

# 基于智能网联环境的信号交叉口排队长度估算模型研究

寇子卿<sup>1,2</sup>, 张 洁<sup>3</sup>, 张萌萌<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南

<sup>2</sup>山东省智慧交通重点实验室(筹), 山东 济南

<sup>3</sup>山东正衢交通工程有限公司, 山东 济南

收稿日期: 2023年11月26日; 录用日期: 2023年12月22日; 发布日期: 2023年12月30日

## 摘 要

为了能够计算信号交叉口的动态排队长度, 基于排队论模拟车辆排队与消散, 建立信号交叉口动态排队长度计算模型。首先, 根据排队长度的定义来界定本文所计算的排队长度; 其次, 将车辆排队过程视为车辆在遇前方有固定物时的减速停车过程, 以此来描述排队行为并建立车辆排队模型; 然后, 根据改进的Kraus模型及车辆位移公式, 计算每辆车的到达率, 并通过到达率计算排队车辆数及排队长度; 最后, 基于sumo仿真平台, 进行模拟仿真实验。结果表明, 本文基于改进的Kraus模型建立的排队长度模型, 可以提高计算信号交叉口排队长度的准确度。

## 关键词

智能网联环境, 排队长度, Kraus模型, sumo仿真平台

# Research on Queue Length Estimation Method of Signalized Intersection Based on Intelligent Connected Environment

Ziqing Kou<sup>1,2</sup>, Jie Zhang<sup>3</sup>, Mengmeng Zhang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Shandong Key Laboratory of Smart Transportation (Preparation), Jinan Shandong

<sup>3</sup>Shandong Zhengqu Traffic Engineering Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: Nov. 26<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2023; published: Dec. 30<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 寇子卿, 张洁, 张萌萌. 基于智能网联环境的信号交叉口排队长度估算模型研究[J]. 计算机科学与应用, 2023, 13(12): 2528-2535. DOI: 10.12677/csa.2023.1312252

## Abstract

In order to calculate the dynamic queue length of a signalized intersection, vehicle queuing and dissipation were simulated based on the queue theory, and the calculation model of the dynamic queue length of a signalized intersection was established. Firstly, the queue length calculated in this paper is defined according to the definition of queue length. Secondly, the queuing process is regarded as the process of slowing down and stopping when the vehicle meets the fixed object in front, which describes the queuing behavior and establishes the queuing model of the vehicle. Then, according to the improved Kraus model and vehicle displacement formula, the arrival rate of each vehicle is calculated, and the number and length of queuing vehicles are calculated through the arrival rate. Finally, simulation experiments are carried out based on the sumo simulation platform. The results show that the queue length model based on the improved Kraus model can accurately calculate the queue length of the signalized intersection.

## Keywords

Intelligent Connected Environment, Queue Length, Kraus Model, Sumo Simulation Platform

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

城市信号交叉口是城市道路的关键节点，其通行效率决定了整个路网的运行效率，而排队长度是城市信号交叉口通行效率的重要指标。因此，研究并建立信号交叉口动态排队长度计算模型，可以实时获取交叉口通行效率、监测交叉口交通状态，对提升交叉口通行能力具有重要意义。

