

文章编号:1671-1637(2013)01-0098-06

## 信号交叉口饱和流率动态提取方法

杨东援, 罗江邻, 刘 翀, 段征宇

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘 要:**提出了利用感应线圈检测器动态提取饱和流率的方法,前后车辆离开线圈的时间差为车头时距,计算第4辆至最后一辆处于饱和状态车辆的平均饱和车头时距,运用指数平滑法处理历史饱和车头时距与当前周期饱和车头时距。确定了车型及饱和车头时距判断阈值,当线圈占用时间大于小型车平均占用线圈时间2倍时,判断为大型车,小型车的饱和车头时距判断阈值为历史平均值加1 s,大型车的饱和车头时距判断阈值为历史平均值加5 s。用VISSIM软件进行仿真,验证提取方法的有效性。仿真结果表明:动态提取方法能减少饱和车头时距突变的影响,当前周期车头时距骤减31.3%,饱和流率仅增加5.6%,5个周期的饱和流率分别为1 782、1 682、1 600、1 690、1 773 veh·h<sup>-1</sup>,而HCM模型的计算结果为1 680 veh·h<sup>-1</sup>。与传统方法相比,该方法能满足动态提取的需求,实施成本低。

**关键词:**信号交叉口;饱和流率;动态提取;饱和车头时距;阈值

**中图分类号:**U491.51

**文献标志码:**A

### Dynamic extraction method of saturation flow rate at signalized intersection

YANG Dong-yuan, LUO Jiang-lin, LIU Chong, DUAN Zheng-yu

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education,  
Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The dynamic extraction method of saturation flow rate by using induction coil detector was proposed. Taking the time difference of the front vehicle and the following vehicle when departing from an induction coil detector as headway, the average saturation headway from the fourth vehicle to the last vehicle in saturation state was calculated. The average saturation headways of history and current cycle were dealt with exponential smoothing method. Thresholds for judging vehicle type and saturation headway were determined. When the occupation time of a vehicle was more than twice of the average occupation time of small vehicle, the vehicle was judged as large vehicle. The threshold of saturation headway for small vehicle was historical average saturation headway adding 1 s, and that of large vehicle was historical average saturation headway adding 5 s. The validity of the proposed method was testified by using software VISSIM. Simulation result indicates that the dynamic extraction method can reduce the sudden change influence of saturation headway. When the saturation headway suddenly decreases by 31.3% in current cycle, the saturation flow rate only increases by 5.6%, and the saturation flow rates in 5 cycles are 1 782, 1 682, 1 600, 1 690, 1 773 veh·h<sup>-1</sup> respectively, nevertheless, the rate of HCM model is 1 680 veh·h<sup>-1</sup>. Compared with the traditional methods, the method meets

收稿日期:2012-08-19

基金项目:国家863计划项目(2011AA110305)

作者简介:杨东援(1953-),男,江苏南京人,同济大学教授,工学博士,从事交通运输规划研究。

the demand of dynamic extraction, and the implementation of the method is low-cost. 8 figs, 16 refs.

**Key words:** signalized intersection; saturation flow rate; dynamic extraction; saturated headway; threshold

**Author resume:** YANG Dong-yuan(1953-), male, professor, PhD, +86-21-69583775, yangdyk@yahoo.com.cn.

## 0 引言

城市道路交叉口是城市道路的咽喉,是制约城市道路交通功能的瓶颈。影响交叉口通行能力至关重要的一个参数就是交叉口饱和流率。交叉口饱和流率是指在一次连续的绿灯信号时间内,进口道上一列连续车队能通过进口道停止线的最大流量。饱和流率是计算交叉口通行能力,评价交叉口服务水平以及进行信号配时设计等必不可少的输入参数。目前,获取饱和流率的方法大致分为两类,模型计算法与实地测量法。不少国家都建立了饱和流率计算模型,如美国、英国、加拿大等,其中以美国的道路通行能力手册(Highway Capacity Manual, HCM)模型运用最为广泛。HCM模型综合考虑车道宽度、大车比例、进口道坡度、停车情况、公交阻挡、区域类型、车道利用、车道功能以及行人和自行车等因素的影响,在理想饱和流率的基础上乘以相应的校正系数得到饱和流率。实际运用中获取饱和流率最可靠的方法是直接通过现场测量来确定,首先测量饱和车流的平均饱和车头时距,然后根据其与流率的关系计算出饱和流率,这种方法不需要根据研究地点的具体道路几何与交通环境等进行修正,但无论是现场人工测量或视频录像的实地测量,都需要耗费大量的人力物力,如果要实现动态测量,成本将更高。

