

# 断面车路通讯环境下的恒速车流运行模型

沈旅欧<sup>1,2</sup>, 姚志洪<sup>1,2</sup>, 马万经<sup>3</sup>, 盛东雪<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 综合交通运输智能化  
国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031; 3. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 从流量角度,在假设车速恒定的基础上建立了车流运行模型,并以该模型预测和实际到达的流量分布之间的最大流量区间变异系数为评价指标,分析了路段上游数据收集断面位置、路段长度、交通流量和不同转向车流对预测效果的影响.与静态匀速模型的对比分析结果表明:数据收集断面位置和路段长度对模型的预测效果影响很小,且不同交通流量和转向车流情况下模型预测存在一定规律性.最后结合实际调查数据,证实了模型的有效性.

**关键词:** 智能交通;车路通讯;前馈控制;变异系数;车流运行模型

**中图分类号:** U491.5

**文献标志码:** A

## Constant Speed Based Traffic Platoon Dispersion Model in Cross-Sectional Vehicle Infrastructure Communication Environment

SHEN Lüou<sup>1,2</sup>, YAO Zhihong<sup>1,2</sup>, MA Wanjing<sup>3</sup>, SHENG Dongxue<sup>1</sup>

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Assuming that the car's speed is constant along the road segment, the traffic platoon dispersion model was developed from the perspective of flow. The parameter of peak range of variation coefficient of the predicted and actual arriving traffic flow distribution was chosen for model evaluation. Besides, the influence of data collector location, link segment length, traffic volume and flow direction on the predicted results was analyzed. Comparing with the static average speed model, the results show that the data collector location and the link segment length have a trivial effect on

the prediction model. The trend of the model performance was summarized for different volume levels and different flow directions. It can be concluded that the proposed model is effective and available for predicting the distribution of traffic flow arriving at downstream intersection based on the simulation experiment and field investigation.

**Key words:** intelligent transportation; vehicle infrastructure communication; feed-forward control; coefficient of variation; traffic platoon dispersion model

信号交叉口的存在,使得城市道路上的连续交通流被分割成一股一股的车流.由于车流中车辆运行条件、特性和驾驶员驾驶行为的不同,各车的行驶速度存在差异,车流在向下游的行驶过程中越拉越长,出现“离散现象”.车流运行模型,一些文献中也称为车队离散模型,在这里指更广泛的一切车流,无论排列紧密与否.通过建立上游交叉口离去流量与下游交叉口到达流量之间的关系,对车流进行预测,从而实现前馈控制,是动态信号控制的理论基础.

车流运行模型的准确性取决于车辆速度或行程时间分布的假设与实际的吻合程度.早在1965年, Pacey<sup>[1]</sup>基于速度服从正态分布提出了车流密度离散模型.随后, Grace等<sup>[2]</sup>在Pacey模型的基础上进一步建立了描述车流密度变化的离散模型.然而,与车流密度变化相比,信号控制与车流流量分布变化的相关性更强.因此, Robertson<sup>[3]</sup>在 Hillier等<sup>[4]</sup>收集的数据基础上,提出了一种基于车辆行程时间服从移位几何分布(后被 Seddon<sup>[5]</sup>证明)的车流流量离散模型(实际应用采用迭代计算).由于迭代计算具有简单的优点,该模型曾被广泛应用于交通网络研究工具(TRANSYT-7F)<sup>[6]</sup>,绿信比、周期、相位差优

收稿日期: 2016-08-23

基金项目: 2015年国家大学生创新创业训练计划(201510613045); 2016省级创新训练项目(2016152)