目前，国内外关于排队长度的模型有很多，主要包括的类型有：排队论、概率论、交通波理论、车辆到达驶离曲线等。Muck [1]提出线性回归模型，该模型通过分析车辆超过检测器的距离与排队长度的关系，得到了估计信号交叉口排队长度的模型。Cho 等[2]利用双截面监测数据计算交通波波速与车辆到达率，并结合交通波理论确定交叉口排队长度。Comert 等[3]利用贝叶斯算法，通过对队列中尾车的确定求得交叉口最大排队长度。Ban [4]通过分析车辆通过虚拟检测器的停车数据，确定信号交叉口的排队长度的关键位置。Zhan 等[5]基于电子警察数据，结合交通波理论与 OD 模型，建立了交叉口排队长度估计模型。Bing Li [6]用 Lighthill-Whitham-Richards 冲击波理论和 Robertson 的排散模型，对排队长度进行了研究。周学农[7]对 SIGNAL94 进行改进，建立了排队长度优化模型。孔涛等[8]从交通状态的判别入手，在畅通的条件下，利用冲击波理论计算排队长度；而在拥堵情况下，根据交通状态的演变过程，考虑滞留车辆数对排队变化的影响，推算交叉口的排队长度。赵淑芝等[9]通过改进的 METANET 模型来模拟车辆排队形成和释放过程，并通过分析排队队尾车辆的空间分布计算得出排队队尾位置，从而获得实时信号交叉口车辆排队长度。贾利民等[10]利用车辆通过传感器的时刻与车尾时距判断车辆排队的过程，进而估计车辆排队长度。冯毅文[11]提出了一种以空间分布形式为核心的交叉口排队长度算法。杨良义等[12]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，进而获得交叉口车辆排队长度检测方法。龚方徽等[13]提出该周期车道排队长度值的实时计算方法，并针对多次排队、绿波协调情况，结合通

行车辆的行程时间对结果进行修正,得到该周期车道最大车辆排队长度值。王宇林等[14]通过视频检测器数据,提出了一种基于过卷积神经网络算法的交叉口车辆排队检测方法。唐进等[15]运用密度聚类方法、运动学公式,并根据排队集结过程的分段特性,预估排队集结波,最后基于交通波理论推算出信号交叉口排队长度。金晨辉[16]构建了基于双层贝叶斯的排队长度估计模型。高宽[17]将交通波理论与卡尔曼滤波理论相结合,实现不同道路饱和度、网联车渗透率条件下的信号交叉口排队长度秒级估计。

综上,目前已有的排队长度估计方法中,学者们主要根据交通流量和交通流的状态对排队长度估算方法进行了研究,并未考虑驾驶员的心理特性及车辆性能对排队长度的影响;且模型主要是基于浮动车数据、卡口数据以及固定检测器数据,缺乏对智能网联环境下,通过车辆与检测设备的通讯,实时获取数据的研究。

本文基于排队论理论与改进的 Krauss 模型,通过车辆安全距离模型和安全跟驰速度模型,建立考虑驾驶人心理特性及车辆性能的交叉口动态排队模型,同时结合 sumo 仿真平台,模拟智能网联环境交通流,通过 python-traci 接口,实时采集车辆数据,以此来验证模型的准确性,以实现智能网联环境下动态排队长度的有效计算。

## 2. 排队论理论

一个排队系统一般有三部分组成,即输入过程、排队规则及服务窗。输入过程是指“顾客”到达的规律;排队规则是指“顾客”接受服务的次序;服务窗是指同一时刻可接纳“顾客”的服务设施数。见图 1。



Figure 1. Queueing theory diagram  
图 1. 排队论理论图

对于交叉口而言,车辆排队通过交叉口形成排队系统,其中,“顾客”为车辆,输入过程为车辆的到达规律,一般认为车辆到达服从泊松分布(M);排队规则为车辆接受服务的次序,车辆通过交叉口的规则为等待制(M),即先到先服务,后来车辆排队等待,同时允许特殊车辆优先通过;服务窗为交叉口进口道数,根据不同数量的服务窗,可将服务系统划分为“单通道服务”系统和“多通道服务”系统,在交叉口处,可将排队系统视为“多通道服务”系统,而为了更好的计算排队长度,在此将排队系统视为多个“单通道服务”系统。最终,交叉口形成  $N$  个 M/M/1 系统。

M/M/1 排队系统运行指标为:

到达率:单位时间内参与排队的车辆平均数。设车辆平均到达率为  $\lambda$ ,则相邻两车参与排队的间隔为  $\frac{1}{\lambda}$ 。

排队车辆数:检测时间内的参与排队的车辆数。假设系统的检测时间为  $T$ ,则排队车辆数为  $\lambda \cdot T$ 。

## 3. 排队模型

### 3.1. 排队过程描述

假设在  $[t_1, t_2)$  内,  $i$  车(跟随车)与  $i-1$  车(前车)间距  $g$  大于两车最小安全间距  $g_{safe}$ ,在不考虑其他因素