目前,国内外对于饱和流率的研究多集中在饱和流率影响因素及计算模型方面。Khosla等利用5个交叉口的实际数据研究了长绿灯时间对饱和流率的影响,结果表明没有显著影响<sup>[1]</sup>;Chen等对左转车道的饱和流率研究表明HCM与日本交通工程协会(Japan Society of Traffic Engineering, JSTE)模型均高估了左转车道饱和流率,估计误差随着行人和自行车流量的增加而增大<sup>[2]</sup>;Shao等研究了交通组成、车道宽度、车道坡度以及左转弯半径对饱和流率的影响,并给出了理想饱和流率推荐值与相关校正系数的计算方法<sup>[3]</sup>;杨晓光等根据实际数据分析了饱和车头时距分布以及车道宽度对饱和车头时距及

饱和流率的影响,建立了车道宽度、饱和车头时距以及饱和流率的关系模型<sup>[4]</sup>;刘意等建立了饱和流率、车道宽度、大车率以及车道数的一元回归关系模型及三元回归线性模型<sup>[5]</sup>;王进等采用回归分析的方法提出许可相位下左转专用车道、直左共用车道和一般直行车道的饱和流率修正系数计算模型<sup>[6]</sup>;董方等对饱和流率计算模型进行了研究<sup>[7-12]</sup>。上述研究主要在分析实际数据的基础上研究饱和流率的影响因素,并以此为基础建立饱和流率计算模型。然而因为影响因素很多,所以饱和流率并不是恒定不变的,而是随交通条件不断变化。模型计算法的计算结果为恒定值,不能反映饱和流率动态变化的特点,而且通常只在不能通过实地测量取得时才考虑使用模型计算方法进行估计,如新建交叉口。

本文充分利用了目前城市道路交叉口广泛布设的线圈检测器所记录的数据来提取饱和流率,该方法能够适应交通状态不断变化的特点,动态采集交叉口饱和流率,有助于实时掌握交叉口的通行能力,为交通控制方案的制定提供支持。

## 1 饱和流率动态提取方法

经车道划分并加以渠化以后,交叉口进口车道饱和流率随车道数以及渠化方案的变化而变化,所以实际获取交叉口某一进口车道的饱和流率时,必须分别计算各条进口车道的饱和流率,然后再累加成进口道的饱和流率。各车道饱和流率 $S$ 可以通过饱和车头时距 $h$ 得到

$$S = 3\,600/h \quad (1)$$

在实际研究中,取队列中的第几辆车作为计算饱和车头时距的起点并没有一个确切的结论,取第4~7辆车的都存在<sup>[1,13-15]</sup>。一般认为队列中初始的3~5辆车存在启动延误,饱和车头时距的计算起点取第4~6辆车比较符合实际情况,因此,本文取第4辆车作为饱和车头时距的计算起点。另外,提取饱和车头时距时规定,能够提取饱和车头时距的车道必须满足周期内到达的车辆数不少于7 veh,而且处于饱和流状态的车辆数不少于4 veh。当前

周期的饱和和车头时距提取算法如下。

Step 1: 当该周期绿灯开启时, 记录绿灯开始时间  $t_0$ , 用以计算第 1 辆车的车头时距。

Step 2: 记录各辆车依次经过线圈的到达时间和离开时间, 车辆  $i$  的到达与离开时间分别为  $t_i$ 、 $T_i$ 。

Step 3: 检验周期内该车道到达的车辆数是否大于等于 7 veh, 如果少于 7 veh, 则停止计算, 否则继续。

Step 4: 根据车辆到达与离开线圈时间, 计算各车辆占用线圈的时间, 第 1 辆车的占用时间  $O_1$  取车辆离开线圈时间  $T_1$  减去绿灯开启时间  $t_0$ , 后续车辆  $i$  的线圈占用时间  $O_i$  为

