

# 考虑信号交叉口影响的分散路径诱导策略

贺正冰, 关 伟

(北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘 要:** 针对城市路网中的定周期信号交叉口, 提出了信号交叉口上游路段交通状态判断及行驶时间估计方法, 将信号交叉口影响引入分散路径诱导策略, 形成考虑信号交叉口影响的分散路径诱导策略. 使用点队列模型建立仿真路网, 验证了信号交叉口上游路段交通状态判断及行驶时间估计方法的有效性. 同时, 利用该方法比较了基于行驶时间与基于交通状态 2 种分散路径诱导策略在不同周期下的效果, 认为当诱导周期较长或交通需求变化较快时, 基于交通状态的诱导策略可以代替基于行驶时间的策略.

**关键词:** 分散路径诱导策略; 交通状态; 信号交叉口; 诱导周期

中图分类号: U 461; TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)10-1539-06

## Decentralized Route Guidance Strategies Considering the Effect of Signalized Intersections

HE Zheng-bing, GUAN Wei

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology,  
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Aiming at fixed-time signalized intersections, an approach of traffic state identification and travel time estimation on links at the upstream of the intersections was proposed. Through the approach, the effect of signalized intersections was incorporated into existing decentralized route guidance strategies. A simulation network model was developed based on a point-queue model. The effectiveness of the traffic state identification and travel time estimation was demonstrated on the network model; the performance of the route guidance strategies based on travel time and traffic state were further compared by using the approach. The results show that the strategy based on traffic state could be used to replace the one based on travel time when the update interval is long or the change of traffic demand is rapid.

**Key words:** Decentralized route guidance strategy; traffic state; signalized intersection; update interval

随着城市交通问题日益突出, 路径诱导逐渐成为减少局部拥堵、提高城市交通系统效率的重要手段. 布设可变诱导信息板(variable message sign, 简称 VMS) 的同时, 如何有效发布信息已成为影响 VMS 实际效果的重要因素. 然而, 城市路网组成元素多样、拓扑结构复杂等均大大增加了制定诱导策略的难度.

相比针对整个路网的集中诱导策略, 分散诱导

策略为单个 VMS 制定针对某一区域的诱导方案, 设计更加简单、高效, 因此受到广泛关注. 目前主要的分散诱导策略大致有: 1) 反馈诱导策略. 根据上一周期的交通状态计算车辆行驶时间, 从而制定本次到达车辆的诱导策略. PID 等控制器被用于矫正诱导策略, 以渐近地实现诱导目标. 该方法简单、效率高, 但也存在稳定性差、考虑因素少等缺点, 且目前研究多针对高速公路网络<sup>[1-5]</sup>. 2) 基于模型预测的

收稿日期: 2012-06-26.

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2011AA110303).

作者简介: 贺正冰(1982—), 男, 博士后, 主要从事交通流理论、智能交通系统、交通仿真方面的研究, E-mail: he\_zb@hotmail.com.

诱导策略. 利用当前和过去偏差值的同时, 通过预测模型估计未来偏差值, 以滚动方式确定最优诱导策略. 该方法效率较高, 模型依赖较低, 但有时难以获得最优解<sup>[6-9]</sup>. 3) 迭代诱导策略. 通过迭代, 在交通模型中, 综合考虑多种因素, 确定本次对到达车辆的最优诱导方案. 该方法综合多种因素进行优化, 但效果依赖仿真, 计算负担重<sup>[10-12]</sup>. 4) 基于机器学习的诱导策略. 应用人工智能中的机器学习与推理处理交通流的短时预测与交通诱导问题. 该方法实用性强、适用性广, 但仍存在着知识库的建立时间较长、诱导策略在交通流较大波动时收敛慢等问题<sup>[13-16]</sup>. 5) 基于解析方法的诱导策略. 使用数学模型解析不同需求和路网状态下的用户或系统均衡分配问题, 据此制定诱导策略. 尽管方法适用路网相对简单, 但理论依据明确, 结果可信度高<sup>[17]</sup>.

