

基于卡警数据的路口排队长度计算模型研究

常宗智^{1,2}
CHANG Zongzhi

摘要

随着汽车保有量的快速增加，城市交通拥堵问题日益严重，交叉口排队长度是评估交通运行效率的关键指标。基于此，文章提出一种结合卡警抓拍数据与信号灯配时参数的路口排队长度近似计算方法。首先，通过卡警数据提取车辆到达时间、瞬时速度及停车次数，结合信号相位划分交通流周期；其次，基于冲击波理论构建排队形成与消散的动态模型，推导绿灯亮起后车流消散波传播速度与集结波回溯规律；最后，通过实际案例验证模型精度。结果表明，该方法能够有效减少传统检测器的部署成本，为动态信号优化提供理论支持。

关键词

卡警抓拍数据；信号灯配时；冲击波模型；排队长度

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.02.043

0 引言

城市交叉口是交通网络的瓶颈，其通行效率直接影响整个路网的运行效率。随着车辆保有量的增加，交叉口排队溢出现象频发，导致交通延误和拥堵加剧，尤其是在早晚高峰时段。传统的排队长度检测方法依赖于线圈检测器或路口雷

达，但其易损坏且维护成本高。近年来，车牌识别系统（LPR，即电警、卡口数据）因其高精度和易获取性，逐渐成为交通状态监测的重要数据源。

目前，国内外学者对信号交叉口排队长度的研究，根据数据来源不同，研究方式主要分为3种：基于定点数据的研究、基于移动数据的研究和基于多源数据融合的研究。例如，贾利民等^[1]利用车辆行驶经过传感器的时刻与车尾时距估计车辆排队的长度。由于车辆传感器的覆盖范围有限，且

1. 东南大学 江苏南京 210096
2. 南京金智视讯技术有限公司 江苏南京 211100

[17]PACKARD N H, CRUTCHFIELD J P, FARMER J D, et al. Geometry from a time series [J]. Physical review letters, 1980, 45(9): 712-716.

[18]TAKENS F . Detecting strange attractors in turbulence[C]// Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980. Berlin:Springer,2006:366–381.

[19]MARTINERIE J M , ALBANO A M , MEES A I , et al. Mutual information, strange attractors, and the optimal estimation of dimension[J]. Physical review A, 1992, 45(10):7058-7064.

[20]CAO L Y . Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series[J]. Physica D nonlinear phenomena, 1997, 110(1/2):43-50.

[21]SHERSTINSKY A. Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network[J]. Physica D nonlinear phenomena, 2020, 404:132306.

[22] 黄伟建, 李永涛, 黄远. 基于混合神经网络和注意力机制

的混沌时间序列预测 [J]. 物理学报 ,2021,70(1):235-243.

[23] YAN R , LIAO J Q, YANG J , et al. Multi-hour and multi-site air quality index forecasting in Beijing using CNN, LSTM, CNN-LSTM, and spatiotemporal clustering[J]. Expert systems with applications, 2020, 169:114513.

[24] JIAO R H, ZHANG T M, JIANG Y Z, et al.Short-term non-residential load forecasting based on multiple sequences LSTM recurrent neural network[J].IEEE access,2019,6: 59438-59448.

【作者简介】

赵瑞晓（1996—），女，河南濮阳人，硕士研究生，助教，研究方向：人工智能、计算机应用。

顾航（1992—），男，江苏沭阳人，硕士研究生，助教，研究方向：人工智能、计算机应用。

（收稿日期：2025-07-03 修回日期：2026-02-04 ）

成本较高,所以该模型有一定的局限性。Cho 等^[2]利用双截面测量数据计算交通波波速和车辆到达率确定交叉口排队长度。由于定点检测技术存在的问题以及移动数据采集技术的发展,基于移动检测数据的研究也被广泛开展。Comert 等^[3]利用贝叶斯算法,通过计算队列中尾车的位置求得交叉口最大排队长度。杨良义等^[4]基于灭点原理与成像原理将交叉口视频图像数据转换为物理数据,从而获得车辆排队长度检测方法。虽然视频图像数据能获取很多交通参数,但在实际应用中容易被恶劣天气影响,整体并不成熟。Zhan 等^[5]基于电子警察数据,结合交通波理论建立了排队长度估计模型。此外,随着交通数据采集的多样化,排队长度估计方法出现对多源数据融合的利用。王忠宇等^[6]融合浮动车数据和线圈检测数据,在传统计算模型的基础上,提出新的交叉口车辆排队长度计算方法。姚宇^[7]基于统计归纳思想和交通流理论,考虑到断面检测流量数据与移动 GPS 数据在不同数据采集环境下的精度差异,将两种数据进行有效融合,提出一种可实时估计交叉口排队长度的估算模型。