$$O_i = T_i - t_i \quad (2)$$

Step 5: 根据车辆离开线圈时间计算饱和和车头时距, 以车尾通过线圈为准。第 1 辆车的车头时距  $h_1$  取该车辆离开线圈时间  $T_1$  减去绿灯开启时间  $t_0$ , 后续车辆  $i$  的饱和和车头时距  $h_i$  为

$$h_i = T_i - T_{i-1} \quad (3)$$

Step 6: 当车辆的线圈占用时间大于大型车的判断阈值时, 判断经过车辆为大型车, 否者为小型车。

Step 7: 在判断车辆类型的基础上, 根据大小车型的饱和和车头时距判断阈值分别判断车辆是否处于饱和和流状态, 判断从第 4 辆车开始的各车辆车头时距是否为饱和和车头时距, 当某辆车的车头时距超过了设定的饱和和车头时距阈值, 则认为从该辆车开始, 之后的车流为非饱和和车流。

Step 8: 判断处于饱和和流状态的车辆数量是否大于等于 4 veh, 如果满足此条件, 则继续计算, 否则停止计算。

Step 9: 计算从第 4 辆车开始的各饱和和车头时距的平均值, 作为当前周期的饱和和车头时距  $h_a$ 。

$$h_a = \frac{1}{n-3} \sum_{i=4}^n h_i \quad (4)$$

式中:  $n$  为处于饱和和流状态的最后一辆车的位置。

至此, 当前周期的饱和和车头时距已经得到。但是, 由于交通状况等条件的影响, 例如大型车的比例突然增加, 会造成当前周期的饱和和车头时距产生突变, 如果直接将通过这样的饱和和车头时距计算出来的饱和和流率用于交叉口服务水平评价或信号配时设计, 会产生很大偏差。为了减少当前周期饱和和车头时距突变带来的不良影响, 采用指数平滑法对历史平均饱和和车头时距和当前周期饱和和车头时距进行平

滑处理

$$\bar{h}_a = 0.25h_a + 0.75H \quad (5)$$

式中:  $\bar{h}_a$  为当前周期平滑处理后的平均饱和和车头时距;  $H$  为历史平均饱和和车头时距, 对于当前周期而言,  $H$  取前一周期平滑后的平均饱和和车头时距。

根据式(1)可以得到饱和和流率为

$$S = 3\,600/\bar{h}_a \quad (6)$$

## 2 饱和和车流判定

由饱和和流率提取方法可知, 计算饱和和车头时距的关键是判定车辆是否处于饱和和流状态, 即判定饱和和车流的最后一辆车的位置。本文通过相关文献以及建立仿真模型来确定判断饱和和车流的阈值。

大型车性能条件与小型车有很大的差异, 造成大型车与小型车的饱和和车头时距有很大的差别, 因而准确判断出饱和和车流中的大型车十分重要。当有大型车经过线圈检测器时, 饱和和车头时距会有所增加, 相关文献发现大型车辆的饱和和车头时距比小型车多 2.0~5.0 s<sup>[1,7,9,16]</sup>, 当线圈检测到当前车辆的占用时间大于小型车平均占用时间的 2 倍时, 判断该车辆为大型车<sup>[14]</sup>。

使用 VISSIM 软件建立模型进行仿真, 确定饱和和车头时距的判断阈值。建立一个双车道的仿真路段模型, 路段长 300 m, 每车道宽 3.5 m, 坡度为 0, 车道功能为直行车道, 信号周期为 60 s, 绿灯时间为 30 s, 输入车辆全为小型车辆, 仿真 10 个周期, 在系统预热 2 个周期后开始记录数据, 计算其中一条车道每个周期处于饱和状态车辆的车头时距。仿真结果见图 1、2, 由结果可知小型车的饱和和车头时距总体波动不大, 不过也有少数偏离均值的程度较大, 考虑将此设为饱和和车头时距的上限。仿真得到的平均饱和和车头时距为 1.91 s, 饱和状态下, 偏离均值最大的饱和和车头时距为 2.98 s, 所以将小型车饱和和车头时距的判断阈值定为平均饱和和车头时距加 1 s 比较符合实际情况。