第一作者: 沈旅欧(1978—),男,副教授,工学博士,主要研究方向为交通信号控制. E-mail: luoshen@home.swjtu.edu.cn

通讯作者: 姚志洪(1991—),男,博士生,主要研究方向为交通信号控制. E-mail: zhyao@my.swjtu.edu.cn

化技术(SCOOT)<sup>[7]</sup>,城市道路网交通分配和仿真工具(SATURN)<sup>[8]</sup>和微观交通仿真工具(TRAFFLO)<sup>[9]</sup>等信号配时优化及控制系统中。Tracz<sup>[10]</sup>和 Polus<sup>[11]</sup>的研究表明,车辆的行程时间并不服从移位几何分布,用正态分布、对数正态分布拟合效果更好。后续的大部分研究主要集中在对Robertson模型的参数校验上<sup>[12]</sup>,并未提出新的理论模型。为了增强模型的准确性,巫威眺等<sup>[13-17]</sup>考虑车辆速度的有界性,采用截断正态分布和截断对数正态分布拟合车辆速度分布,取得了较好的效果。同时考虑异质交通流特别是公交车流量较大的情况下,由于不同车辆类型性能差别较大,行程速度和行程时间分布均体现为双峰型<sup>[18-21]</sup>,简单的分布函数并不能取得良好的拟合效果。为此,文献<sup>[18-22]</sup>提出采用截断混合高斯分布拟合异质交通流的行程车速和行程时间,取得了良好的拟合效果,并据此推导了新的解析模型。以上模型均是基于历史行程速度或行程时间服从某种特定分布假设的。然而,这类模型都属于解析模型,往往存在解析式过于复杂和计算效率不高的缺点,且都属于离线静态模型,不能很好地反映流量的实时变化,因而不利于在动态信号控制中应用。

车路协同技术的发展,给信号控制带来了新的机遇。如何有效利用车路协同技术收集的数据为信号控制服务,是当前研究领域的热点和难点问题之一。在车路协同环境下,可以通过车载装置与路侧设施短程通讯来获取车流信息,如:速度、位置和流量等。断面车路协同是在指定断面安装路侧接收设施,获取指定断面的车流信息。与传统的车路协同技术

相比,断面技术更易于实现。

本文在Vissim微观仿真软件中构建虚拟的车路协同环境,并遵从稀疏布局的原则,仅在交叉口上游靠近出口道位置和下游停车线位置设置数据收集点,收集一定时间窗范围内的车流信息(包括速度、流量、车牌号,而位置则可间接获取),在此基础上建立车流运行模型。同时,考虑到现有模型计算复杂,不利于动态运用,这里采用车辆经过路段上游数据收集点的速度作为其在此路段的平均行程车速,构建了基于恒速的车流运行模型。这一假设将极大地提高计算效率;同时,模型假设每辆车的速度是其通过数据收集点位置的速度,具有实时特性,可以反映交通流的动态变化。

第二部分介绍了在Vissim微观仿真软件中构建的车路协同交通仿真环境;第三部分推导了基于恒速的车流流量运行模型;第四部分具体分析上游不同位置数据收集点、路段长度、交通流量和不同转向流量对模型预测结果的影响;最后将本文模型与静态匀速模型<sup>[23-24]</sup>以及实际车流到达分布进行对比分析,以得出结论。

## 1 仿真环境构建

### 1.1 仿真路网构建

本文在车路协同环境下研究车流运行规律,通过Vissim微观仿真软件构建虚拟的车路协同环境,对所提出模型的预测效果进行测试。构建的道路路网如图1所示。

为了获取车辆的相关数据,在靠近上游交叉口

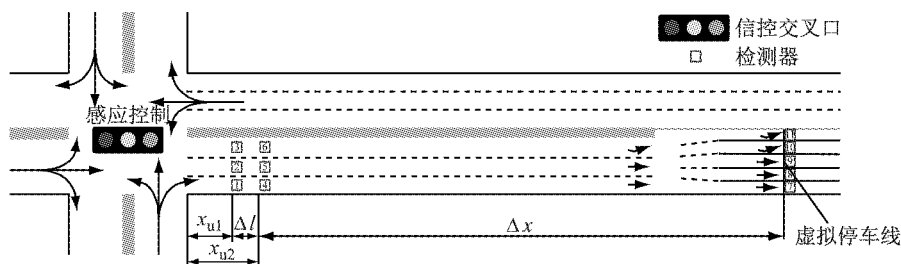


图1 Vissim 仿真软件中车路协同环境模拟

Fig.1 Vehicle infrastructure integration environment in Vissim

出口道位置和下游停车线位置设置数据收集点(模拟车路协同设施)来获取相关车流信息。如图1所示,该路网由一个交叉口和一条路段构成,路段为单向三车道。为了证明本文模型可以适应动态随机变化的交通需求,上游交叉口采用感应控制,且四个方向的均有左转、直行和右转车流。为获取上游交叉口

车辆离去流量分布,在上游交叉口出口道附近设置数据收集点。考虑到在Vissim仿真环境中不能直接设置车路协同感应器,因此采用感应线圈来模拟车路协同感应器。为获取每辆车的速度,在交叉口出口道附近前后相距 $\Delta l$ 处各设置一排数据收集点(1~6),同时也收集车辆编号、经过前后数据收集点的时

间;另外在下游距上游数据收集点  $\Delta x$  处(模拟下游交叉口停车线),设置一排数据收集点(7~11),来获取车辆到达下游交叉口停车线的时间和编号.因在车路协同环境下记录了车辆的编号,所以当车辆通过停车线位置后历史的车辆转向信息也很容易获取,相应地在 Vissim 仿真环境下,可以通过在下游设置转向专用车道来跟踪转向车流.

