

# 交叉口排队的移动首尾模型及延误分析

李明利,秦 菁

(长安大学 信息工程学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:**根据车辆通过交叉口的实况,建立了移动首尾的排队模型,分析了车辆一次和二次排队的队列长度和延误,讨论了模型参数的检测方法。以队列首部和尾部的上移表示排队过程,以时段起动力率和时段停车率分别表示队列首部和尾部的移动速度;车辆排队长度和延误均与时段长度、时段停车率和起动力率有关,时段越短,计算结果越准确;快捷可行的时段停车率和起动力率检测方法采用交通流视频图像处理技术,其关键步骤是在一个时段内多次判定队首和队尾位置。该模型以较小的时段为单位,因此可以较准确地描述交叉口车辆排队和消散过程,且延误分析简单、准确。

**关键词:**交通工程;交叉口;排队;延误;移动首尾模型;时段停车率;时段起动力率

中图分类号:U491.264

文献标志码:A

## Moving head and tail model of vehicles' queuing at intersection and its delay analysis

LI Ming-li, QIN Jing

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** According to the reality of vehicles' transiting through an intersection, this paper establish the queuing model with moving the head and the tail, analyzes queuing length and delay with vehicles' once and twice queuing respectively, and discusses detection of parameters of the model. The model represents queuing with the head and the tail moving up individually, and depicts their speeds of movement by stop ratio and start ratio at time segment. Both queuing length and delay of vehicles are related to the length of time segment, stop ratio, start ratio. The shorter the time segment is, the preciser the calculating results are. Convenient and feasible detection of the stop ratio and start ratio is processing of traffic-flow video images, the key step is to judge the places of head and the tail several times within a time segment. The model takes shorter time segment as unit, so it can accurately describe vehicles queuing and dispersing at intersection, and the calculation of delay is simple and accurate. 1 tab, 2 figs, 13 refs.

**Key words:** traffic engineering; intersection; queuing; delay; moving head and tail model; stop ratio in time segment; start ratio in time segment

## 0 引言

信号交叉口车辆排队和延误是交通信号设计和调整、交通服务水平和路网运行效率评价的主要依据,也是交通工程学中交通流理论研究的重要内容,分析方法主要有波动论和排队论。波动论基于流体力学理论,以停车波和起动车波形象地描述排队的形成和消散过程<sup>[1-3]</sup>,但难于定量分析排队长度和交叉口延误;排队论用于建立交叉口延误模型,一般按照美国道路通行能力手册(HCM)将延误分为均匀延误、随机延误和过饱和延误,后两种延误习惯上定义为增量延误,常用的延误公式往往由均匀延误和增量延误两项构成<sup>[4-9]</sup>。文献[4]研究了信号控制交叉口均匀延误计算方法;文献[5-6]深入研究了在不饱和条件和饱和条件下的增量延误模型,并以实例与HCM中的计算结果进行了比较。这些模型都经过了严格的数学推导和分析,各变量物理意义明确,但也都是建立在一系列假定条件上的,如车辆到达率恒定且已知、无初始队列、车辆在停车线处排队、在饱和情况下取 15 min 分析时间等,有些假设与实际情况不符,因而模型并不能准确反映车辆在交叉口的实际排队和延误。波动论和排队论在宏观层面分析交叉口的排队和延误,都存在不足之处。为此,本文从微观角度研究了车辆排队,根据交叉口车辆排队的实际过程建立了移动首尾的排队模型,以此分析了交叉口排队长度和延误,讨论了视频图像处理检测模型参数的基本方法。

## 1 移动首尾的排队模型

### 1.1 交叉口车辆排队真实过程

车辆进入引道时,若条件允许,则不停车前进直至通过停车线;否则,在停车线之后停车等待,直至允许时又起动车前进。前一种情况车辆如同在路段行驶,后一种则须排队,因为在车道上串行到达,所以车辆按到达先后依次在队尾排队。因队列中的车距很近,车辆起动车也是从前至后依次进行的。排队总发生在队尾,而起动车总发生在队首。

