

# 基于路段下游检测线圈的路段行程时间估计

杨兆升<sup>1,2</sup>, 高学英<sup>2</sup>, 林赐云<sup>2</sup>, 孙迪<sup>2</sup>

(1. 吉林大学 汽车动态模拟国家重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学 交通学院, 长春 130022)

**摘要:** 为解决路段下游线圈检测信息因受交通控制信号影响无法估计路段行程时间的问题, 通过分析车辆在停车线处的动力特性, 利用牛顿运动定律, 对路段下游线圈检测车速进行分析修正, 获取车辆通过停车线的修正车速. 分析了车辆排队前部与其后车辆在通过下游检测线圈的不同运动特性, 分段估计车辆通过路段的时间. 用 VISSIM 4.20 模拟软件设计实验, 对比分析了基于路段上下游线圈检测信息进行的路段行程时间估计结果. 实验结果表明, 利用提出方法估计的结果较基于上游检测信息估计结果的准确性和稳定性均有提高.

**关键词:** 交通运输系统工程; 路段平均行程时间; 检测线圈; 检测速度; 启动延误

**中图分类号:** U 491

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2010)06-0790-06

智能运输系统 (intelligent transportation systems ITS) 是当前公认的解决城市交通问题的有效手段, 其主要机理是通过道路交通控制系统与交通流诱导系统的协同运作, 从空间和时间上合理分配路网交通流, 从而取得更好的交通管理效果<sup>[1-2]</sup>. 实时的路段行程时间是智能运输系统的重要基础<sup>[3]</sup>. 路段行程时间的估计主要是基于动态和静态 2 种信息检测方式进行的. 固定检测方式主要包括摄像机、感应线圈、超声波检测器、雷达检测器, 检测数据稳定、精度高, 并且这些固定检测器大多服务于控制系统. 用控制系统检测信息估计路段行程时间, 既能为诱导系统提供重要信息, 又可最大限度地减少资金投入.

当前应用最为广泛的固定检测器为感应线圈, 基于固定检测信息估计路段行程时间很多是基于线圈进行的<sup>[4-6]</sup>, 且所利用的大都为布设在路段上游或路段中游的线圈检测数据, 而布设在路段下游的单线圈检测速度由于受到信号控制的较大影响, 一般认为不能用于估计行程时间, 或需要结合上中游检测速度共同来完成行程时间的估计<sup>[7-9]</sup>.

作者研究了车辆在交叉口处的运行特性, 尤其对车辆在通过停车线前后运行特性进行深入分析, 并对下游检测线圈提供的速度进行修正处理, 由此进行路段行程时间的估计.

## 1 路段行程时间定义

本文定义的路段行程时间是指在分析时段内某一路段上所有通过车辆的平均行程时间. 路段包含其下游交叉口. 如图 1 所示, 根据车辆在交叉口处行驶方向不同, 分为直行路段 AB、左转路段 AC 和右转路段 AD, 其中 AE 段为不包含下游交叉口的基本路段.

因此, 路段行程时间的组成大体可分为 3 部分, 即路段平均行驶时间 (图 1 中 AE 段)、交叉口车辆平均延误时间、下游交叉口 (图 1 中的 EB、EC、ED) 平均通过时间, 表达式为

$$T = T_r + d + T_k \quad (1)$$

式中,  $T$  为路段行驶时间;  $T_r$  为路段平均行驶时间;  $d$  为交叉口平均延误时间;  $T_k$  为下游交叉口平均通过时间.

收稿日期: 2009-08-12

基金项目: 国家“八六三”计划资助项目 (2007AA12Z242, 2007AA11Z245).

作者简介: 杨兆升 (1939-), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士生导师.

## 2 路段平均行驶时间估计

### 2.1 路段下游线圈检测速度获取

单线圈可以检测流量、占有率及速度信息<sup>[10]</sup>,但服务于某些控制系统的线圈不提供速度信息,如目前广为应用的 SCATS 系统的检测线圈,由于该系统内部没有速度的需求,因此检测信息不包含速度. 基于城市交通流诱导系统的需要,同时考虑建设成本问题,可对 SCATS 系统的信号机的通信协议进行修改,使其提供速度,或从环形线圈的检测处理单元直接获取速度信息(单线圈本身可以检测速度),由此估计路段行程时间.