## 1.2 仿真参数设置

本文仿真采用的软件版本为 Vissim 4.3,仿真精度为 1 s,仿真时长为 1 500 s(有效时间为 900 s,合 15 min).为模拟城市道路交通流,仿真车流中小汽车所占百分比设置为 95%,公交车为 5%.本文研究公交车所占百分比很小的情况,因而整个交通流不会呈现明显的异质现象.其中,公交车期望速度分布为 20~30 km·h<sup>-1</sup>,小汽车期望速度分布为 40~60 km·h<sup>-1</sup>.

# 2 车流运行模型

## 2.1 参数说明

文中相关符号定义见表 1.

表 1 文中相关符号含义

Tab.1 Symbol meaning related to the paper

变量名	含义
$i$	车辆编号,表示第 $i$ 辆车
$x_{u1}$	上游第 1 个数据收集点的位置
$x_{u2}$	上游第 2 个数据收集点的位置
$\Delta l$	上游两个数据收集点之间的距离
$x_d$	下游数据收集点的位置
$\Delta x$	上下游数据收集点之间的距离
$t_{i,u1}$	第 $i$ 辆车经过上游第 1 个数据收集点的时刻
$t_{i,u2}$	第 $i$ 辆车经过上游第 2 个数据收集点的时刻
$t_{i,p}$	第 $i$ 辆车预计经过下游数据收集点的时刻
$t_i$	第 $i$ 辆车的行程时间
$v_i$	第 $i$ 辆车经过上游第 2 个数据收集点的瞬时速度
$q_a(t)$	$t$ 时刻下游实际到达流量
$q_p(t)$	$t$ 时刻下游预测到达流量
$q_{d,a}(j)$	第 $j$ 个时间窗下游实际到达车辆数
$q_{d,p}(j)$	第 $j$ 个时间窗下游预测到达车辆数
$\alpha_{CV}$	最大流量区间变异系数

## 2.2 模型假设

现有信号控制软件应用的车队离散模型主要为 Robertson 模型,该模型是基于上游离去(断面)流量分布来预测下游(交叉口停车线)车辆到达分布.虽然上游车辆离去分布可以根据检测器动态获取,但由于行程速度和行程时间为历史数据,是离线静态的,因此在使用模型时必须根据离线收集的数据来校正模型参数.本文中所构建的为实时车流运行模

型,参数可以实时获取.该模型的构建,需要基于如下假设:车辆经过数据收集点的速度为在该路段的平均行程速度,即保持速度恒定.

假设的合理性是建立在车流处于非饱和状态,这也是本文研究所基于的车流状态条件.在非饱和状态下,车辆运行相互影响较小,不会出现交通拥堵状态,整个行程过程中,车辆速度变化不大,因此可以将该车辆检测的瞬时速度作为行程车速.为测得车辆在上游的速度,在交叉口上游出口道附近设置两个相距  $\Delta l$  的数据收集点.

## 2.3 车流运行模型

若设上游两个数据收集点的位置分别为  $x_{u1}$  和  $x_{u2}$ ,相距  $\Delta l$ ,第  $i$  辆车通过这两个数据收集点的时刻分别为  $t_{i,u1}$  和  $t_{i,u2}$ ,则可计算获得该车辆在  $\Delta l$  内的平均速度.车辆通过上游数据收集点位置的瞬时速度

$$v_i = \frac{x_{u2} - x_{u1}}{t_{i,u2} - t_{i,u1}} \quad (1)$$

设上游第 2 个数据收集点的位置为  $x_{u2}$ ,下游数据收集点的位置为  $x_d$ ,则车辆从上游第 2 个数据收集点到下游数据收集点的运行距离

$$\Delta x = x_d - x_{u2} \quad (2)$$

由式(1)和假设可知,第  $i$  辆车通过上游数据收集点的瞬时速度为  $v_i$ ,同时可得第  $i$  辆车从上游数据收集点到达下游数据收集点的行程时间

$$t_i = \frac{\Delta x}{v_i} \quad (3)$$

因为第  $i$  辆车经过上游第 2 个数据收集点位置的时刻为  $t_{i,u2}$ ,则根据车辆的行程时间可知,该车辆预计到达下游数据收集点位置的时刻为  $t_{i,p}$ ,则有

$$t_{i,p} = t_{i,u2} + t_i \quad (4)$$

因此根据式(2)~(4)可得到车辆到达下游数据收集点位置的时刻

$$t_{i,p} = t_{i,u2} + \frac{x_d - x_{u2}}{x_{u2} - x_{u1}} (t_{i,u2} - t_{i,u1}) \quad (5)$$