综合上述分析, 饱和和流率提取算法中 Step 6 的大型车判断阈值取小型车平均占用时间的 2 倍, 即当线圈检测到当前车辆的占用时间大于小型车平均占用线圈时间的 2 倍时, 判断该车辆为大型车。小型车平均占用线圈时间取上一周期处于饱和状态的小型车线圈占用时间的平均值。算法中 Step 7 的饱和和车头时距判断阈值取值如下: 小型车饱和和车头时距的判断阈值定为历史平均饱和和车头时距加 1 s, 大型车饱和和车头时距的判断阈值为历史平均饱和和

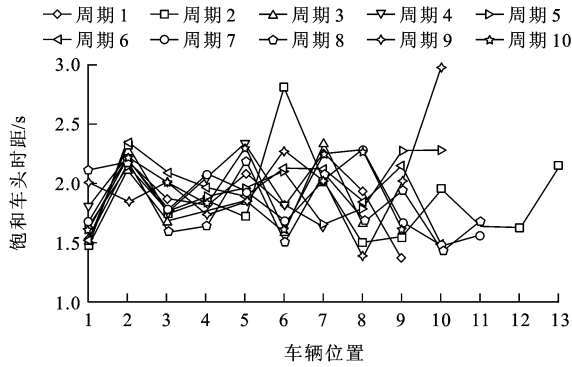


图1 各周期饱和车头时距

Fig. 1 Saturation headways of each cycle

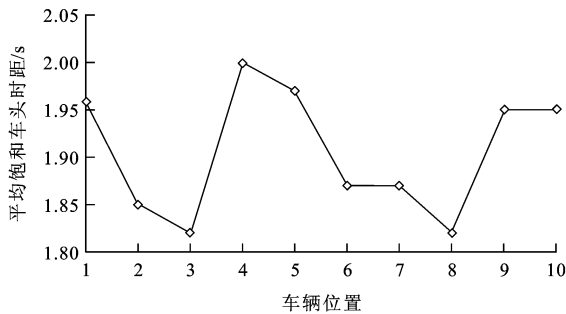


图2 平均饱和车头时距

Fig. 2 Average saturation headways

头时距加 5 s。根据饱和车头时距的阈值即可判断车流是否为饱和车流,如果当前车辆的车头时距超过了相应车型的阈值,则认为从该车辆起为非饱和车流,计算平均饱和车头时距时从该车辆截断。

### 3 仿真结果分析

为了验证算法的有效性,仍然采取上文建立的仿真模型进行仿真,输入车辆中包括大型车,根据仿真得到的数据计算车头时距,并用车头时距判断阈值来判断车流是否处于饱和状态,最后计算出当前周期平均饱和车头时距,并和历史平均值进行平滑处理。

系统预热 5 个周期后记录接下来 5 个周期的车流数据。为了得到初始输入参数,先观察判断第 1 个周期处于饱和状态的车流,根据仿真数据计算出该周期的平均车头时距以及小型车平均占用时间,以此作为后续计算的初始化参数。

第 1 周期仿真结果见图 3,其中第 1~7 辆车处于饱和状态,因而计算第 4~7 辆车的平均饱和车头时距,即当前周期平均饱和车头时距为 2.02 s,小型车平均占用线圈时间为 0.66 s,初始化参数  $H_1 = \bar{h}_{a1} = h_a = 2.02$  s,  $S$  为  $1\,782 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $O$  为 0.66 s。

第 2 周期仿真结果见图 4,第 7 辆车的占用线圈时间  $O_7 > 2O$ ,因而判断为大型车辆,  $h_7 = 5.19 <$

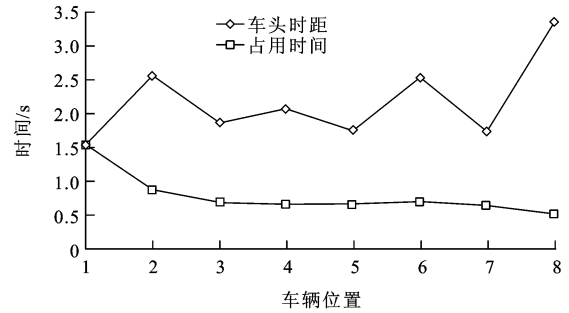


图3 第1周期仿真结果

Fig. 3 Simulation result of the first cycle

$H_1 + 5 = 7.02$  s,判断该车辆处于饱和流状态,第 10 辆车车头时距  $h_{10} = 7.15 > H_1 + 1 = 3.02$  s,则认为从该车辆起的车流为非饱和车流,故计算第 4~9 辆车的平均饱和车头时距,  $h_a$  为 2.50 s,该周期  $O$  为 0.67 s,  $\bar{h}_{a2} = 0.25h_a + 0.75H_1 = 2.14$  s,此时可以计算出饱和流率  $S$  为  $1\,682 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ ,令  $H_2 = \bar{h}_{a2}$ ,进行下一周期计算。