然而, 这些策略大部分仅针对高速公路网络的提出, 并没有考虑城市道路网络特点(如设在交叉口的信号灯等), 因此, 仍无法直接用于城市交通诱导中. 为解决该问题, 作者提出了适用于定周期信号交叉口上游路段交通状态判断和行驶时间估计方法, 研究了考虑信号交叉口影响的分散路径诱导策略, 可以将仅适用于高速公路的路径诱导策略扩展至城市道路, 提高现有分散路径诱导策略的适用范围.

## 1 考虑信号交叉口影响的路段交通状态判断及行驶时间估计

受信号交叉口影响, 上游路段车辆行驶时间随着信号控制相位变更而波动, 显然不适合实时比较及交通状态判断, 因此, 现有基于行驶时间与基于交通状态的诱导策略均无法生成稳定有效的诱导策略. 有必要研究信号交叉口影响下的路段交通状态判断和行驶时间估计方法. 作者仅考虑定周期信号配时方案, 由于未涉及交叉口多个上游路段, 略去路段标号以求简化, 具体符号定义如下:

$c$ : 交叉口上游路段的饱和和流量;

$g, r$ : 交叉口上游路段对应的绿灯和红灯时长;

$C$ : 信号周期;

$t_0$ : 某周期开始时间;

$\mu$ : 受信号控制影响的交叉口上游路段通行能力  $\mu = c(g/C)$ ;

$t_A(n)$ : 车辆  $n$  进入交叉口上游路段的时间;

$t_V(n)$ : 车辆  $n$  到达队列末端的时间, 车辆在路段上的自由行动时间为

$$\tau^* = t_V(n) - t_A(n)$$

$t_D(n)$ : 车辆  $n$  离开交叉口上游路段(即进入交叉口)的时间, 车辆在路段上的实际行驶时间为

$$\tau(n) = t_D(n) - t_A(n);$$

$w(n)$ : 车辆  $n$  在交叉口上游路段的排队延误时间

$$w(n) = t_D(n) - t_V(n).$$

### 1.1 信号交叉口上游路段交通状态判断

在累计车辆数-时间图上, 以周期开始时对应的车辆数, 即点  $(t_0, n_0)$ , 为起点构造斜率为交叉口通行能力  $\mu$  的直线, 以此标识交叉口上游路段的一种饱和状态, 即绿灯被充分利用且没有车辆被延误至下一周期. 记车辆  $n$  对应该直线的时间为  $t_S(n)$ , 并记相应的由信号控制带来的正常延误时间(如图1所示)为

$$\pi(n) := t_D(n) - t_S(n) = \frac{g[t_0 + C - t_D(n)]}{r},$$

$$t_D(n) \in [t_0 + r t_0 + C] \quad (1)$$

据此, 当  $\tau(n) > \tau^* + \pi(n)$  时, 存在过饱和和延误, 因此交叉口上游路段为过饱和状态; 当  $\tau(n) < \tau^* + \pi(n)$  时, 为由信号控制带来的正常延误, 因此交叉口上游路段处于自由流状态; 当  $\tau(n) = \tau^* + \pi(n)$  时, 则为饱和状态. 该规则使用行驶时间进行判断, 根据排队论, 可转化为基于队列的判断方法, 可用于基于交通状态的诱导策略.

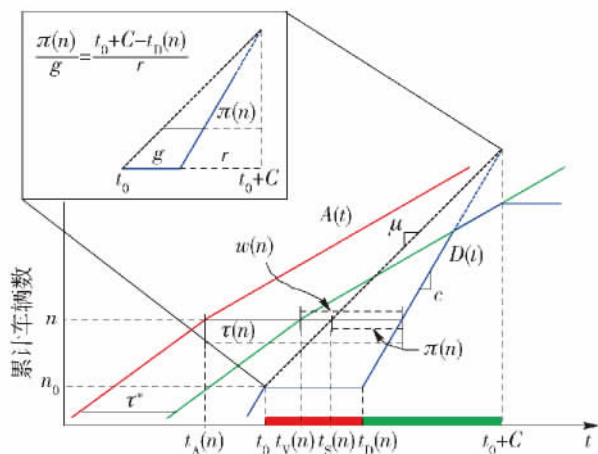


图1 车辆在交叉口上游路段的延误及由信号控制造成的正常延误时间

Fig. 1 Vehicle queuing time in the upstream road of intersection and delay caused by signal control