根据式(5)可知,第  $i$  辆车将在时刻  $t_{i,p}$  到达下游,即下游该时刻的流量会累计加 1,可表示为

$$q_p(\lfloor t_{i,p} + 0.5 \rfloor) = q_p(\lfloor t_{i,p} + 0.5 \rfloor) + 1, \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (6)$$

式中: $\lfloor X + 0.5 \rfloor$ 为对  $X$  采用四舍五入的方法取整; $q_p(Y)$ 为下游  $Y$  时刻预测到达的流量分布,仿真初始时为零.

## 2.4 模型性能评价

### 2.4.1 评价指标选取方法

为验证模型的合理性,应选取合适的评价指标.

考虑到上游每个离去车辆,在下游都有唯一的对应到达车辆.假设 20 s 内的上游离去车流中有 9 辆车,这 9 辆车实际到达下游存在一个实际到达时间区间,但该区间与模型预测得到的理论时间区间几乎是不可能重合的,存在公共及单独的区域,而传统的评价指标无法解决这种问题.针对这样的情况,本文提出最大流量区间变异系数的概念.该指标的计算首先找到这两个区间的并集区间.若实际到达区间、预测区间没有流量,则以零补齐;在此基础上对两个流量分布在时间轴上进行叠加,然后设定一定长度的时间区间进行滑动,找出总流量最大的时间区间.在该区间上计算均方误差,但考虑到均方误差受到数值大小的影响(一般原始数值越小,均方误差计算结果越小;原始数值越大,均方误差也越大),将计算的均方误差除以该区间上的数值均值,这样获得的评价指标将不再受数值大小的影响,且不具有任何量纲,因此该指标的计算公式与变异系数计算公式类似.同时考虑到变异系数可以评价两个分布之间的差异程度,所以将该评价指标称为最大流量区间变异系数.

#### 2.4.2 最大流量区间变异系数

在评价指标计算过程中,合理地设置单位时间区间长度既能体现模型预测效果,又能使计算的评价指标更为合理.经过试验,本文选取 5 s 为单位时间长度(太小则车辆数很小,离散性太大),然后根据 2.4.1 节的定义,可以得到最大流量区间变异系数

$$\alpha_{CV} = \frac{\sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=k}^{k+L} (q_{d,a}(j) - q_{d,p}(j))^2}}{\frac{1}{2L} \sum_{i=k}^{k+L} (q_{d,a}(j) + q_{d,p}(j))} \quad (7)$$

式中: $k$  为最大流量区间对应的区间起点; $k+L$  为最大流量对应的区间终点; $L$  为取最大流量对应区间的长度.

### 3 实例分析

为验证本文模型,在 Vissim 仿真软件中获取仿真数据,通过改变 Vissim 路网中的相关参数,探讨模型在不同参数下的预测效果.同时,以最大流量区间变异系数为评价指标,将本文模型与静态模型<sup>[23-24]</sup>(该模型假设车辆的速度为路段的平均速度,进而计算获得车辆到达交叉口的时间)进行对比分析.

#### 3.1 数据获取

按照 1.2 节设置好仿真参数后,运行仿真获取数据.整理后可得上下游数据收集点的数据如表 2 所示.

表 2 数据收集点数据

Tab.2 Collected data at upstream point	
车辆编号	车辆通过对应数据收集点的时长/s
4	37.44
11	123.25
⋮	⋮
3 479	1 471.19

通过表 2 可以计算得到车辆在不同时刻通过上游数据收集点时的速度,即  $v_i$ . 同时也可通过数据收集点编号获得下游车流(含不同转向)实际到达流量分布.

#### 3.2 数据分析

通过对仿真数据处理可获得下游实际到达流量分布,同时根据本文模型可计算获得预测到达流量分布,然后根据式(7)计算得到最大流量区间变异系数.下面将首先探讨上游数据收集点位置、路段长度和交通流量对本文模型预测效果的影响.同时,考虑到该模型将应用于信号配时优化,所以最后将讨论在车路协同条件下不同转向的预测效果,并与静态模型进行对比分析.