### 2.2 路段下游线圈检测速度分析

布设在路段下游的线圈,由于控制信号的原因,其检测速度受到较大的影响,不能直接用于路段行程时间的估计,需要对其进行修正处理. 本文将 SCATS 系统检测线圈为例对路段下游线圈检测速度进行分析.

SCATS 系统线圈通常布设在停车线后 1 m 左右,如图 1 所示. 由于信号影响,若在红灯期间有排队,则停驶的车辆会从静止启动加速,距离停车线较近的排队车辆通过停车线时速度较低. 经过大量的实验观测,发现通过停车线时速度受到较大影响的仅为绿灯启亮后的前 4 辆排队车辆<sup>[11]</sup>. 因此,除去前 4 辆排队车,该路段相位内其他通过车辆可认为未受信号影响,可用其估计路段行驶速度,其思想可描述为

$$v = \frac{1}{N-4} \sum_{i=5}^N v_i = \frac{Nv' - v_1 - v_2 - v_3 - v_4}{N-4} \quad (2)$$

式中,  $v$  为处理后消除信号影响的检测平均速度;  $v'$  为绿灯相位内检测地点平均速度;  $v_i$  为受影响的第  $i$  辆排队车辆通过线圈速度,  $i=1, 2, 3, 4$ ;  $N$  为绿灯相位内通过的车辆数,  $N \geq 4$ .

由于当前城市机动车保有量非常大且持续增加,导致城市道路车流量普遍很大,因此在绿灯启亮时,排队车辆  $N \geq 4$  是非常普遍的现象. 本文的研究就是基于信号相位内车辆排队较长 ( $N \geq 4$ ),但不是很拥堵的交通状况进行的.

### 2.3 受影响车辆速度估算

对于排队前 4 辆车,当绿灯启亮后,车辆为了尽快离开交叉口,会在合理范围内尽可能地将速度提升到道路允许的最大速度. 由于重型车限行、公交专用道等的作用以及车辆在启动时的相互影响等因素,同一时段内车辆动力特性相差不大,可用车辆的平均加速度  $a$  近似代表通过车辆的动力特性,即近似认为此时车辆动力性能相同,当有少量车型混行时,将车辆均换算成标准车型处理. 对于车辆的平均加速度  $a$ ,可根据运动力学定律进行计算,公式为<sup>[12]</sup>

$$D = f + \delta a / g \quad (3)$$

式中,  $D$  为车辆动力因素;  $f$  为滚动阻力系数;  $\delta$  为汽车旋转质量换算系数;  $g$  为重力加速度.

当绿灯启亮,认为前 4 辆排队车辆以加速度  $a$  从其停驶地点加速行进,该部分车辆到线圈的距离如图 1 所示,分别为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  和  $S_4$ . 用车辆的平均有效车长(平均车身长度与停驶车辆间平均安全距离之和)  $l$  来估计以上 4 个距离. 其中,由于第 1 辆车停驶在线圈上,认为  $S_1$  为 0. 利用牛顿动力学公式计算车辆通过线圈速度,公式为

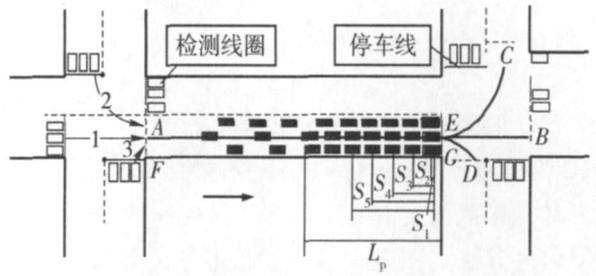


图 1 城市道路路段定义

Fig 1 Definition of urban road section

$$2aS_i = v_i^2 - v_0^2, \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

式中,  $v_i$  为第  $i$  辆车以  $a$  加速行驶到线圈的速度;  $v_0$  为启动速度,  $v_0 = 0$ .