### 1.2 信号交叉口上游路段行驶时间估计

为在诱导策略中比较行驶时间, 需要对交叉口上游路段行驶时间进行平滑估计. 考虑使用信号控

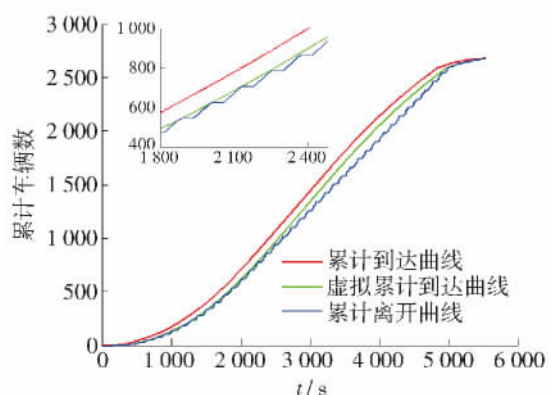
制带来的平均正常延误代替单个车辆经历的正常延误部分(单纯由信号控制造成的延误),以实现平滑交叉口上游路段行驶时间的目的. 公式为

$$\hat{\tau}(n) = \tau(n) - \pi(n) + \bar{\pi} \quad (2)$$

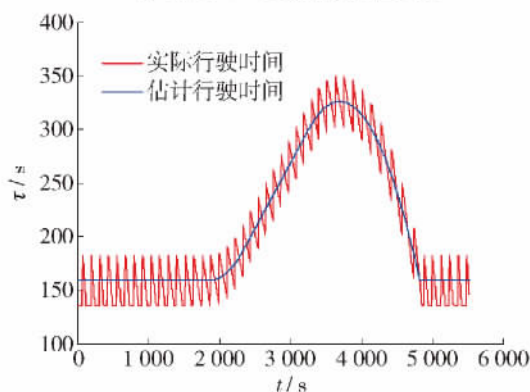
其中

$$\bar{\pi} = \frac{\frac{1}{2}r(cg)}{(cg)} = \frac{1}{2}r \quad (3)$$

式中  $\bar{\pi}$  为信号控制带来的平均正常延误. 通过使用常数  $\bar{\pi}$  替代行驶时间  $\pi(n)$ , 实现了平滑交叉口上游路段行驶时间的目的. 图 2 给出了受信号控制影响的交叉口上游路段行驶时间  $\tau$  及平滑估计结果, 其中  $t$  为仿真时间; 显然, 本方法是有效的.



(a) 某交叉口上游路段交通状况



(b) 实际行驶时间与平滑估计结果

图 2 以平滑为目的的信号交叉口上游路段行驶时间估计结果

Fig. 2 Travel time smooth for a road in the upstream of an intersection

## 2 基于解析方法的分散路径诱导策略

### 2.1 基于行驶时间的分散路径诱导策略

简要介绍文献 [17] 提出的基于行驶时间的路径诱导策略. 设  $c$  为饱和流量  $\tau(n)$  为车辆  $n$  在路径上的行驶时间  $\tau^*$  为路径自由流行驶时间  $A(t)$  和  $D(t)$  分别

为累计车辆到达数和累计车辆离开数. 以 2 个备选路径网络为例, 使用角标  $P$  和  $S$  标识路径 2 对应变量, 否则为备选路径上游总的交通量. 设  $\tau_p^* < \tau_s^*$ . 以用户最优为目标的实时路径诱导策略(如图 3 所示)为:

- 1) 诱导所有车辆至路径  $P$ , 直至点  $a$ , 此时  $\tau_p(n) = \tau_s(n) = \tau_s^*$ ;
- 2) 类型 I 诱导流量  $c_p$  至路径  $P$ , 多余车流诱导至路径  $S$  以保持  $\tau_p(n) = \tau_s(n) = \tau_s^*$ ;
- 3) 当车辆到达率大于备选路径饱和流量之和时, 即  $t_1$  时刻, 使用诱导类型 II: 按备选路径饱和流量比例诱导;
- 4) 直到点  $b$  路径  $S$  上队列消失, 按 1) 进行诱导; 到达点  $c$  时, 高峰结束.

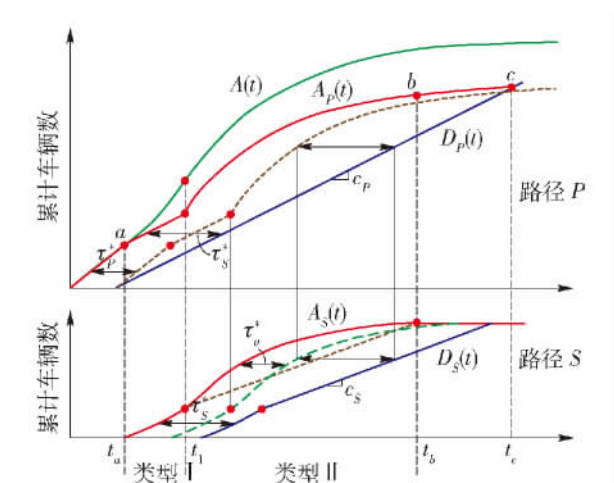


图 3 以车辆累计曲线表示的基于行驶时间的路径诱导策略

Fig. 3 Strategy based on travel time represented by cumulative curve

### 2.2 基于交通状态的分散路径诱导策略

根据基于行驶时间的分散路径诱导策略, 提出如下基于交通状态的分散路径诱导策略. 设诱导至路径  $P$  的诱导率

$$\beta_i = A_p(t) / A(t) \in [0, 1] \quad i = \{0, 1, 2\}$$

- 1) 类型 0: 2 条路径均处于自由流状态时, 诱导全部流量至路径  $P$ , 即

$$\beta_0 = 1 \quad (4)$$

- 2) 类型 1: 路径 1 为自由流状态或饱和状态而路径 2 为过饱和状态时, 尽可能保持路径  $P$  处于饱和状态, 即

$$\beta_1 = \frac{c_p}{A(t)} \quad (5)$$

- 3) 类型 2: 2 条路径均处于饱和或过饱和状态时, 按路径饱和流量比例诱导, 即

$$\beta_2 = \frac{c_P}{c_P + c_S} \quad (6)$$

其中类型 2 与基于行驶时间的诱导策略中的类型 II 相同,且同样始于  $t_1$ ,因为只有从  $t_1$  起车辆到达率大于备选路径饱和流量之和,选择任何路径的车辆均将经历拥堵. 基于交通状态的诱导策略区别基于行驶时间的诱导策略在于: 当预测路径  $P$  将要进入过饱和状态时,类型 1 直接按照保持路径  $P$  饱和的原则将饱和流量相当的车流诱导至路径  $P$ ,将多余车流诱导至路径  $S$ . 该策略仅根据交通状态制定诱导策略,但牺牲了部分车辆的利益. 但是,该策略根据备选路径交通状态而非行驶时间指定诱导方案,输入数据少且更易获得,计算效率高.

### 3 仿真实验

不考虑路段交通流溢出现象,使用点队列模型<sup>[18-19]</sup>建立路网仿真模型. 通过累计车辆曲线方法确定上一时刻进入路段的车辆预计行驶时间<sup>[20-21]</sup>,作为本时刻制定诱导策略的依据. 设计仿真情景如图 4 所示. 其中,路径  $P$  上自由流行驶时间为 216 s; 路段  $S_1$  和  $S_2$  组成路径  $S$ ,自由流行驶时间为 225 s; 设信号周期为 120 s, $S_1$  方向绿信比为 0.6.