### 1.2 移动首尾的排队模型

本文研究单车道上车辆排队的情形。以上分析表明,车辆队列存在期间,队列并没有整体向前移动,而是静止的。随着后续车辆加入尾部排队,队尾向上游移动;随队首车辆不断起动车离开,队首也向上游移动。队尾以一段时间到达车辆数的速度上移,队首在放行期间以一段时间起动车辆数的速度上

移,其间的队列长度不断变化。若队尾移动快于队首,则队列不断增长,此为队列形成;反之,则队列不断缩短,直至队列首尾重合,此为队列消散。

为了准确描述队列首尾移动速度,定义时段停车率和时段起动车率。将信号周期分成若干个均等的时段,一个时段内单位时间到达队列尾部排队的车辆数的平均值即为该时段的停车率(veh/s);一个时段内单位时间从队列首部起动车辆数的平均值即为该时段的起动车率(veh/s)。时段停车率和时段起动车率分别表示队列的尾部和首部上移的速度,它们与时段长度(s)乘积的累加和分别表示当前时段队尾和队首的位置(veh),二者之差表示当前时段队列长度(veh),如图 1 所示。其中图 1(c)表示绿灯期间队列完全消散之后车辆不停车前进;图 1(d)表示红灯期间旧队列消散和新队列形成的二次排队。与假定车辆到达率恒定、无初始队列、在停车线上垂直方向排队的分析方法相比,由于以较小的时段为单位,因此模型能更“精细”地描述排队,无论是在非饱和还是过饱和状态,随机性还是规律性到达的交通流,模型都能真实、准确地描述交叉口的排队过程。

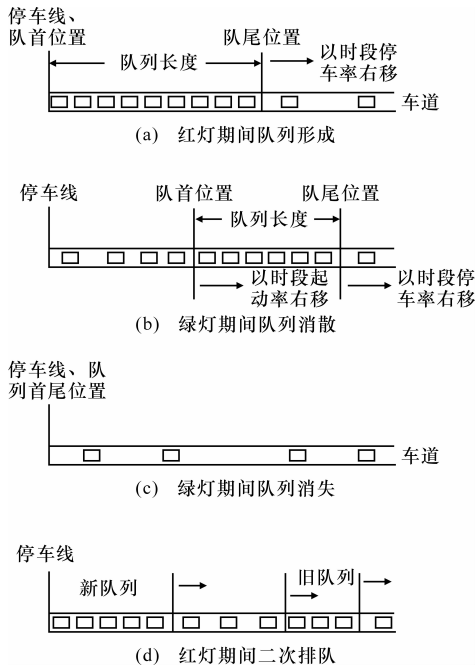


图 1 移动首尾的排队模型

## 2 交叉口延误分析

### 2.1 二次排队的延误分析

车辆在交叉口一次排队的情况较简单,二次排队的情形如下页图 2 所示。在周期 2 内存在尚未消散的旧队列,以及在停车线之后形成的新队列。车辆从旧队列首部不断向新队列尾部转移,旧、新队列

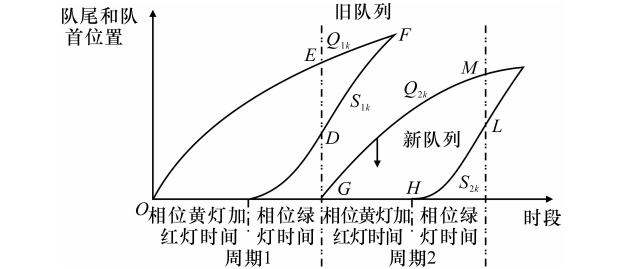


图2 二次排队和延误描述

都以各自的时段停车率和时段起动率变化,在F点对应的时刻旧队列消失,之后到来的车辆直接到达新队列尾部排队。时间以时段为单位; $Q_{1k}$ 、 $S_{1k}$ 分别为时段k旧队列的队尾和队首位置(veh); $Q_{2k}$ 、 $S_{2k}$ 分别为新队列的队尾和队首位置(veh),当前时段排队长度(veh)为队尾与队首位置之差。在周期2,排队长度为旧、新队列长度之和,总延误为两次排队的延误之和,即图1中DEF和GHLM表示的2个不规则封闭图形的面积之和。因此有

$$P_k = P_{1k} + P_{2k} = \Delta t \sum_{j=1}^k (q_{1j} - s_{1j} + q_{2j} - s_{2j}) \quad (1)$$