经过调查及有关资料确认参数, 即可通过式 (2) ~ 式 (4) 估算车辆通过线圈的修正平均速度.

## 2.4 路段平均行驶速度分析

修正的下游检测速度, 经过调查观测及统计分析发现其值仍低于路段上游检测平均速度, 这是因为绿灯启亮后, 停驶的车辆排队通过停车线, 车辆间车头时距很小, 可认为以饱和流率驶过线圈, 速度受到较大限制, 这与路段上游车辆以较大自由度运行状况有很大不同, 由此, 造成速度较低. 另外, 驾驶员的心理、交叉口不同方向车辆的相互干扰也会对速度有一定影响.

根据车辆在图 1 所示的基本路段 AE 上的运行特性, 可将车辆的运行速度分 2 段研究: 第 1 段为绿灯启亮前最大排队区域, 即图 1 中的  $L_p$  段; 第 2 段为  $AE - L_p$  段, 记为  $L_r$ .  $L_p$  的计算可参考定数理论, 计算式为<sup>[13]</sup>

$$L_p = lN_{di} \quad (5)$$

$$N_{di} = Qr + N_{di-1} \quad (6)$$

式中,  $N_{di}$  为绿灯启亮时排队车辆数;  $Q$  为进口方向的通行能力,  $Q = Sg/C$ .  $S$  为饱和流率,  $g$  为车辆平均到达率,  $C$  为信号周期;  $r = C - g$ ,  $g$  为有效绿灯时长;  $N_{di-1}$  为上一周期滞留车辆数.

计算排队长度需要用到交叉口的到达交通量  $q$  但路段下游交叉口无法获得本路段的  $q$  所以本文基于罗伯逊方法<sup>[13]</sup>进行计算. 罗伯逊方法是基于上下游交叉口周期相同或是固定倍数关系的前提估计的. 这里对罗伯逊方法进行一定的处理, 使其适应如 SCATS 等变周期控制系统的检测线圈, 表达式为

$$q_b(i) = Fq_b(i-t) + (1-F)q_b(i-1) \quad (7)$$

式中,  $q_b(i)$  为第  $i$  个绿灯相位路段下游停车线 (图 1 中 EG) 预计的车辆到达率;  $q_b(i-t)$  为第  $i-t$  时间点最近的周期内上游交叉口路段入口截面 (图 1 中 AF) 的车辆通过率;  $t$  为上述 2 个截面间车辆的平均行驶时间的 0.8 倍, 代表车队中速度最快的一辆车从上游停车线到下游观测断面的行驶时间;  $F$  为车流离散系数, 取  $F = 1/(1+0.35t)$ . 为表达方便, 下文中提到的  $q$  即为  $q_b(i)$ .

在近似饱和流率状况下, 车辆通过线圈的速度值可直接用修正的地点速度作为  $L_r$  的平均行驶速度, 然而, 在  $L_r$  段中, 车辆的平均行驶速度一般由路段上游线圈检测的地点车速估算得到, 计算公式为

$$\bar{v}_s = \bar{v}_i - \sigma_i^2 / \bar{v}_i \quad (8)$$

式中,  $\bar{v}_s$  为路段行驶速度;  $\bar{v}_i$  为上游地点速度;  $\sigma_i^2$  为地点速度观测方差.

式 (8) 中的地点速度是路段上游检测地点速度, 可用修正的下游检测速度估计得到. 由于修正的路段下游检测速度仍低于上游检测速度, 经过多次的调查分析, 用修正的下游检测速度乘以一个修正系数, 将其近似转化为上游检测速度, 再利用式 (8) 估算行驶速度, 上下游地点速度转换公式为

$$\bar{v}_i = kv \quad (9)$$

修正系数  $k$  取值受流量的影响, 当路段交通量大时, 上游速度也会受影响, 因此  $k$  值较小; 而当交通量较小的时候, 上游车辆间相互影响小, 车速较大, 因此  $k$  值较大. 经调查统计分析可得到不同流量下较为准确的  $k$  值. 修正某路段上游检测速度使用的是其相邻上游路段直行方向的下游检测线圈的修正检测速度.

