

Traffic Flow Prediction Modeling at Intersections Based on Vehicle Trajectory

Wang Yinfeng* Huang Xingwen Lin Weiyao Ye Meiru

School of Architecture Civil Engineering Traffic Engineering, Ningbo University of
Technology, Ningbo

Abstract: With the rapid development of urbanization and motorization, the traffic congestion problem in major cities in China is becoming more and more serious, and optimizing intersections plays an extremely important role in alleviating urban traffic congestion. In this study, the mathematical model of traffic forecast at the target intersection is constructed by using the big data of vehicle trajectory. The research results of this project can be directly applied to control measures such as signal timing optimization at intersections, optimization and adjustment of variable lanes at intersections, etc., so as to improve the traffic capacity of intersections and alleviate urban traffic congestion.

Key words: Vehicle trajectory; Flow forecast; Prediction model

Received: 2020-06-30; Accepted: 2020-07-08; Published: 2020-07-15

基于车辆轨迹的交叉口流量预测建模

王吟枫* 黄幸文 林伟耀 叶梅茹

宁波工程学院建筑与交通工程学院, 宁波

邮箱: 1052750695@qq.com

摘要: 随着城市化和机动化的双重快速发展, 我国各大城市的交通拥堵问题日益严重, 优化交叉口对缓解城市交通拥堵有着极其重要的作用。本研究利用车辆轨迹大数据对目标交叉口流量预测的数学模型进行构建。本项目的研究成果可直接用于交叉口信号配时优化、交叉口可变车道优化调整等管控措施, 从而达到提升交叉口通行能力, 缓解城市交通拥堵的目的。

关键词: 车辆轨迹; 流量预测; 预测模型

收稿日期: 2020-06-30; 录用日期: 2020-07-08; 发表日期: 2020-07-15

Copyright © 2020 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1 引言

随着城市机动化进程的加快，城市交通拥堵问题 [1] 日益严重，而交叉口又是城市交通的主要瓶颈，拥堵现象常出现在交叉口。因此，交叉口的治理尤为重要。交叉口流量的短时预测是对交叉口管控优化的数据基础，包括信号灯短时配时优化，可变车道调节优化等管理都需要流量预测数据作为基础。通过交叉口流量预测建模能够对交叉口进行短时信号灯控制优化管理，做到分时段信号配时，使城市交叉口的通行能力得到最大化的提升，提高整个城市道路网络系统的通行能力和服务水平。

2 问题分析

对一个常规的十字交叉口，影响它在某个时间节点的流量因素主要有以下四点：第一，与相邻的交叉口在先前一段时间内的通过流量；第二，车辆在路段上的通行速率；第三，道路的通达度及舒适度；第四，路网上存在的开口吸引力大小。

结合车辆轨迹大数据 [2] 信息，对目标交叉口在不同时间节点的预测转化为三个方面：第一，上游交叉口的路径选择配比情况；第二，各个上游交叉口信号配时方案对比情况；第三，上游路段出入口吸引力大小。

3 模型构建

3.1 预分析

3.1.1 理论路网构建

根据问题解析情况，构建用以建立预测模型的理论路网，理论路网如下图 1 所示：

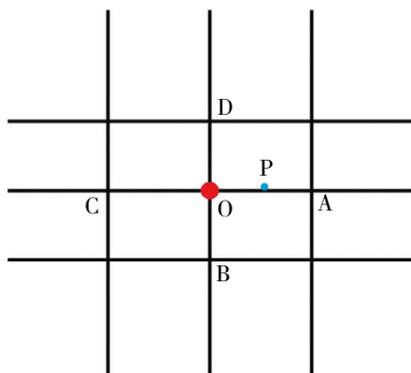


图 1 理论路网示意图

Figure 1 Schematic diagram of theoretical road network

在图 1 的理论路网示意图中，中央红点 O 表示目标交叉口，A，B，C，D 表示四个上游交叉口，P 表示路段上的吸引点，以该理论路网为基础进行流量预测的理论推演。