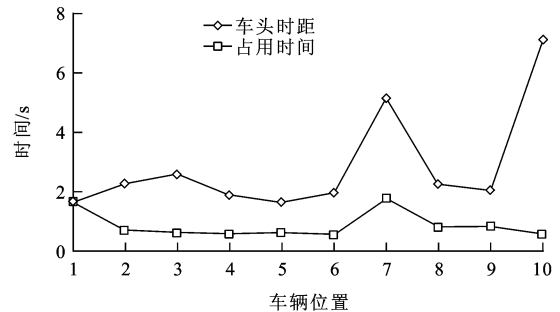


图4 第2周期仿真结果

Fig. 4 Simulation result of the second cycle

第 3 周期仿真结果见图 5,  $O_8 > 2O$ ,因而判断第 8 辆车为大型车,  $h_8 = 5.36 < H_2 + 5 = 7.14$  s,判断该车辆处于饱和流状态,  $O_{10} > 2O$ ,第 10 辆车也为大型车,车头时距  $h_{10} = 8.57 > H_2 + 5 = 7.14$  s,则认为从该车辆起的车流为非饱和车流,故计算第 4~9 辆车的平均饱和车头时距  $h_a$  为 2.56 s,  $O$  为 0.62 s,  $\bar{h}_{a3} = 0.25h_a + 0.75H_2 = 2.25$  s,  $S$  为  $1\,600 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ ,令  $H_3 = \bar{h}_{a3}$ ,转入下一周期计算。

第 4 周期仿真结果见图 6,  $O_3 > 2O$ ,因而判断第 3 辆车为大型车,  $O_{11} > 2O$ ,第 11 辆车也为大型车,车头时距  $h_{11} = 7.58 > H_3 + 5 = 7.25$  s,则认为从该车辆起的车流为非饱和车流,故计算第 4~10 辆车的平均饱和车头时距  $h_a$  为 1.76 s,  $O$  为 0.66 s,  $\bar{h}_{a4} = 0.25h_a + 0.75H_3 = 2.13$  s,  $S$  为  $1\,690 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ ,令  $H_4 = \bar{h}_{a4}$ ,转入下一周期的计算。

第 5 周期仿真结果见图 7,该周期所有车辆都

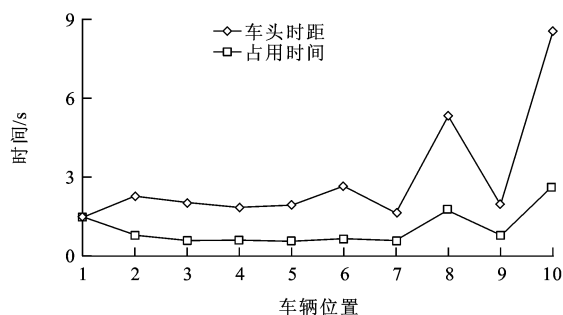


图 5 第 3 周期仿真结果

Fig. 5 Simulation result of the third cycle

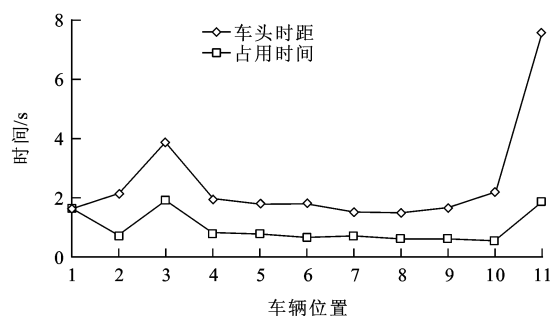


图 6 第 4 周期仿真结果

Fig. 6 Simulation result of the fourth cycle

处于饱和状态,所以计算第 4~16 辆车的平均饱和车头时距  $\bar{h}_a = 1.72$  s,  $O$  为 0.60 s,  $\bar{h}_{a5} = 0.25\bar{h}_a + 0.75H_4 = 2.03$  s; 可以计算出饱和流率  $S$  为  $1\,773 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