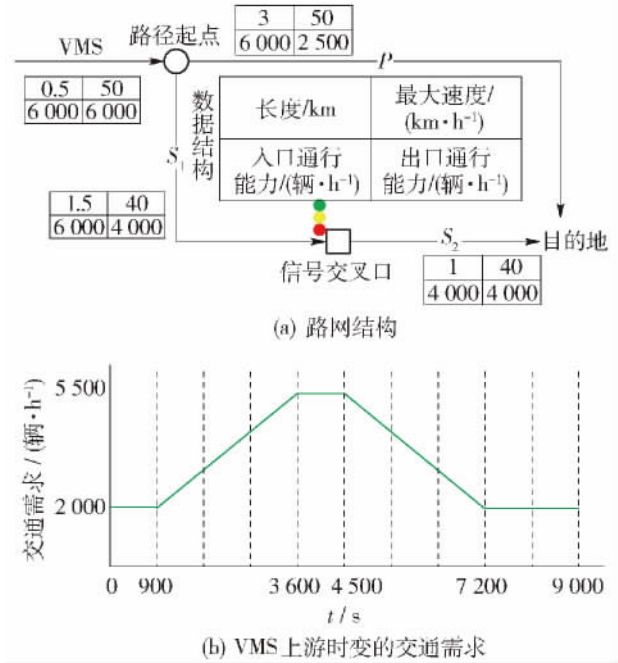


图 4 仿真情景  
Fig. 4 Simulation scenario

由于各种约束限制,实际诱导策略通常无法实现完全的实时(诱导周期为 1 s)刷新; 因此,分别检验基于行驶时间和基于交通状态 2 种策略在 1 s 和 120 s 两种周期下的效果,结果如图 5 所示  $\beta$  为