的情况下，默认  $i$  车在该时段内保持匀速行驶； $t_2$  时刻，车辆间距小于等于两车最小安全间距， $i$  车为避免与前车相撞而开始减速；直到  $t_3$  时刻  $i$  车参与排队，减速阶段行驶的距离小于  $t_2$  时刻两车最小安全间距。车辆排队过程如下：

$$g + S(V_{i-1})' = S(V_i) + S(V_i)' \quad (2-1)$$

$g$  为两车间距，单位 m； $S(V_{i-1})'$  为  $i-1$  车减速距离，单位 m； $S(V_i)$  为  $i$  车行驶距离，单位 m； $S(V_i)'$  为  $i$  车减速距离，单位 m。

### 3.2. 车辆安全距离模型

Krauss 模型是安全距离类模型。安全距离模型基于这样的假设：即驾驶人期望与前导车保持安全车头间距，当前导车突然制动时，驾驶人能够有时间做出反应并减速停车，以避免发生碰撞。这类模型大多是基于牛顿运动学公式建立，由于模型形式简单、能够避免车辆碰撞，因而在交通仿真软件中广泛应用。

在 Krauss 模型中，为避免前车紧急刹车时，跟随车与前车相撞，跟随车须与前车保持安全车距。车辆的制动过程为：前车行驶状态发生改变后，跟随车驾驶员感知到相关信息，对所获取信息进行分析，意识到应进行紧急制动采取措施，直到车辆停止。在 Krauss 模型中，并未考虑车身长度及停车安全距离，导致后车存在与前车相撞的可能性，因此，本文在模型中考虑了车身长度及停车安全距离。假设前车急停，则相应的安全距离模型为：

$$S(V_i)' + V_i \cdot \beta\tau - g_{safe} - L_c - S(V_{i-1})' \leq g \quad (2-2)$$

其中， $S(V_i)'$  为跟随车减速至 0 所驶过的距离，单位 m； $S(V_{i-1})'$  为前车减速至 0 所驶过的距离； $V_i$  为跟随车车速，单位 m/s； $\beta$  为驾驶员反应系数； $\tau$  为制动反应时间，单位 s，一般为 1~1.5 s； $g_{safe}$  为最小停车安全间距，单位 m，考虑到驾驶人心理特性不同，为保证安全，在此取 3 m； $L_c$  为车辆车身长度，单位 m，一般为 5 m； $g$  为车辆间距(两车车头位置差)，单位 m。

根据上文，跟随车是在观测到前车紧急刹车时，采取紧急制动，紧急制动代表着车辆在制动过程中减速度保持最大，直到停车。根据加速度 - 位移公式，可得到车辆紧急制动阶段行驶距离：

$$S(V)' = v_0 t - \frac{bt^2}{2} \quad (2-3)$$

$S(V)'$  为车辆减速距离，单位 m； $t$  为车辆以最大减速度减速至停车时所用时间， $t = \frac{V}{\alpha b}$ ，由于不同车辆的性能存在差异，以此需加入车辆制动性能系数； $b$  为最大减速度，单位  $m/s^2$ ； $\alpha$  为车辆制动性能系数。

### 3.3. 车辆安全速度

一般跟驰状态下，驾驶员趋向将车辆保持一个安全跟车速度，以避免前车减速导致安全距离缩小而发生碰撞事故，因此，跟随车需依据车间距来控制车辆速度，使车辆始终保持安全跟车速度行驶。此外，受到驾驶人心理特性、驾驶行为及车辆性能的影响，在相同车间距下，车辆的安全速度也存在差异。因此，车辆安全速度为：

$$V_i < -\alpha\omega b \cdot \beta\tau + \sqrt{(\alpha b \cdot \beta\tau)^2 + V_{i-1} + 2\alpha b \cdot g} \quad (2-4)$$