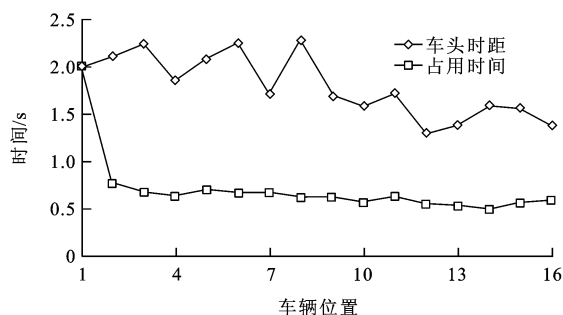


图 7 第 5 周期仿真结果

Fig. 7 Simulation result of the fifth cycle

由以上算例可见,本文提出的车型判断阈值在计算的 4 个周期均能够判断出当前经过的车辆是否为大型车,能够反映大型车对饱和流率的影响。采用的饱和车头时距判定阈值也能够判断出车辆是否处于饱和流状态,从而找出处于饱和状态的最后一辆车,以计算平均饱和车头时距。大型车的存在对平均饱和车头时距有较大影响,本文采用的指数平滑法可以消除某一周期饱和车头时距骤变带来的影响,能够阻止其放大大型车的效果。5 个周期饱和车头时距和饱和流率变化见图 8,可以看出,在

第 2 周期,由于大型车辆的存在导致当前周期平均饱和车头时距增加了 23.8%,但是平滑处理后饱和车头时距变化没有那么剧烈,仅增加了 5.9%,饱和流率的波动也是在较小的范围内,减少了 5.6%,而第 4 周期平均饱和车头时距较第 3 周期骤减了 31.3%,但平滑后的饱和车头时距仅减少了 5.3%,饱和流率增加了 5.6%。

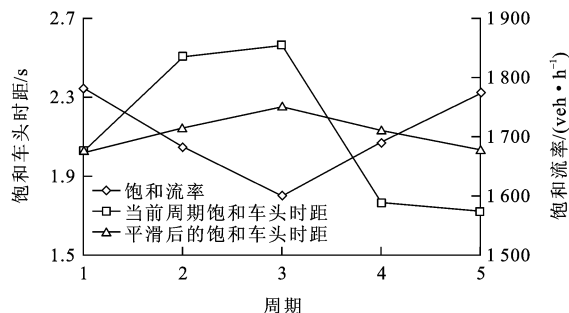


图 8 五个周期饱和车头时距和饱和流率变化

Fig. 8 Saturation headways and saturation flow rates of five cycles

将以上计算结果与 HCM 模型计算结果进行了比较。HCM 算法在理想饱和流率的基础上进行一系列修正,对于该算例,根据 HCM 中模型校正系数的取值方法,理想饱和流率取  $1\,900 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ,宽度修正系数为 0.98, 大车修正系数为 0.95, 停车修正系数为 0.95, 其他修正系数取 1, 可以求得饱和流率  $S$  为  $1\,680 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ , 显然模型计算方法无法反应饱和流率随交通状态等因素变化而变化的特征。图 8 中 5 个周期饱和流率分别为  $1\,782$ 、 $1\,682$ 、 $1\,600$ 、 $1\,690$ 、 $1\,773 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ , 本文动态提取方法能够反应出饱和流率随交通状态变化而变化的特征。

## 4 结 语

通过交叉口停车线前线圈采集的交通数据来获取饱和车头时距,本文提出了获取饱和车头时距的详细方法,为了避免当前周期饱和车头时距突变带来的不良影响,采用指数平滑的方法对历史平均饱和车头时距和当前周期饱和车头时距进行平滑,得到均值,进而计算饱和流率。

动态提取方法的关键环节为判断车流是否处于饱和流状态,本文提出判断大型车的线圈占用时间阈值,提出了判断车流是否处于饱和流状态的阈值。对饱和车头时距判断阈值的深入研究,可通过调查不同城市的不同道路条件、不同转向、不同交通条件下各种车型的饱和车头时距分布情况进行综合分析。

本文的动态提取方法利用的是目前广泛使用的感应线圈检测器,基本无需额外成本即可实现,同时可以满足动态采集饱和流率的需求,而且能避免大量的人工调查成本,具有一定的实用价值。