3.1.2 上游交叉口

以上游交叉口 A 为例，解析上游交叉口对目标交叉口流量的影响。

车辆在进入交叉口后受到信号灯控制的影响，在每个信号周期中会存在一个流量较大值，一个流量峰值，时间流量曲线近似于双驼峰型，如图 2 所示。

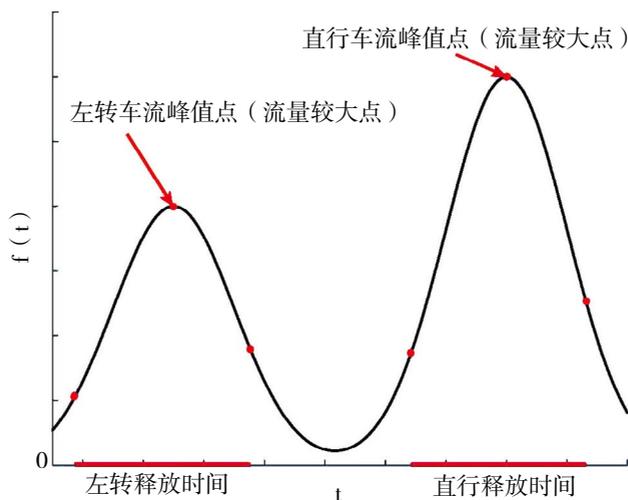


图 2 时间流量曲线示意图

Figure 2 Schematic diagram of time flow curve

图2的时间流量曲线并非真实的上游交叉口对目标交叉口供给的流量，仅为趋势图。右转信号对于交叉口在每个信号周期均有通过，而每个信号周期通过交叉口A的流量进入目标交叉口O上游的流量峰值位于东向西直行为绿灯、南向北左转或者东向西掉头，具体哪个为峰值视各个交叉口的交通流量而定。

3.1.3 吸引点吸引

吸引点的吸引取决于在该时刻的吸引力大小，而这吸引力大小会随着时间的波动而产生波动，同时，吸引点的本身特性，如医院、商务区、居民区等，都会存在各自的差异。

3.1.4 吸引点产生

吸引点的产生取决于在该时刻的生产力大小，而这生产力大小会随着时间的波动而产生波动，如同吸引点的吸引力大小，在不同性质的不同吸引点都会存在着本身的差异。

3.2 定义说明

3.2.1 定义符号说明（见表1）

表1 模型符号定义说明表

Table 1 Model symbol definition description table

符号	符号说明	符号	符号说明
Q_{OA}	AO进口的预测流量	$q_{fluctuate_{out}}$	离开吸引点P且无周期性波动特征的流量
Q_t	t时刻交叉口O目标段的交通量	t_{AOy}	修正前AO段行驶时间
$Q_{P_{in}}$	t时刻进入吸引点P的交通流量	t_{AO}	修正后AO段行驶时间
$Q_{P_{out}}$	t时刻离开吸引点P的交通流量	P_A	从A交叉口进入吸引点的概率
$q_{fixation_{in}}$	进入吸引点P且具有周期性波动特征的流量	P_O	离开吸引点，前往O交叉口的概率
$q_{fluctuate_{in}}$	进入吸引点P且无周期性波动特征的流量	P_{AO_t}	在交叉口A在t时刻选择AO段的概率
$q_{fixation_{out}}$	离开吸引点P且具有周期性波动特征的流量		

3.2.2 前提假设说明

假设1：通行过程中每一个阶段连续性好，无强干扰干涉交通流。

假设2：测算过程均在同一信号周期产生。

假设 3: 车流无特殊情况导致流量误差陡增。

假设 4: 车辆轨迹大数据周期变化拟合曲线已知。

3.3 模型构建

在已知车辆轨迹数据的情况下对于目标交叉口流量的预测主要需要两个位置的数据: 上游交叉口流量、路段吸引点吞吐量。

3.3.1 上游交叉口流量模型

对于前往目标交叉口的车流量, 在不受到路段流量干扰的情况下服从关系如下:

$$Q_{AO} = P_{AO_t} Q_A \quad (1)$$

在上述关系中, Q_{AO} 表示从上游交叉口 A 在不受到路段上的各个元素的干扰的情况下的在 t 时刻的流量, P_{AO_t} 表示在 t 时刻根据车辆轨迹大数据分析出的上游交叉口 A 的流量中, 选择前往目标交叉口 O 的选择概率, Q_A 表示 t 时刻上游交叉口 A 的流量。