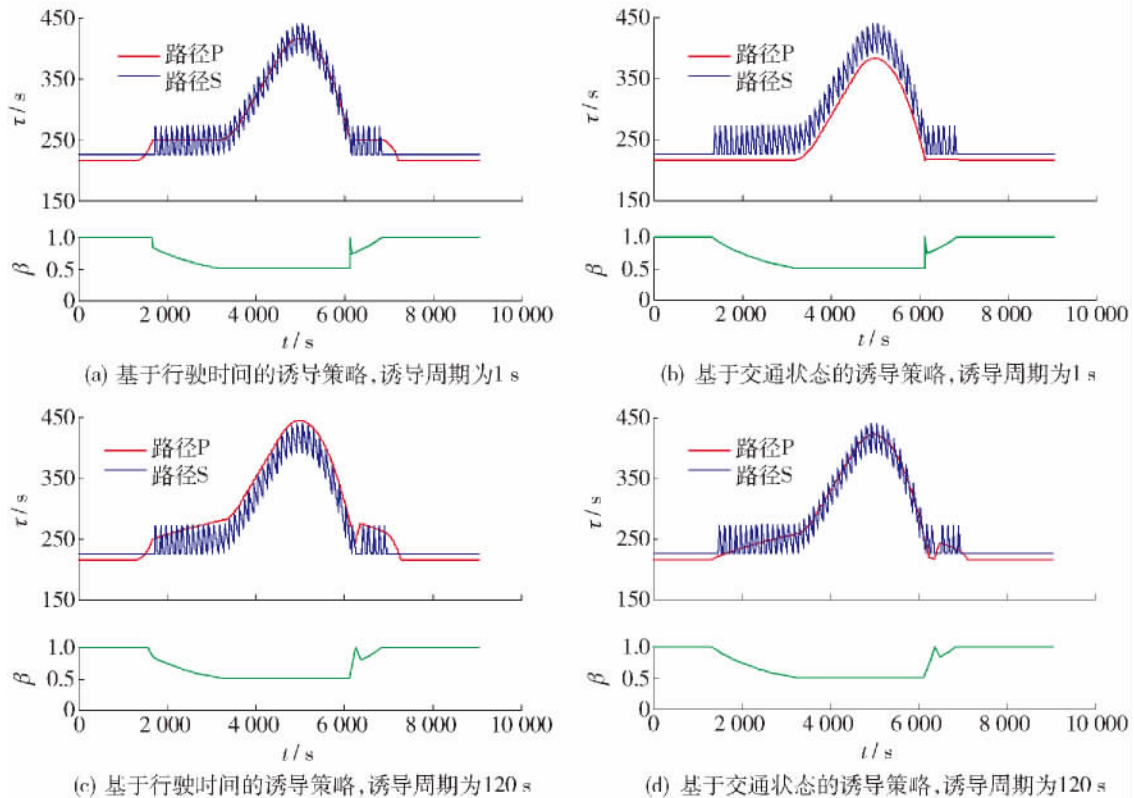


图 5 基于行驶时间与基于交通状态的诱导策略在不同周期下的诱导效果

Fig. 5 Induction result under different conditions of period based on travel time and traffic state strategy



诱导率。不难看出,通过交叉口上游路段交通状态判断与行驶时间估计方法2种诱导策略实现了对带有交叉口的简单路网的近似用户最优分配,并且诱导信息较为稳定。其中,诱导周期为1 s时,基于行驶时间的诱导策略很好地实现了用户最优,即路径 $P$ 的行驶时间始终位于路径 $S$ 行驶时间的波动中心,如图5(a)所示。而基于交通状态的诱导策略由于缺少实时的行驶时间对比,2条路径间始终存在行驶时间上的偏差,如图5(b)所示。

随着诱导周期的增加,根据当前交通需求制定的固定诱导率,在面对周期内快速变化的交通需求时,无法实现保持路径 $P$ 交通状态的目的,使得路径行驶时间出现偏差。以图5(c)对应的路径 $P$ 上交通状态为例,1560 s时根据当时交通状态和需求制定诱导策略(如图6所示),并在1560~1680 s中持续发布该信息,但由于交通需求不断增加,未能有效保持路径 $P$ 状态,即队列仍不断增加。使用预测的交通需求制定诱导策略(如1560 s时根据1680 s的需求制定诱导策略)可缓解该问题。但这将使一部分车辆被诱导至行驶时间较长的路径,进一步偏离了用户最优。而基于交通状态的诱导策略由于缺少行驶时间比较,提前将车辆诱导至路径 $S$ ,在本例中恰好在一定程度弥补了这一缺陷,因此,在周期为120 s时,表现出了更好的诱导效果。

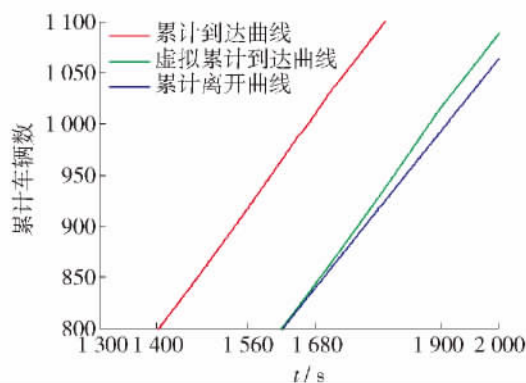
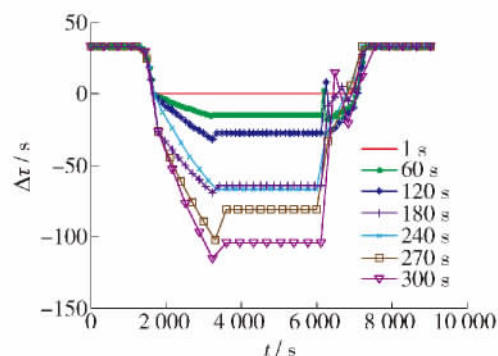