##### 3.2.1 上游数据收集点的位置

在路段长度为 800 m 的情况下,研究了上游数据收集点设置位置对模型预测效果的影响,此处上游数据收集点设置距离  $x_{ul}$  分别为 10、20、30、40、50、60 m,绘制不同距离条件下本文模型和静态模型的最大流量区间变异系数图,如图 2a 所示,同时得到静态模型、本文模型和实际到达流量分布图.考虑到 15 min 流量分布图较为密集,不好辨认,文中绘制了 300 s 数据(鉴于 1 s 时间区间车辆数目非常小,离散度很大,不利于比较和把握趋势,这里时间区间粒度取 5 s,后文其他图像也将作类似处理)预测结果对比图,具体如图 2b 所示.

从图 2 中看出,在上游数据收集点位置变化时,本文模型与实际流量分布趋势大体相同,这说明上游数据收集点位置对模型预测结果的影响很小.同时可以发现,上游数据点位置较大时,变异系数有减小的趋势,这是因为检测距离越远,车流越稳定,此时检测的车速更接近车辆的行程车速.另外,不管收集点位置怎么变化,本文模型均优于静态模型,平均误差减少 40.78%.

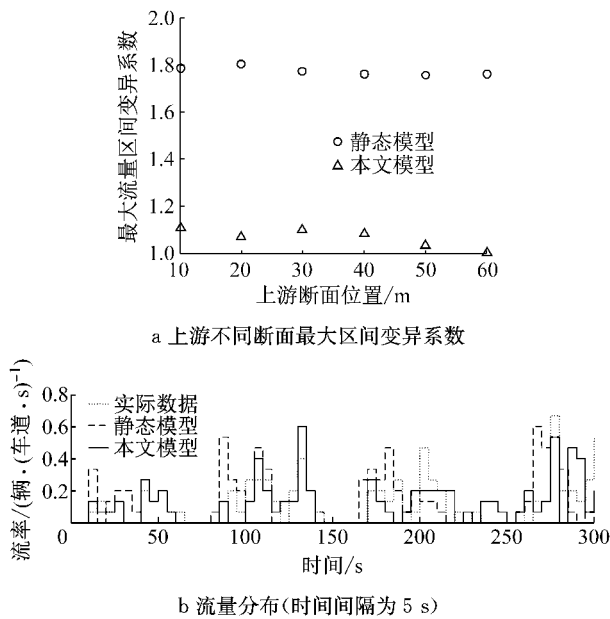


图2 上游断面不同位置条件下模型效果

Fig.2 Performance of models for different locations at upstream section

### 3.2.2 路段长度

在上游数据收集点固定的情况下(分别设为 40 m 和 43 m),研究路段长度对模型预测误差的影响. 路段长度分别设置为 250、300、400、500、750、1 000、1 250、1 500 m,分别绘制静态模型、本文模型和实际到达流量分布图和最大流量区间变异系数图,如图 3 所示.

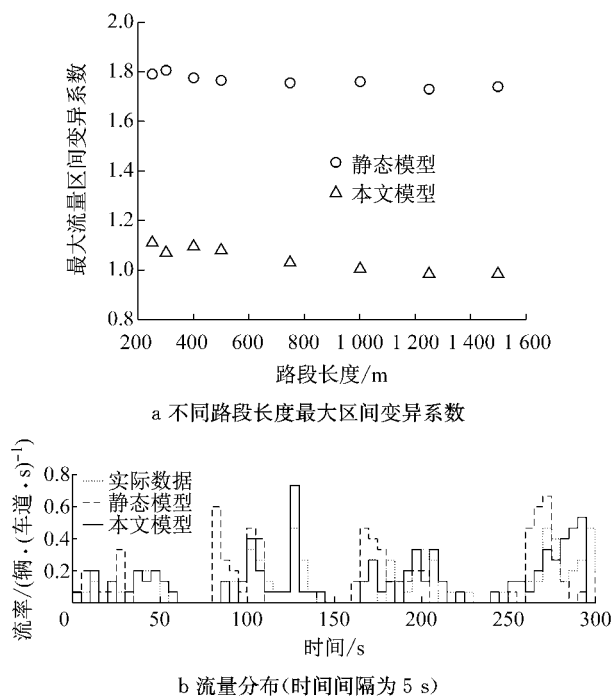


图3 不同路段长度下模型效果

Fig.3 Performance of models for different lengths of road segment

从图 3 中看出,当路段长度发生变化时,静态模型和本文模型与实际流量分布虽不完全重合却有相似的规律,三者相对稳定. 随着路段长度增加,最大流量区间变异系数越来越大. 这是因为路段越长,车流运行随机性越大,模型预测效果越差. 从图 3a 中的最大区间变异系数可知,本文模型预测误差比静态模型预测效果更优,平均误差减少了 42.16%.