## 参考文献:

## References:

- [1] KHOSLA K, WILLIAMS J C. Saturation flow at signalized intersections during longer green time[J]. Transportation Research Record, 2006(1978): 61-67.
- [2] CHEN P, NAKAMURA H, ASANO M. Saturation flow rate analysis for shared left-turn lane at signalized intersections in Japan[J]. Procedia Social and Behavioral Sciences, 2011(16): 548-559.
- [3] SHAO Chang-qiao, RONG Jian, LIU Xiao-ming. Study on the saturation flow rate and its influence factors at signalized intersections in China[J]. Procedia Social and Behavioral Sciences, 2011(16): 504-514.
- [4] 杨晓光,庄斌,李克平. 信号交叉口饱和流率和启动延误的影响分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 34(6): 738-743.  
YANG Xiao-guang, ZHUANG Bin, LI Ke-ping. Analysis of saturation flow rate and delay at signalized intersection[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(6): 738-743. (in Chinese)
- [5] 刘意,张永,任刚. 信号交叉口直行车道饱和流率研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010, 8(3): 62-67.  
LIU Yi, ZHANG Yong, REN Gang. Analysis of saturation flow rate of the through lanes at signalized intersections[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2010, 8(3): 62-67. (in Chinese)
- [6] 王进,杨晓光. 许可相位下饱和流率修正系数研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(9): 94-99.  
WANG Jin, YANG Xiao-guang. Study on correction coefficient of saturation flow rate under permissive phase[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(9): 94-99. (in Chinese)
- [7] 董方. 北京城市交叉口饱和流量及通行能力研究[D]. 北京:北京工业大学, 2010.  
DONG Fang. Research on saturated flow and capacity of signalized intersections in Beijing[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] 赵林,邵长桥,荣建. 交通组成对信号交叉口饱和流率影响研究[J]. 公路工程, 2008, 33(4): 88-91.  
ZHAO Lin, SHAO Chang-qiao, RONG Jian. Analysis of traffic composition affecting saturation flow at signalized intersection[J]. Highway Engineering, 2008, 33(4): 88-91. (in Chinese)
- [9] 赵林,邵长桥,荣建,等. 信号交叉口右转弯车道饱和流率部分影响因素研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2011, 35(5): 873-876.  
ZHAO Lin, SHAO Chang-qiao, RONG Jian, et al. Analysis of some factors affecting right-turning saturation flow at signalized intersection[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering Edition, 2011, 35(5): 873-876. (in Chinese)
- [10] 赵林,邵长桥,王子雷,等. 设计时速与直行车道数对饱和流率的影响分析[J]. 交通标准化, 2009(1): 89-92.  
ZHAO Lin, SHAO Chang-qiao, WANG Zi-lei, et al. Influence of design speed and number of through lanes on saturation flow rate[J]. Communications Standardization, 2009(1): 89-92. (in Chinese)
- [11] 赵星,任刚. 信号交叉口车头时距特性分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010, 8(1): 103-108.  
ZHAO Xing, REN Gang. Analysis of vehicle headway characters at a signalized intersection[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2010, 8(1): 103-108. (in Chinese)
- [12] 吴震,杨晓光. 信号交叉口右转弯车道饱和流量研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2008, 36(1): 37-41.  
WU Zhen, YANG Xiao-guang. Research on saturation flow of right-turning lane at signalized intersection[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(1): 37-41. (in Chinese)
- [13] LI H, PREVEDOUROS P D. Detailed observations of saturation headways and start-up lost times[J]. Transportation Research Record, 2002(1802): 44-53.
- [14] HENDERSON I, WOOD K. Computerised real-time saturation flow measurement for signalised traffic junctions[R]. London: Transport Research Laboratory, 2005.
- [15] BESTER C J, MEYERS W L. Saturation flow rates[C]// SATC. Proceedings of the 26<sup>th</sup> Southern African transport conference. Pretoria: SATC, 2007: 560-568.
- [16] 刘明君. 基于混合交通流的信号交叉口机动车车头时距研究[D]. 北京:北京交通大学, 2010.  
LIU Ming-jun. Modeling on discharge headway with heterogeneous traffic at signalized intersections[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)