由此便得到了路段的行驶时间  $T_r$

$$T_r = \frac{L_r - L_p}{\bar{v}_s} + \frac{L_p}{v} \quad (10)$$

## 3 交叉口平均延误分析

由于信号灯周期性的分配通行权, 使得各个车道上的交通周期性地停驶. 当绿灯启亮时, 红灯期间内形成的排队车辆依次启动按顺序通过停车线. 本文的车辆交叉口平均延误是指在某一分析时段内, 通过

某一停车线前所有车辆的平均延误.

本文所讨论的交通状况是总的交通状况比较稳定, 总的平均饱和度不超过 1, 但不排除在个别周期, 由于车辆的随机性出现过饱和情况<sup>[13]</sup>. 根据此类交通状况, 交叉口平均延误的计算适用稳态理论, 其计算公式为

$$\bar{d} = \frac{C(1-u)^2}{2(1-y)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65 \left[ \frac{C}{q} \right]^{1/3} x^{(2+5u)} \tag{11}$$

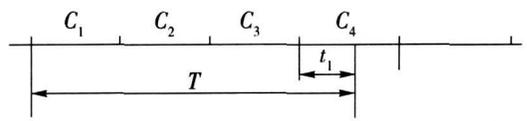
式中,  $u=g/C$ ;  $y=q/S$   $x$ 为饱和度.

以上的平均延误是按周期计算的, 由于本文所提的路段行程时间是以 5 min 为 1 个分析时段的, 因此, 需要将周期平均延误转化成分析时段延误<sup>[14]</sup>, 转化公式为

$$\bar{d}_T = \frac{\bar{d}_1 Q_1 + \bar{d}_2 Q_2 + \dots + \bar{d}_n Q_n}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n} \tag{12}$$

式中,  $\bar{d}_T$  为分析时段  $T$  内车辆在交叉口的平均延误;  $\bar{d}_n$  为分析时段  $T$  内第  $n$  个信号周期内交叉口的平均延误;  $Q_n$  为分析时段  $T$  内第  $n$  个信号周期内通过交叉口的车辆数.

由此便产生了一个问题, 即分析时段有可能包含非整数周期, 如图 2 所示的  $t_1$  部分. 由于每个周期内车队前部完全停车与队尾不完全停车延误相差很大, 线圈是按周期检测流量的, 因此本文删繁就简, 只要某个信号周期的绿灯相位的一半在该分析时段  $T$  内, 就将该绿灯相位归为该分析时段  $T$ , 否则归为下个分析时段.



$C_i$ —分析时段内第  $i$  个信号周期  $T$ —分析时段

图 2 研究时段与信号周期关系

Fig 2 The relationships between period of study and cycle length

### 4 交叉口平均通过时间

为了尽快驶离交叉口, 车辆会尽量加速, 但受到排队影响, 车辆通过交叉口时可认为是以饱和流率通过, 此时车队的行驶速度可用修正后的下游检测平均速度代替, 因此交叉口平均通过时间表示为

$$T_k = L_k / v \tag{13}$$

式中  $L_k$  为交叉口长度, 如图 1 中的 EB、EC 及 ED 段.

但前 4 辆车在通过停车线后仍在加速, 有一定的损失时间, 因此  $T_k$  在式 (13) 的基础上还应加上前 4 辆车的损失时间<sup>[15]</sup>. 当绿灯启亮的时候, 头车有启动反应时间  $d_1$ , 这个时间不在稳态理论计算的延误之内, 该值一般取 0.8~1.2 s

本文近似认为前 4 辆车在启动后, 以加速度  $a$  加速到路段限行速度. 用式 (4) 可以近似计算车辆的平均加速距离  $S_a$ , 该 4 辆车均是从静止加速, 故加速距离

$$S_a = v_i^2 / (2a) \tag{14}$$

式中  $v_i$  为路段限行最大速度.