在路段上行驶的车流量, 不受到各方面因素的干扰下可以视为连续流, 可以推算出在常规路段(不拥挤条件)的情况下, 交通流与行车速度之间的关系[3], 基本满足下列关系式:

$$Q = K_j \left(V - \frac{V^2}{V_f} \right) \quad (2)$$

其中, Q 表示交通流大小, V 表示路段上的行车速度, K_j 表示在目标运行道路上使道路完全锁死情况下 ($V=0$) 的车流密度, V_f 表示自由流车辆所达到的车速, 即车流密度趋于零, 车辆可以畅行无阻时的平均速度。

相应的关系在对目标交叉口流量的预测中, 可以映射为路段即使流量与车流即时速度表达式, 同时, 该关系也是对车辆在上游路段通行情况的数学解析, 具体关系式如下:

$$Q_{AO} = K_j \left(V_{AO} - \frac{V_{AO}^2}{V_f} \right) \quad (3)$$

那么, 若在路段 AO 上, 车流量维持平衡, 波动情况较小的情况下, 车流在路段上的运行可以近似的视为匀速运动, 那么, 在路段上的行驶时间为

$$t_{AOy} = \frac{S_{AO}}{V_{AO}} \quad (4)$$

在这个条件下，目标交叉口的交通流量与上游交叉口流量的关系可表示的关系为

$$Q_t = Q_{AO(t-t_{AOy})} \quad (5)$$

即， t 时刻目标交叉口 O 的交通流量等价于上游交叉口 A 在不受到路段上的各个元素的干扰的情况下的在 $t-t_{AOy}$ 时刻的流量。

而对于车辆实际在路段上的行驶时间，无法直接用纯粹的平均速度来衡量，结合车辆轨迹数据，可以大致测算出对于每个时间节点下的大致运行时间修正系数为 θ ，那么路段行驶时间可转化为

$$t_{AO} = \theta t_{AOy} \quad (6)$$

相应的目标交叉口的交通流量与上游交叉口流量：

$$Q_t = Q_{AO(t-t_{AO})} \quad (7)$$

3.3.2 吸引点吸引流量模型

吸引点的吸引流量的大小会受到该吸引点自身的吸引力影响，而影响吸引点吸引力的因素主要有：吸引点类别、吸引点综合水平、人群配比情况、吸引量周期分布情况和包括天气因素各项修正因素。根据影响因素构建吸引点吸引流量模型：

$$Q_{P_{in}} = (q_{fixation_{in}} + q_{fluctuate_{in}}) P_A \quad (8)$$

其中， $Q_{P_{in}}$ 表示一条关于在不同情况下吸引点吸引流量对目标交叉口的叠加流量波动曲线， $q_{fixation_{in}}$ 表示在吸引流量中较为固定的一部分，总体呈周期性波动，存在着与时间的一定关系， $q_{fluctuate_{in}}$ 表示在吸引流量中波动性强的人群吸引的流量， P_A 表示在进入吸引点的车流中，由 A 交叉口产生的概率。

根据 $q_{fixation_{in}}$ 本身受到的影响因素，结合大数据统计分析得到的流量周期性变化情况，构建关于时间的数学模型：

$$q_{fixation_{in}} = q_{i_{in}} \mu_i m \quad (9)$$

$q_{i_{in}}$ 表示在第 i 种吸引点，经过大数据统计过后分析得出流量的周期性波动，是一条流量与时间的曲线， μ_i 表示吸引点 i 的综合水平指标，主要用于衡量可能产生的额外特殊的但与总体呈周期性变化相关的流量的修正， m 表示修正系

数，表示在受到天气情况、部分不可抗力等影响下的车流量的波动。

由于 $q_{fluctuate_{in}}$ 为受到周期性影响较小的流量，本身流量波动呈离散性分布，而这块车流密度总体较小，车辆间相互影响也较为微弱，因而，将这块车流的分布情况，视为泊松分布，构建其相关数学模型：

$$\begin{cases} q_{fluctuate_{in}}=N_{in} \\ P(k=N_{in}) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \end{cases} \quad (10)$$

