAN O A,BAKHIT P R,ISHAK K,et al. Analysis of queue estimation process at signalized intersections under low connected vehicle penetration rates[J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2020,48(10):1398-1408.

[22] CAI Q,WANG Z Y,ZHENG L Y,et al. Shock wave approach for estimating queue length at signalized intersections by fusing data from point and mobile sensors[J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportati on Research Board,2014,2422(9):79-87.

[23] COMERT G,CETIN M. Queue length estimation from connected vehicles with range measurement sensors at traffic signals[J]. Applied Mathematical Modelling,2021,99(2):418-434.



第一作者:刘旭星(1999—),男,硕士研究生,研究方向为交通信息技术。E-mail:2402687617@qq.com。



通信作者:邓明君(1978—),男,副教授,博士,研究方向为交通系统优化、交通信息技术。E-mail:dmstd98@163.com。

(责任编辑:吴海燕)