车辆以  $a$  加速到停车线的速度计算式为

$$v_{s_i} = \sqrt{2a(S_i + S_j)} \tag{15}$$

式中,  $v_{s_i}$  是第  $i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 辆车通过停车线的速度;  $S_j$  为线圈到停车线距离. 由此便可得到, 第  $i$  辆车通过线圈后的加速损失时间计算公式为

$$b_i = \frac{S_a - (S_i + S_j)}{v_i} - \frac{v_i - v_{s_i}}{a} \tag{16}$$

交叉口平均通过时间  $T_k$  的完整表达式为

$$T_k = L_k / v + d_1 + \sum_{i=1}^{n=4} b_i \tag{17}$$

## 5 实验分析

为了验证本文提出方法的有效性, 本文用 VISSIM 4.20 设计了实验进行验证, 实验数据采集路段如图 1 所示, 以其中最具代表性的双车道直行路段 AB 为例. 为了对比本文提出方法的有效性, 在路段上游布设数据检测点检测速度对路段行程时间进行估计. 根据 VISSIM 中车辆类型定义平均车身长度为 4.6 m, 停车车辆间有效间距为 2 m, 则平均有效车长为 6.6 m, 折算的加速度  $a$  为  $3.3 \text{ m/s}^2$ , 估计结果对比如图 3 所示.

基于路段上游和下游检测线圈估计的平均绝对相对误差 (MARE) 分别为 5.7% 和 3.5%, 2 种估计的最大绝对相对误差 (MAXARE) 分别为 12.7% 和 8.3%.

对比分析图 3 及估计结果误差, 可知基于路段下游线圈检测数据估计的路段行程时间不但可行, 而且通过对车辆在路段中不同部分的行车特性分析, 其估计的准确性不但不低于上游线圈估计结果, 甚至还高于上游线圈数据估计结果. 这是由于车辆在路段下游受到信号及其他车辆的影响, 运行状况比在路段上游要复杂得多, 这种复杂状况对路段行程时间有很大影响. 布设于路段下游的线圈检测信息可以在一定程度上反映出车辆所受影响. 通过分析这种影响的因果关系, 可反推车辆在路段各部分的运行状况 (运行车速), 从而获得更为准确的全路段的平均行程时间信息.

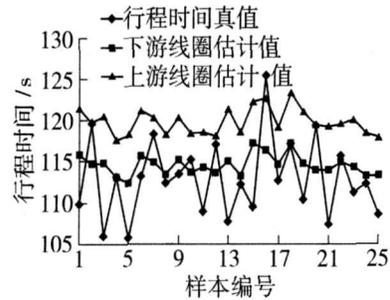


图 3 行程时间估计结果分析

Fig 3 Comparative analysis on estimation results of travel time

## 6 结束语

通过本文的研究可知, 路段下游线圈检测数据经过分析处理后, 可用以估计路段行程时间且估计准确性令人满意, 因此可以通过对当前布设在路段下游的、因没有需求而不提供速度的检测器进行一定处理, 尤其是像 SCATS 此类广泛应用的控制系统, 使其可提供路段行程时间, 这样通过少量的资金投入, 即可为交通诱导系统提供重要依据.

## 参考文献:

- [1] 王亮, 马寿峰, 贺国光. 一种交通控制与诱导递阶协调优化模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(6): 126-133.  
WANG Liang MA Shou-feng HE Guo-guang A hierarchical coordination model between traffic control and route guidance [J]. Theory and Practice of Systems Engineering 2004, 24(6): 126-133. (in Chinese)
- [2] 杨庆芳, 李善梅, 杨兆升, 等. 城市交通控制与诱导系统协调效果评价方法 [J]. 交通与计算机, 2006, 24(6): 1-4.  
YANG Qing-fang LI Shan-mei YANG Zhao-sheng et al Cooperation performance evaluation method of urban traffic control and guidance system [J]. Communications and Computer 2006, 24(6): 1-4. (in Chinese)
- [3] 杨兆升. 关于智能运输系统的关键理论 综合路段行程时间预测的研究 [J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(1): 65-67.  
YANG Zhao-sheng Study on the synthetic link travel time prediction model of key theory of ITS [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering 2001, 1(1): 65-67. (in Chinese)
- [4] DAILEY D J A statistical algorithm for estimating speed from single loop volume and occupancy measurements [J]. Transportation Research, Part B 1999, 33(5): 313-322.
- [5] WANG Yin-hai NHAN N L Can single-loop detectors do the work of dual-loop detectors? [J]. Journal of Transportation Engineering 2003, 129(2): 169-176.
- [6] VANAJAKSHIL D. Estimation and prediction of travel time from loop detector data for intelligent transportation systems applications [D]. Texas: Texas Transportation Institute Texas A&M University, 2004.
- [7] 张和生, 张毅, 胡东成. 路段平均行程时间估计方法 [J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(1): 89-96.