表1 交叉口的停车率和起动率

信号	黄灯加红灯					绿灯				
时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
停车率/(veh·s <sup>-1</sup> )	0.24	0.18	0.28	0.10	0.31	0.21	0.16	0.25	0.13	0
起动率/(veh·s <sup>-1</sup> )	0	0	0	0	0	0.37	0.47	0.50	0.53	0
排队长度/veh	1.20	2.10	3.50	4.00	5.55	4.75	3.20	1.95	0	0

以上分析和计算表明,采用移动首尾的排队模型分析交叉口延误,概念清楚,计算简单。因为以较精确的时段停车率和起动率表示队列变化,所以计算结果准确,其中包括了均匀延误、随机延误和过饱和延误。此外,还可分析最大排队长度、平均排队长度、队列消散的时间和位置等。

3 时段停车率和时段起动率检测

移动首尾排队模型可用来表示交叉口动态排队和分析延误,应用中必须实时检测时段停车率和时段起动率。近年来,随着计算机图像处理技术的发展,交通流视频图像处理越来越多地应用到交通信息检测领域,视频检测以其优越性代表了交通信息检测和采集的发展方向<sup>[10]</sup>,通过对视频图像进行不同的处理,检测流量、车速、车型、车头时距、排队长度等交通信息<sup>[11-13]</sup>。与传统检测法相比,检测时段停车率和起动率最快捷和有效的方法是交通流视频图像处理。文献[11-12]介绍了用图像处理技术检

$$D_t = \sum_{k=1}^n \Delta t P_{1k} + \sum_{k=1}^n \Delta t P_{2k} = \Delta t^2 \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^k (q_{1j} - s_{1j} + q_{2j} - s_{2j}) \quad (2)$$

式中: $P_k$ 为k时段排队长度(veh); $P_{1k}$ 、 $P_{2k}$ 分别为k时段旧队列和新队列的长度(veh); $\Delta t$ 为时段长(s); $q_{1j}$ 、 $s_{1j}$ 和 $q_{2j}$ 、 $s_{2j}$ 分别为在周期2的j时段旧队列的停车率、起动率和新队列的停车率、起动率(veh/s); $D_t$ 为周期2的总延误(veh·s); $n$ 为周期2的时段数。

排队长度和延误都与时段长度、时段行车率和时段起动率有关。在一定范围内,时段越短,停车率和起动率越能准确反映排队变化,因此延误的计算结果越准确。

2.2 排队和延误算例

某信号交叉口一个入口车道的时段停车率和起动率见表1。已知信号周期50s,分10个时段,每时段5s。车辆只有一次排队,计算的各时段排队长度见表1。可见在第9时段末队列完全消散,第10时段到达的车辆不排队直接通过。根据式(2)第一项计算的总延误为131.25veh·s。

测交叉口车辆排队实际长度的方法,均满足实时性要求,二者主要区别在于判断队列尾部的方法不同。文献[11]根据图像检测区域内角点的数目判定队列尾部;文献[12]通过对车辆运行检测和存在检测判断不断后移的队尾。队尾判定是文献[11-12]的关键。其实队首与队尾判定原理并无二致,队尾判定方法亦可用于队首判定,因此实时检测时段停车率和起动率是可行的。以文献[12]的判定方法为基础,时段停车率和起动率检测算法如下。

(1)在一个时段内每间隔一定时间判定一次队尾和队首。

(2)分析连续两次判定的队尾间相差的车辆数、队首间相差的车辆数。

(3)计算每次检测的停车率和起动率,由多次平均计算时段停车率和时段起动率。

时段长度越短,时段停车率和时段起动率描述排队越准确,但检测时段停车率和起动率的计算量也越大,因而时段长度不宜过短。时段长度选取应

综合考虑检测算法、信号周期延误准确度要求等因素。关于时段停车率和时段起动率具体的检测算法,时段长度取值范围及其与延误准确度之间的关系等问题,将另文研究。

## 4 结 语

(1)移动首尾的排队模型以队列首部和尾部的上移表示车辆排队,以时段起动率和时段停车率分别表示排队首部和尾部的移动速度,真实准确地描述了交叉口的排队过程。

(2)交叉口排队长度和延误都与时段长度、时段停车率和时段起动率有关,时段越短,描述排队越准确,延误计算结果越准确;利用该模型分析排队长度和延误,清楚、简单和准确。