$\alpha$  为车辆制动性能系数； $\omega$  为驾驶员行为系数； $\beta$  为驾驶员反应影响系数，即加速度受到车辆性能、

驾驶员气质类型及驾驶员反应速度的影响； $b$  为非紧急情况下的最大减速度，单位  $\text{m/s}^2$ ； $\tau$  为驾驶员反应时间，单位  $\text{s}$ ； $g$  为车间距，在车辆排队过程的减速过程中等于两车实时距离，单位  $\text{m}$ 。

### 3.4. 排队长度模型

车辆排队过程中，与前车最小安全间距不断减小，安全速度随之改变，根据公式(2-4)可得跟随车在排队过程中的实时速度；将车辆速度小于等于  $1.39 \text{ m/s}$  作为在排队过程中的末速度，结合公式(2-2)、(2-3)得到此速度下的最小安全距离，若最小安全距离大于最小停车间距，则将  $1.39 \text{ m/s}$ ；反之，则以公式(2-4)计算得到的速度作为末速度。

$$\begin{cases} g_{\min} < g_{\text{safe}}, v_m < -\alpha\omega b \cdot \beta\tau + \sqrt{(\alpha b \cdot \beta\tau)^2 + V_{i-1} + 2\alpha b \cdot g_{\text{safe}}} \\ g_{\min} > g_{\text{safe}}, v_m = 1.39 \end{cases} \quad (2-5)$$

$g_{\min}$  为某车速下，车辆需要与前车保持的最小安全距离，单位  $\text{m}$ ； $g_{\text{safe}}$  为最小停车安全间距，单位  $\text{m}$ ，一般为  $1\sim 2 \text{ m}$ ，考虑到驾驶人心理特性，在此取  $3 \text{ m}$ ； $v_m$  为车辆排队过程中的末速度，单位  $\text{m/s}$ 。

根据前车参与排队时的两车位置，以及跟随车将要减速排队时的两车位置，得到跟随车减速过程驶过的需要行驶的距离。在无特殊情况下，车辆在排队过程中基本不会采取紧急制动，即减速过程中减速度不会一直为最大减速度，则而根据车辆加速度 - 位移公式可以得到车辆减速过程中的平均减速度：

$$a = \frac{v_m^2 - v_0^2}{2S} \quad (2-6)$$

$a$  为平均减速度，单位  $\text{m/s}^2$ ； $S$  为需要减速的距离，单位  $\text{m}$ ； $v_0$  为减速过程的初速度，单位  $\text{m/s}$ 。

由平均减速度及车辆速度变化公式可以得到车辆整个减速过程所用时间：

$$t = \frac{v_m - v_0}{a} = t_3 - t_2 \quad (2-7)$$

在  $[t_1, t_2]$  内，已知  $t_1$  时刻  $i$  车速度  $v_0$ ，两车间距  $g$ ，可求得速度  $v_0$  下需要与前车保持的最小安全间距  $g_{\min}$ （此时  $g_{\min} = S(V_i)'$ ），则  $i$  车匀速行驶的距离为  $S(V_i) = g - g_{\min}$ ，由  $v_0$  及  $S(V_i)$  可知  $i$  车减速时刻为：

$$t_2 = t_1 + \frac{S(V_i)}{v_0} \quad (2-8)$$

在排队论中，到达率表示单位时间内到达队伍的车辆数，其倒数则表示相邻两车到达队伍的时间间隔，因此到达时间间隔为：

$$\frac{1}{\lambda} = t_3 - t_1 \quad (2-9)$$

其中， $\lambda$  为到达率，单位  $\text{pcu/s}$ ； $\frac{1}{\lambda}$  表示车辆到达时间间隔，单位  $\text{s}$ 。