### 3.2.3 不同流量状态分析

在上下游数据收集点位置固定的情况下,此处分别假设为 40、43、843 m,则上下游距离为 800 m,研究不同流量状态对本文模型预测效果的影响. 假设流量分别为 300、400、500、600、700 辆·(车道·h)<sup>-1</sup>,分别绘制静态模型和本文模型最大流量区间变异系数图和流量分布图,如图 4 所示.

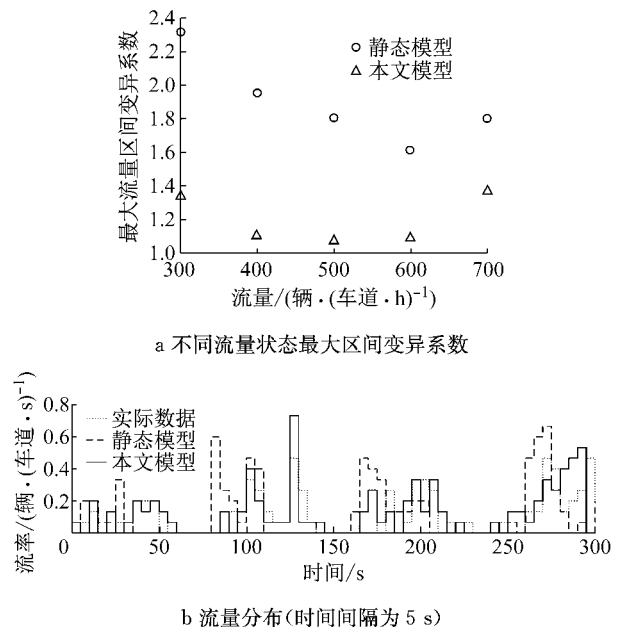


图4 不同流量状态下模型效果

Fig.4 Performance of models for different traffic volume levels

从图 4 中看出,当流量发生变化时,两种模型与实际流量到达趋势一致. 同时,从图 4a 中可以发现,本文模型的最大流量区间变异系数与流量的增加均呈凹函数变化,即随着流量增大,最大流量区间变异系数值存在一个最优值. 这是因为流量越小,预测要求越高;流量越大,交通状况相对较差,车流运行的不确定越大. 从图中可知,本文模型预测效果都比静态模型要好.

### 3.2.4 不同转向分析

在上游数据收集点固定的情况下,设置上、下游距离为 800 m. 采用跟踪车辆编号的方法,获得车辆的转向信息. 这里仅讨论左转车辆和直行车辆到达

下游的流量分布. 图 5 为不同转向下模型预测效果图.

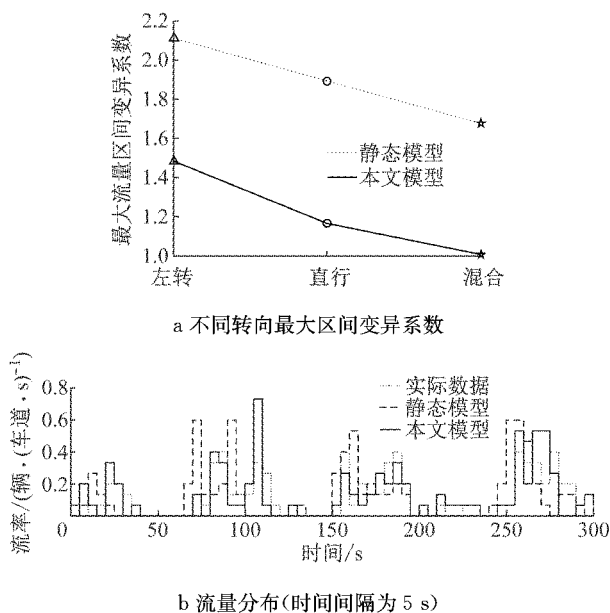


图 5 不同转向下模型效果  
Fig. 5 Performance of models for different traffic directions

从图 5 可以看出,对于不同转向的车流,静态模型和本文模型的预测情况与实际流量到达趋势大体一致.从图 5a 可知,混合车辆最大区间变异系数最小,直行次之,说明最大区间变异系数与转向有关.分析可知,这是由于不同转向的车辆总数不同,从大到小依次为混合、直行和左转.同时发现本文模型不同转向变异系数均比静态模型要小.相较于静态模型,本文模型平均误差减少 35.61%,这是由于本文模型采用的是动态参数,可以实时反映交通流的变化.