现有研究虽已逐见成效,但大多未充分考虑信号灯配时对排队长度的影响,且缺乏对动态交通流的实时监测能力,因此本文计划利用卡口抓拍数据与信号灯配时数据,结合冲击波模型理论,对排队长度进行深入研究。

1 数据预处理与特征提取

1.1 路口抓拍设备安装示意图

道路交叉口抓拍设备安装示意图如图 1 所示。

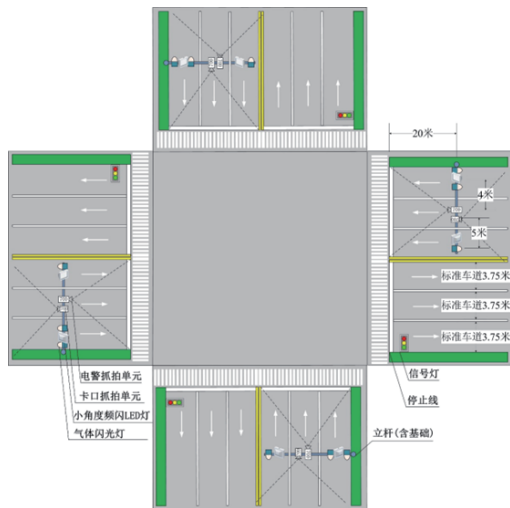


图 1 路口抓拍设备安装示意图

路口立杆位置距离车辆停止线为 20 m,杆高 6 m,过车数据为杆件上卡警一体机设备获取,抓拍线即为路口车辆停止线,抓拍角度为车尾。

1.2 原始过车数据结构

原始过车数据结构如表 1 所示。

表 1 过车数据结构表

序号	数据字段	说明
1	tollgate_id	路口名称
2	plate_no	车牌号码
3	day_value	日期(年月日)
4	pass_time	过车时间(时分秒)
5	direction	行驶方向(东南西北)
6	lane_no	车道编号
7	plate_color	车牌颜色

1.3 信号配时参数

信号配时参数如表 2 所示。

表 2 信号配时参数表

序号	数据字段	说明
1	T_r	红灯时长
2	T_g	绿灯时长
3	T_y	黄灯时长

1.4 异常数据处理

1.4.1 数据冗余

包含以下几类情况:重复数据;极短时间内除车道不同,其他均相同的数据;相同车牌不同类型;疑似套牌车。

处理方式:针对 1、2 进行重复数据删除;针对 3、4 不进行处理。

1.4.2 车牌识别错误

包含以下几类情况:车牌位数小于 7 位或大于 8 位;字符识别错误,如乱码;未识别到车牌信息^[8]。

处理方式:记录车辆数量,不做车牌匹配。

2 冲击波模型构建

2.1 基本假设

(1) 假设各车道车辆到达符合泊松分布,饱和流率以某一信号周期内过车数量按绿信比扩展到 1 h 计算,即:

$$q_m = N_i \times \frac{T_g + T_r + T_y}{T_g} \quad (1)$$

式中: N_i 为第 i 个完整的信号周期内过车数量。

(2) 冲击波传播过程中车辆无超车行为。

2.2 排队形成阶段(红灯期间)

当红灯启亮时,集结波从停车线向后传播,其速度由交通流基本图决定:

根据 LWR 模型,冲击波速度公式为:

$$v_s = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1} \quad (2)$$

式中: $q_1 = k_0 \cdot v_f$, 为自由流状态下的流量(veh/h); $q_2 = 0$,

阻塞状态下流量为零。

令 $k_1 = k_0, k_2 = k_j$ ，其中 k_j 为阻塞密度 (veh/km)； k_0 为初始车流密度 (veh/km)，代入得：

$$v_s = \frac{0 - k_0 v_f}{k_j - k_0} = -\frac{k_0 v_f}{k_j - k_0} \quad (3)$$

实际计算取绝对值，即：

$$v_s = \frac{k_0 v_f}{k_j - k_0} \quad (4)$$

故集结波速度：

$$v_s = \frac{q_1}{k_j - k_0} \quad (5)$$

最大排队长度：

$$L_{\max} = v_s \cdot T_r = \frac{q_1 \cdot T_r}{k_j - k_0} \quad (6)$$

2.3 排队消散阶段（绿灯期间）

绿灯启亮后，消散波以速度 v_w 向后传播，与集结波方向相反，消散波速度用公式表示为：

$$v_w = \frac{q_m}{k_j - k_m} \quad (7)$$

式中： k_m 为绿灯启亮后的车辆密度，若取平均车头间距 $S = 10 \text{ m/veh}$ （含 5 m 车长 + 5 m 安全距离），则 $k_m = 100 \text{ veh/km}$ 。

当消散波追上集结波时，排队完全消散，时间满足：

$$v_w \cdot t_d = L_{\max} + v_s \cdot t_d \quad (8)$$

解得消散时间为：

$$t_d = \frac{L_{\max}}{v_w - v_s} \quad (9)$$

2.4 动态修正模型

通过卡口实时数据更新参数（以饱和流率 q_m 为例）

（1）观测值获取

根据绿灯 + 黄灯期间车辆通过卡口的数量 N ，计算实际饱和流率：

$$q_{\text{mt}} = \frac{N}{T_g + T_y + T_r} \times 3600 \quad (10)$$

（2）梯度下降修正

定义损失函数：

$$J = \frac{1}{2} (q_m - q_{\text{mt}})^2 \quad (11)$$

更新步长：

$$q_m = q_m - \alpha \frac{\partial J}{\partial q_m} = q_m - \alpha (q_m - q_{\text{mt}}) \quad (12)$$

式中： α 为学习率（通常取 0.01）。

3 实验验证

3.1 数据来源

实验选取南京市某区其中 1 条主干道的十字路口（2025

年 5 月 28 日早高峰 8:00—9:00），由北向南方向第 1 条直行车道的过车数据，如图 2 所示。



图 2 实验车道示意图

经查询和统计得，信号周期 138 s，其中 $T_r = 85 \text{ s}$ ， $T_g = 50 \text{ s}$ ， $T_y = 3 \text{ s}$ ，计算时，将黄灯时间看作绿灯时间简化计算，即 $T_g = 53 \text{ s}$ ， $T_r = 85 \text{ s}$ 。1 h 内共有 25 个完整的信号周期，去除异常数据后，合计过车数据 488 条，各周期实验车道过车数量如表 3 所示。

表 3 1 h 内 25 个信号周期观测车道绿灯期间过车数量

信号周期序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
过车数量	20	22	27	19	25	18	22	20	22
信号周期序号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
过车数量	21	21	26	18	19	20	18	26	18
信号周期序号	19	20	21	22	23	24	25		
过车数量	20	16	15	15	12	13	16		

3.2 相关数值说明

测量得到，该路口与上游路口相距 615 m，卡口统计，由内向外第 1 条直行道，1 h 内抓拍车辆数为 507 辆。

信号周期内，自由流速度为该周期内所有车辆在相邻路口被抓拍所计算出的区间车速的平均值，即 $v_f = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n v_i$ 。

假设排队期间平均车头间距为 7 m，则饱和密度 $k_j = 143 \text{ veh}$ 。

3.3 计算举例

经计算，第 1 个信号周期内， $v_f = 28.4 \text{ km/h}$ ， $k_0 = \frac{q_1}{v_f} = 507/28.4 = 17.9 \approx 18 \text{ veh/km}$ 。

集结波速度： $v_s = \frac{q_1}{k_j - k_0} = 4.06 \text{ km/h} = 1.13 \text{ m/s}$ ；

最大排队长度： $L_{\max} = v_s \cdot T_r = 96 \text{ m}$ ，

$$q_m = N_1 \times \frac{T_g + T_r + T_y}{T_g} = 522 \text{ veh/h}；$$

消散波速度: $v_w = \frac{q_m}{k_j - k_m} = 12.14 \text{ km/h} = 3.37 \text{ m/s}$;

消散时间: $t_d = \frac{L_{\max}}{v_w - v_s} = 42.86 \text{ s} < T_g + T_y = 53 \text{ s}$ 。