本文以红灯时长为排队长度检测时间区间，到达率、红灯时长及车身有效长度三者相乘即为该周期一条车道的排队长度，排队长度可表示为：

$$D = \lambda \cdot T \cdot C \quad (2-10)$$

其中， $T$  为红灯时长，单位  $\text{s}$ ； $D$  为排队长度，单位  $\text{m}$ ； $C$  为有效车身长度，取  $7 \text{ m}$ 。

## 4. 仿真验证

### 4.1. 实验方案设计

sumo 全称 Simulation of Urban Mobility，是一个开源、微观、多模态交通仿真模拟软件。在 sumo 仿

真文件中，可以通过相应代码及检测器，获取车辆的实时数据，因此本文基于 sumo 搭建智能网联环境，交叉口如下所示。在 sumo 中，检测器可以更改覆盖长度，因此，本文将检测器设置为覆盖整条道路，通过 python-Traci 接口，可以获得检测器每个仿真步长的车辆数据，同时在 sumo.gui 文件编辑获取车辆数据的代码，二者结合，以保证数据的精确性。

本文实验中，车辆最大减速度  $4.5 \text{ m/s}^2$ ，红灯时长为 37 s，道路长度 300 m，设置不同交通流分别为 400 pcu/h、500 pcu/h、600 pcu/h、700 pcu/h，并通过 python-Traci 接口设置不同的加速度变化参数，以模拟驾驶人心理特性及车辆性能。路网见图 2。

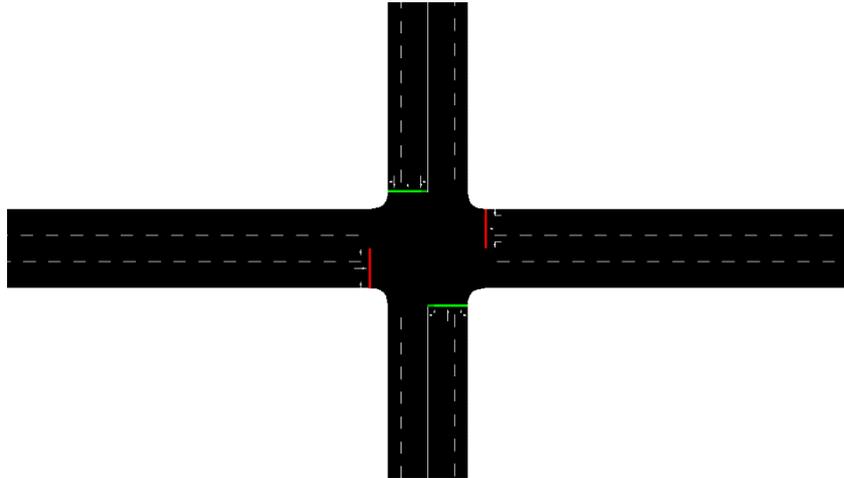


Figure 2. Simulation scenario  
图 2. 仿真场景

#### 4.2. 验证分析

根据实验方案，通过采集的数据计算排队长度，并于仿真模拟得到的排队长度进行对比，对比结果如下，其中对不同交通流量采集 7 个周期排队长度。仿真及模型估算结果见图 3、图 4。