### 3.2.5 实际数据分析

为证明本文模型可以用于实际车流预测,选取成都市九里堤东路进行实地数据采集.该路段为双向四车道,公交车流较小.调查时间为 10:00 到 11:00.路段示意图如图 6 所示,其中上游设置两个摄像点(间隔 10 m),测得车辆的离去时间和速度,下游设置一个摄像点,可以测得车辆的到达时间,上下游摄像点距离为 600 m.通过上游的车辆离去时间和速度采用本文模型对车辆到达时间进行预测,从而得到下游预测到达流量分布,再与下游测量得到实际车流到达分布进行对比.图 7 为本文模型、静态模型和实际车流到达对比图.表 3 为两种模型预测的最大区间变异系数对比.

从图 7 可知,本文模型预测的到达流量分布与

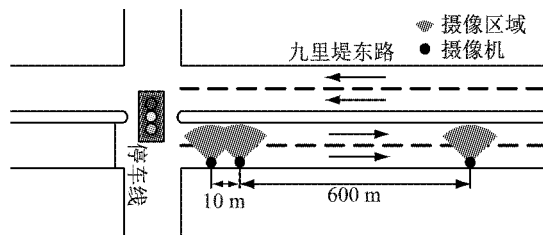


图 6 调查路段示意图  
Fig. 6 Diagram of survey road segment

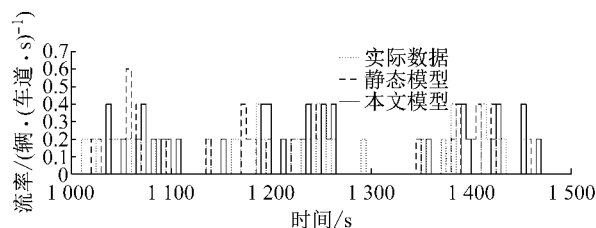


图 7 不同模型下游流率分布(1 000~1 500 s)  
Fig. 7 Comparison of different models of arriving flow rate distribution (1 000~1 500 s)

表 3 不同模型最大区间变异系数

Tab. 3 $\alpha_{cv}$ for different models	
模型	最大区间变异系数
静态模型	2.539 7
本文模型	1.955 8

实际到达流量趋势大致相同.从表 3 中可知,本文模型预测的最大区间变异系数较静态模型减少了 22.9%,说明本文模型可用于实际交叉口的车辆到达流量预测.

## 4 结论

(1) 上游数据收集点位置对模型预测误差的影响较小,且与静态模型相比,本文模型预测误差减少了 40.78%.

(2) 路段越长,模型预测误差越大.同时,通过与静态模型对比,本文模型预测误差减少了 42.16%.

(3) 本文模型适用于非饱和交通条件下的预测,且模型不受车辆转向的影响,可以用来预测不同转向的流量分布.

(4) 通过本文模型与实际调查数据对比,证明了本文模型预测的有效性.

本文提出的断面车流通讯环境易于建设,仅仅需要对国内一些城市(如重庆)的已有系统进行改善就可达到一定的覆盖率.未来将进一步研究本文模型在信号交叉口动态控制中的应用效果,并探讨基于速度分布的动态车流运行模型,探索多断面信息