(3)利用交通流视频图像处理方法检测时段停车率和时段起动率是快捷可行的,通过时段内多次判定队首和队尾,计算时段平均停车率和起动率。

## 参考文献:

## References:

- [1] 王殿海,景春光,曲昭伟.交通波理论在交叉口交通流分析中的应用[J].中国公路学报,2002,15(1):93-96.  
WANG Dian-hai, JING Chun-guang, QU Zhao-wei. Application of traffic-wave theory in intersections traffic flow analysis[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(1): 93-96.
- [2] 姚荣涵,曲大义,王殿海.基于运动学方程的停车波模型[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(5):1049-1052.  
YAO Rong-han, QU Da-yi, WANG Dian-hai. Stop-wave model based on kinematic equation[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(5): 1049-1052.
- [3] 魏丽英,田春林,杨正兵.信号交叉口排队分析模型比较研究[J].北方交通大学学报,2003,27(5):55-58.  
WEI Li-ying, TIAN Chun-lin, YANG Zheng-bing. A comparative analysis on queuing models at signalized intersection[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003, 27(5): 55-58.
- [4] 刘广萍,裴玉龙.信号控制下交叉口延误计算方法研究[J].中国公路学报,2005,18(1):104-108.  
LIU Guang-ping, PEI Yu-long. Study of calculation method of intersection delay under signal control[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 104-108.
- [5] 王嘉祺,程建川,王 昊.信号交叉口增量延误分析[J].交通与计算机,2005,23(5):13-16.

- WANG Jia-qi, CHENG Jian-chuan, WANG Hao. Analysis of increased delay in signalized intersection [J]. Computer and Communications, 2005, 23(5): 13-16.
- [6] 邵长桥,荣 建,马国旗.信号交叉口控制延误模型研究[J].公路交通科技,2004,21(3):86-88.  
SHAO Chang-qiao, RONG Jian, MA Guo-qi. Study on the control delay model[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(3): 86-88.
- [7] Chang T H, Lin J T. Optimal signal timing for an oversaturated intersection [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2000, 34(6): 471-491.
- [8] 陈绍宽,郭谨一,王 璇,等.信号交叉口延误计算方法的比较[J].北京交通大学学报,2005,29(3):77-80.  
CHEN Shao-kuan, GUO Jin-yi, WANG Xuan, et al. Analysis and simulation on signalized intersection delay[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 29(3): 77-80.
- [9] 马万经,杨晓光.信号控制交叉口实时延误计算与仿真研究[J].交通与计算机,2006,24(3):1-4.  
MA Wan-jing, YANG Xiao-guang. Real-time delay model and simulation for signalized intersection[J]. Computer and Communications, 2006, 24(3): 1-4.
- [10] 揣锦华,李续龙,许宏科.基于视频图像处理的交通流检测方法[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(5):86-89.  
CHUAI Jin-hua, LI Xu-long, XU Hong-ke. Traffic flow detection method based on video images processing[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 86-89.
- [11] 李 岩,张学工.应用图像处理方法自动检测路口车辆排队长度[J].计算机应用与软件,2003,20(12):47-49.  
LI Yan, ZHANG Xue-gong. Detecting the length of traffic queue by image processing[J]. Computer Applications and Software, 2003, 20(12): 47-49.
- [12] 贺晓锋,杨玉珍,陈阳舟.基于视频图像处理的车辆排队长度检测[J].交通与计算机,2006,24(5):43-46.  
HE Xiao-feng, YANG Yu-zhen, CHEN Yang-zhou. Vehicle queue length detection based on video image processing[J]. Computer and Communications, 2006, 24(5): 43-46.
- [13] 肖旺新,张 雪,黄 卫.视频交通图像自适应阈值边缘检测[J].交通运输工程学报,2003,3(4):104-107.  
XIAO Wang-xin, ZHANG Xue, HUANG Wei. Adaptive thresholds edge detection of traffic image [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 104-107.