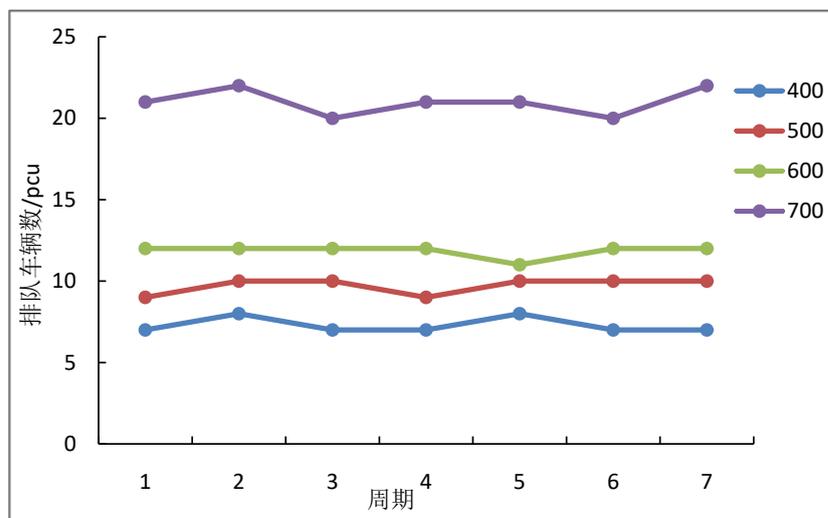
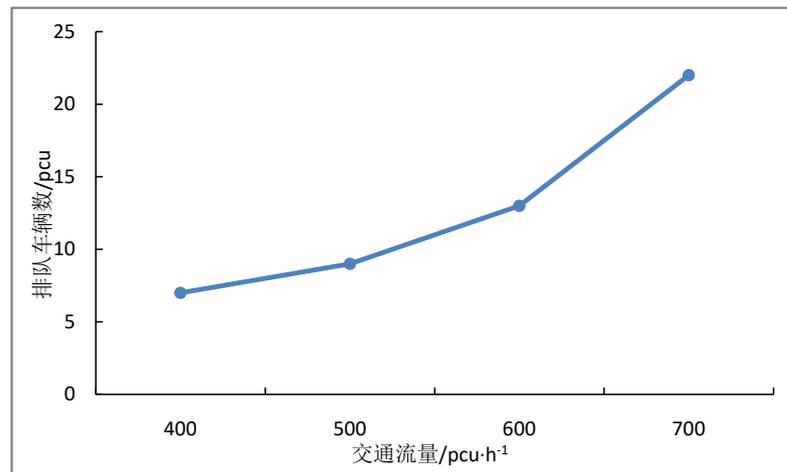


Figure 3. Comparison of queue length  
图 3. 不同车流量排队长度



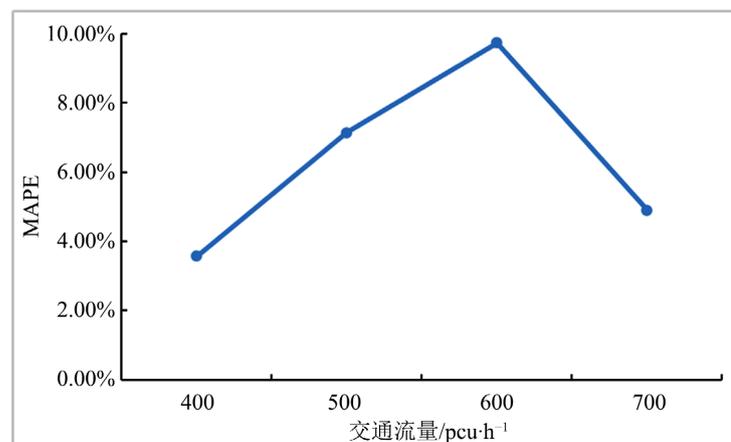
**Figure 4.** Estimation results of different traffic flow queue length models  
**图 4.** 不同车流量排队长度模型估算结果

通过 MAPE (平均绝对百分比误差)检测本文所提排队长度预测方法与仿真结果的误差, 检验模型可靠性, MAPE 可表示为:

$$M_{APE} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i^* - y_i}{y_i} \right| \quad (3-1)$$

$M_{APE}$  为平均绝对百分比误差;  $n$  为仿真周期数;  $y_i^*$  为通过模型估算的排队长度;  $y_i$  为仿真的排队长度。

不同交通流量下的 MAPE 值见图 5:



**Figure 5.** MAPE value of different traffic flow  
**图 5.** 不同车流量的 MAPE 值

由图 5 可以看出, 在不同交通流量下, MAPE 最大为 9.7%, 最小为 3.57%, 均小于 10%。因此, 本文的模型对智能网联环境下的排队长度估算准确度较高。