- ZHANG He-sheng ZHANG Yi HU Dong-cheng Estimation method of average travel time for road sections[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering 2008, 8(1): 89-96. (in Chinese)
- [8] 邹亮, 徐建闽, 朱玲湘, 等. 基于浮动车移动检测与感应线圈融合技术的行程时间估计模型[J]. 公路交通科技, 2007, 24(6): 114-117.
- ZOU Liang XU Jian-min ZHU Ling-xiang et al Estimation model of travel time based on fusion technique from probe vehicle and crossing data[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development 2007, 24(6): 114-117. (in Chinese)
- [9] 宫兴斌, 姚丹亚. 一种基于单线圈速度估计的简单模型方法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 35: 226-228.
- GONG Xing-bin YAO Dan-ya A simple model method of single-loop data based for speed estimation[J]. Computer Engineering and Application 2004, 35: 226-228. (in Chinese)
- [10] 余田, 刘建伟, 曹泉, 等. 基于单线圈的速度估检测算法研究[J]. 交通与计算机, 2006, 24(6): 68-70.
- YU Tian LIU Jian-wei CAO Quan et al Vehicle speed detection algorithm based on single loop detectors[J]. Communications and Computer 2006, 24(6): 68-70. (in Chinese)
- [11] 杨晓光, 庄斌, 李克平. 信号交叉口饱和流率和启动延迟的影响分析[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)
- [12] 高海龙, 王炜, 常玉林, 等. 无信号交叉口临界间隙的理论计算模型[J]. 中国公路学报, 2001, 14(2): 78-80.
- GAO Hai-long WANG Wei CHANG Yu-lin et al A mathematical model for critical gap of unsignalized intersections[J]. China Journal of Highway and Transport 2001, 14(2): 78-80. (in Chinese)
- [13] 全永燊. 城市交通控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [14] Transportation Research Board Highway capacity manual 2000[M]. Washington: National Research Council 2000: 140-149.
- [15] 邵长桥. 平面信号交叉口延误分析[D]. 北京: 北京工业大学应用数理学院, 2002.
- SHAO Chang-qiao Analysis of delay at urban signalized intersections[D]. Beijing: College of Applied Sciences Beijing University of Technology 2002. (in Chinese)

## Estimation of Travel Time Based on Downstream Loop Detector of Road Section

YANG Zhao-sheng<sup>1,2</sup>, GAO Xue-ying<sup>2</sup>, LIN Ci-yun<sup>2</sup>, SUN Di<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130022;

2. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Because of the influence of traffic control signals, speed detected by the downstream loop detectors can not be used to estimate road travel time. To solve this problem, based on the dynamic behavior of vehicles nearby the stop line, this paper analyses the downstream detected speed and modifies it by Newton motion law, and it discusses the different characteristics of vehicle speed between the head of the queue and the others and estimates the travel time in different parts of the road section, respectively. The authors conducts an experiment using simulation software of VISSIM<sup>4.20</sup>, to analyses and compare the experimental results estimated based on upstream and downstream loop detectors. Compared with the estimated result based on upstream loop detectors, the result shows that the proposed method can improve the accuracy and stability of experimental results.

**Key words:** transportation systems engineering; average link travel time; loop detector; detection speed; start-up lost time

(责任编辑 梁洁)