说明该车道此信号周期内排队达到最长时,在下一个信号周期内,排队可以完全消散,不会形成二次排队。

3.4 结果分析

按上述方法依次计算 25 个周期内最大排队长度,并与通过视频录像观测到的实际值进行比较,结果如图 3 所示。

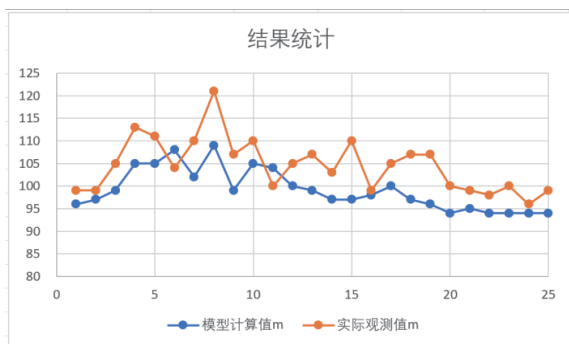


图3 结果统计图

实验误差分析如表4所示。

表4 25个信号周期计算结果比较

误差类别	MAE	RMSE	MAPE
误差结果	5.96 m	6.77 m	5.99%

经统计,计算排队长度普遍小于实际排队长度,误差主要源于未考虑车辆启动损失时间、卡口设备的误差以及未考虑大车与小车车身长度等因素。

同时,实验数据仅使用某一天的数据,不能完全反映该路口早高峰期间的普遍情况。

4 应用与展望

4.1 应用场景

本文所提出的计算模型通过统计交叉路口指定车道的过车数据可近似地计算在一段时间内,红灯期间产生的车辆排队长度。整体模型计算较为简便快捷,可以为信号配时优化以及道路渠化调整提供一定的参考价值。

4.2 未来改进方向

本文仅通过上游交叉口和实验交叉口的卡警数据以及信号灯配时数据来计算实验交叉口这一单一路口的排队长度,所得出的结果仅能用于该路口的信号优化,结合实际场景,为了更好地缓解交通拥堵,改善出行条件,还需要同时考虑交通干线连续多个路口,甚至是交通平面多个干线之间的相互作用和影响。

未来可以通过叠加多源数据,如雷达数据、视频采集数

据等来确定更准确的基础参数(比如饱和流率),并结合深度学习增强冲击波参数自适应能力,来实现对路口排队长度更实时、更准确的估算,从而实现对单一交叉口乃至交通干线、交通平台信号的动态协调控制。

5 结论

本文提出的方法有效利用现有卡警设施,通过理论建模与数据驱动相结合,实现了低成本的排队长度估计。实验表明模型精度满足实际管控需求,为交叉路车辆排队长度估计提供了更为简便计算的技术路径。同时,相比于传统利用浮动车数据、利用GPS数据,利用线圈数据、利用车检器数据来计算交叉口排队长度的方法,该模型所需的数据均来源于常规在用交通系统,设备覆盖面广,维护及时,数据准确性高、实时性高,具备推广价值,能够很好地应用于大中小型城市。

参考文献:

- [1] 贾利民,陈娜,李海舰.基于单个地磁传感器的交叉口排队长度估计[J].吉林大学学报(工学版),2016,46(3): 756-763.
- [2] CHO H J, TSENG M T, HWANG M C. Using detection of vehicular presence to estimate shockwave speed and upstream traffics for a signalized intersection[J]. Applied mathematics and computation, 2014, 232:1151-1165.
- [3] COMERT G, CETIN M. Queue length estimation from probe vehicle location and the impacts of sample size[J]. European journal of operational research, 2009, 197(1):196-202.
- [4] 杨良义,谢飞,陈涛.基于视频的交叉路口车辆排队长度检测方法研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2018,32(6): 169-174.
- [5] ZHAN X Y, LI R M, UKKUSURI S V. Lane-based real-time queue length estimation using licenseplate recognition data[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2015, 57: 85-102.
- [6] 王忠宇,蔡青,吴兵,等.多源数据条件下信号交叉口排队长度估算方法[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(4): 1088-1094.
- [7] 姚宇.基于数据融合的交叉口排队长度估计方法[D].南昌:华东交通大学,2019.
- [8] 乐欢.基于车牌数据的信号交叉口最大排队长度估计[D].成都:西南交通大学,2021.

【作者简介】

常宗智(1990—),男,江苏南京人,硕士研究生,中级工程师,研究方向:智能交通系统管理。

(收稿日期:2025-07-24 修回日期:2026-01-30)