对此，综合上述三个分块数学模型，构建起吸引点吸引流量模型，如下所示：

$$\begin{cases} Q_{P_{in}} = (q_{fixation_{in}} + q_{fluctuate_{in}}) P_A \\ q_{fixation_{in}} = q_{i_{in}} \mu m \\ q_{fluctuate_{in}} = N_{in} \\ P(k=N_{in}) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \end{cases} \quad (11)$$

3.3.3 吸引点产生流量模型

对于吸引点来说，产生流量的影响因子与吸引流量的影响因子相似，由此可以建立如下所示的模型：

$$\begin{cases} Q_{P_{out}} = (q_{fixation_{out}} + q_{fluctuate_{out}}) P_O \\ q_{fixation_{out}} = q_{i_{out}} \mu m \\ q_{fluctuate_{out}} = N_{out} \\ P(k=N_{out}) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \end{cases} \quad (12)$$

3.3.4 模型各指标关系与时间轴标定

在汇总模型之前，需先对总的时间轴进行统一，由此，可以得到：

$$\begin{aligned} Q_{P_{in}} &= Q_{P_{in}(t-t_{PO})} \\ Q_{P_{out}} &= Q_{P_{in}(t-t_{PO})} \end{aligned} \quad (13)$$

由此，后文所有的 $Q_{P_{out}}$ 与 $Q_{P_{in}}$ 均为统一时间轴后的吸引点吞吐量

可以得到与之对应的以 A 交叉口为上游交叉口的目标交叉口 O 预测流量关系：

$$Q_{OA} = Q_t - Q_{P_{in}} + Q_{P_{out}} \quad (14)$$

而在与吸引点相叠加的过程中，实质上后半段的即时流量有些微的波动，

当车辆在经过吸引点的时候，由于流量的增减波动，导致后半段交通流产生速度上的波动，这在一定程度上影响了目标交叉口预测流量的精度，因而，结合相关车辆历史轨迹数据，对上游交叉口的流量添加吸引点影响因子 λ 进行流量修正，最后的关系如下：

$$Q_{OA} = \lambda Q_t - Q_{P_{in}} + Q_{P_{out}} \quad (15)$$

3.3.5 目标交叉口流量预测模型构建

综合上述各项指标，构建目标交叉口以交叉口 A 为上游交叉口段的流量预测模型，如下：

$$\begin{cases}
 Q_{OA} = \lambda Q_t - Q_{P_{in}} + Q_{P_{out}} \\
 Q_{AO} = P_{AO} Q_A \\
 Q_{AO} = K_j \left(V_{AO} - \frac{V_{AO}^2}{V_f} \right) \\
 t_{AOy} = \frac{S_{AO}}{V_{AO}} \\
 Q_t = Q_{AO} (t - t_{AOy}) \\
 t_{AO} = \theta t_{AOy} \\
 Q_t = Q_{AO} (t - t_{AO}) \\
 Q_{P_{in}} = (q_{fixation_{in}} + q_{fluctuate_{in}}) P_A \\
 q_{fixation_{in}} = q_{i_{in}} \mu m \\
 q_{fluctuate_{in}} = N_{in} \\
 P(k = N_{in}) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \\
 Q_{P_{out}} = (q_{fixation_{out}} + q_{fluctuate_{out}}) P_O \\
 q_{fixation_{out}} = q_{i_{out}} \mu m \\
 q_{fluctuate_{out}} = N_{out} \\
 P(k = N_{out}) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}
 \end{cases} \quad (16)$$

根据该模型，可以相应推算出，综合交叉口各个方向的目标交叉口预测总流量为：

$$Q_O = \sum_{N=A, B, C, D} Q_{ON} \quad (17)$$

其中，N 代表各个交叉口的代号，可由 A，B，C，D 等替代。

4 结论

通过车辆轨迹数据，并以此建立交叉口交通流量的预测模型，获取更为准确的实时流量信息，并且借助实时流量信息，对各方面因子进行优化，不断迭代更新数据，得到更精准的预测结果。

参考文献

- [1] 郭继孚, 刘莹, 余柳. 对中国大城市交通拥堵问题的认识 [J]. 城市交通, 2011, 9 (2): 8-14.
- [2] 丁军, 张佐, 陈洪昕, 等. 车辆轨迹数据的若干处理方法研究 [J]. 交通信息与安全, 2011, 29 (5): 10-14, 35.
- [3] 王伟, 过秀成. 交通工程学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.