融合方法以提高模型预测精度,利用车辆通过停车线断面后获取的后验数据对预测模型进行反馈改善。

## 参考文献:

- [1] PACEY G M. The progress of a bunch of vehicles released from a traffic signal [R]. London: Road Research Laboratory, 1956.
- [2] GRACE M J, POTTS R B. A theory of the diffusion of traffic platoons[J]. Operations Research, 1964, 12(2): 255.
- [3] ROBERTSON D I. TRANSYT: a traffic network study tool [R]. Crowthorne: Road Research Laboratory, 1969.
- [4] HILLIER J A, ROTHERY R. The synchronization of traffic signals for minimum delay[J]. Transportation Science, 1967, 1(2): 81.
- [5] SEDDON P A. Another look at platoon dispersion 3: the recurrence relationship[J]. Traffic Engineering and Control, 1972, 13(10): 442.
- [6] WALLACE C E, COURAGE K G, REAVES D P, *et al.* TRANSYT-7F user's manual[R]. Gainesville: University of Florida, 1984.
- [7] HUNT P B, ROBERTSON D I, BRETHERTON R D, *et al.* SCOOT: a traffic responsive method of coordinating signals[R]. Crowthorne: Road Research Laboratory, 1981.
- [8] HALL M, WILLUMSEN L G. SATURN: a simulation-assignment model for the evaluation of traffic management schemes [J]. Traffic Engineering & Control, 1980, 21(4): 168.
- [9] LIEBERMAN E B, ANDREWS B J. TRAFLO: a new tool to evaluate transportation system management strategies [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 1980.
- [10] TRACZ M. The prediction of platoon dispersion based on rectangular distribution of journey time [J]. Traffic Engineering and Control, 1975, 16(11): 490.
- [11] POLUS A. A study of travel time and reliability on arterial routes[J]. Transportation, 1979, 8(2): 141.
- [12] YU L. Calibration of platoon dispersion parameters on the basis of link travel time statistics[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2000(1727): 89.
- [13] 巫威眺,沈旅欧,靳文舟. 基于速度截断分布和流量的车队离散模型[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(1): 126.  
WU Weitiao, SHEN Lüou, JIN Wenzhou. Platoon flow dispersion model based on truncated normal distribution of speed[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(1): 126.
- [14] 巫威眺,沈旅欧,靳文舟. 假设速度服从截断正态分布的公交车队密度离散模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 44.  
WU Weitiao, SHEN Lüou, JIN Wenzhou. Density dispersion model of bus platoon on the assumption of speed followed truncated normal distribution [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(2): 44.
- [15] 巫威眺,沈旅欧,靳文舟. 基于速度截断对数正态分布的车队密度离散模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 122.  
WU Weitiao, SHEN Lüou, JIN Wenzhou. Platoon density dispersion model based on truncated lognormal distribution of speed [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(3): 122.
- [16] 巫威眺,沈旅欧,靳文舟. 基于速度截断对数正态分布的车队流量离散模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 71.  
WU Weitiao, SHEN Lüou, JIN Wenzhou. Dispersion model of platoon density based on truncated lognormal distribution of speed [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(4): 71.
- [17] 沈旅欧,靳文舟,魏明. 考虑车速分布区间限制的车队密度离散模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(6): 1465.  
SHEN Lüou, JIN Wenzhou, WEI Ming. Platoon density dispersion model considering the speed range limit [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(6): 1465.
- [18] WU W, JIN W, SHEN L. Mixed platoon flow dispersion model based on speed-truncated Gaussian mixture distribution [J]. Journal of Applied Mathematics, 2013, 2013(4): 415.
- [19] WU W, SHEN L, JIN W, *et al.* Density-based mixed platoon dispersion modelling with truncated mixed Gaussian distribution of speed [J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2015, 3(2): 114.
- [20] 陈小鸿,冯均佳,杨超. 基于浮动车数据的行程时间可靠度特征研究[J]. 城市交通, 2007, 5(5): 42.  
CHEN Xiaohong, FENG Junjia, YANG Chao. Research on travel time reliability characteristics based on floating car data [J]. Urban Transport of China, 2007, 5(5): 42.
- [21] 姚志洪,沈旅欧,巫威眺,等. 基于行程时间分布的异质交通流车队离散模型[J]. 中国公路学报, 2016, 29(8): 134.  
YAO Zhihong, SHEN Lüou, WU Weitiao, *et al.* Heterogeneous traffic flow platoon dispersion model based on travel time distribution [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(8): 134.
- [22] 姚志洪,蒋阳升,吴云霞,等. 基于速度服从混合 PH 分布的车队离散模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(3): 133.  
YAO Zhihong, JIANG Yangsheng, WU Yunxia, *et al.* Platoon dispersion model based on mixed phase distribution of speed [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(3): 133.
- [23] LARRY H K. Event-based short-term traffic flow prediction model [J]. Journal of the Transportation Research Board, 1995 (1510): 125.
- [24] LEE J, PARK B, YUN I. Cumulative travel-time responsive real-time intersection control algorithm in the connected vehicle environment [J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(10): 1020.