## 5. 结论

本文以 Krauss 模型为基础, 引入驾驶人心理特性、驾驶行为及车辆性能影响系数进行改进, 并结合

排队论理论及运动学公式,建立了智能网联环境下的信号交叉口排队长度估算模型。基于 sumo 对智能网联环境下的排队过程进行仿真,通过设置不同交通流量及驾驶人心理特性折减系数、驾驶行为折减系数及车辆性能折减系数,利用 python-traci 接口,实时采集车辆数据,将模型结果与仿真结果进行了对比,结果表明本文所提出的方法具有较高的准确度。

本文还存在一定的不足之处:① 驾驶人心理、行为及车辆性能折减是通过仿真模拟,无法做到与实际情景完全相同;② 本文的排队长度以红灯时长为区间,还需进一步考虑出现二次排队情况下的排队长度。

## 基金项目

国家自然科学基金资助(52102412);山东省自然科学基金面上项目(ZR2021MF019);山东省自然科学基金项目(ZR2021QF110);山东省科学技术厅(新一代信息技术)(2021TSGC1011);山东省重点研发计划(软科学)重点项目(2023RZB06052);山东省社会科学规划研究项目(22CJJJ31);山东省科学技术厅(新一代信息技术)(2022TSGC2096)。

## 参考文献

- [1] Muck, J. (2002) Using Detectors near the Stop-Line to Estimate Traffic Flows. *Traffic Engineering & Control*, **43**, 429-434.
- [2] Cho, H.J., Tseng, M.T. and Hwang, M.C. (2014) Using Detection of Vehicular Presence to Estimate Shockwave Speed and Upstream Traffics for a Signalized Intersection. *Applied Mathematics and Computation*, **232**, 1151-1165. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.12.180>
- [3] Comert, G. and Cetin, M. (2009) Queue Length Estimation from Probe Vehicle Location and the Impacts of Sample Size. *European Journal of Operational Research*, **197**, 196-202. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.06.024>
- [4] Ban, X.G., Hao, P. and Sun, Z.B. (2011) Real Time Queue Length Estimation for Signalized Intersections Using Travel Times from Mobile Sensors. *Transportation Research Part C*, **19**, 1133-1156. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.01.002>
- [5] Zhan, X., Li, R. and Ukkusuri, S.V. (2015) Lane-Based Real-Time Queue Length Estimation Using License Plate Recognition Data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **57**, 85-102. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.06.001>
- [6] Li, B., Cheng, W. and Li, L.S. (2018) Real-Time Prediction of Lane-Based Queue Lengths for Signalized Intersections. *Journal of Advanced Transportation*, **2018**, Article ID: 5020518. <https://doi.org/10.1155/2018/5020518>
- [7] 周学农. 排队长度模型比较及动态方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006(1): 91-95.
- [8] 孔涛, 刘新, 张茂雷. 信号控制交叉口排队长度估算方法研究[J]. 中国公共安全(学术版), 2015(2): 64-67.
- [9] 赵淑芝, 梁士栋, 马明辉, 刘华胜, 朱永刚. 信号交叉口实时排队长度估计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(1): 85-91.
- [10] 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.
- [11] 冯毅文. 基于大规模车辆轨迹数据的道路交叉口排队长度探测[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- [12] 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.
- [13] 龚方徽, 朱海峰, 温熙华, 刘彦斌. 基于车头时距与行程时间的排队长度算法[J]. 交通科技, 2020(1): 84-87.
- [14] 王宇林, 任安虎, 李珊. 一种基于深度学习的道路交叉口车辆排队长度检测方法[J]. 中国科技信息, 2023(4): 105-109.
- [15] 唐进, 于文雅. 车辆轨迹数据驱动的道路交叉口排队长度探测[J]. 湖南交通科技, 2022, 48(3): 208-214.
- [16] 金晨辉. 基于轨迹数据的信号交叉口排队长度估计研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2023.
- [17] 高宽. 混合交通环境下基于卡尔曼滤波的交叉口排队长度实时估计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022.