图6 长诱导周期带来的误差:基于行驶时间的诱导策略,诱导周期为120 s

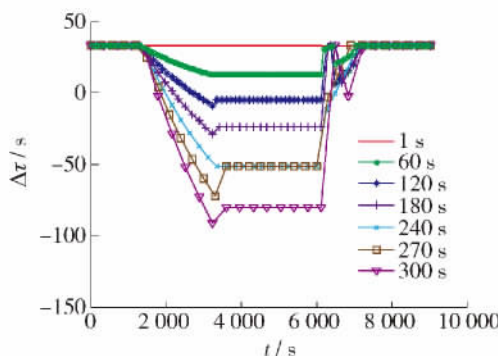
Fig. 6 Errors of long period induction

利用本文方法估计交叉口上游路段行驶时间,通过2条路径行驶时间差评价不同诱导周期下基于行驶时间与基于交通状态两种诱导策略的效果见图7所示。同样,随着诱导周期的增加,用户最优效果变差,基于行驶时间的诱导策略并未表现出更高的准确性。可以认为,当诱导周期较长或交通需求变化较快时,可使用基于交通状态的诱导策略代替基

于行驶时间的策略,从而降低了诱导策略对交通信息的需求。



(a) 基于行驶时间的诱导策略



(b) 基于交通状态的诱导策略

图7 不同诱导周期下,基于行驶时间和基于交通状态的路径诱导策略效果比较

Fig. 7 Comparison of routing induction strategy based on travel time and traffic state under different induction period

## 4 结论

针对城市路网中的定周期信号交叉口,作者根据信号交叉口上游路段所处交通状态,使用平均正常延误时间代替单车延误时间,提出了一种信号交叉口上游路段交通状态判断及行驶时间估计方法,将信号交叉口影响引入分散路径诱导策略。该方法将仅适用于高速公路的路径诱导策略扩展至城市道路,提高了现有分散路径诱导策略的适用范围。利用该方法,文章进一步比较了基于行驶时间与基于交通状态2种分散路径诱导策略在不同周期下的效果,认为当诱导周期较长或交通需求变化较快时,基于交通状态的诱导策略可以代替基于行驶时间的策略,从而降低了路径诱导策略对交通信息量的需求。

## 参考文献:

- [1] PAPAGEORGIOU M. Dynamic modeling, assignment, and route guidance in traffic networks [J]. Transportation

- Research Part B: Methodological, 1990, 24(6): 471-495.
- [2] MESSMER A, PAPAGEORGIOU M. Automatic control methods applied to freeway network traffic [J]. Automatica, 1994, 30(4): 691-702.
- [3] PAVLIS Y. Simple decentralized feedback strategies for route guidance in traffic networks [J]. Transportation science, 1999, 33(3): 264-278.
- [4] WANG Y, PAPAGEORGIOU M, MESSMER A. A predictive feedback routing control strategy for freeway network traffic [C] // Proceedings of The American Control Conference, Washington D C USA: American Automatic Control Council, 2002.
- [5] DEFLOIRIO F. Evaluation of a reactive dynamic route guidance strategy [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2003, 11(5): 375-388.
- [6] BERG M, SCHUTTER B D, HEGYI A. Model predictive control for mixed urban and freeway networks [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1748, 55-65.
- [7] BERG M. Integrated control of mixed traffic networks using model predictive control [D]. The Netherlands: Delft University of Technology, 2010.
- [8] 周永华. 交通诱导预测控制仿真研究 [J]. 控制与决策, 2009, 24(12): 1869-1872.  
ZHOU Yong-hua. Study on the simulation of traffic navigation predictive control [J]. Control and Decision, 2009, 24(12): 1869-1872. (in Chinese)
- [9] 徐天东, 孙立军, 郝媛. 基于模型预测的快速交通网络路由诱导方法 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(6): 827-838.  
XU Tian-dong, SUN Li-jun, HAO Yuan. Model-based predictive route guidance method for urban freeway network [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(6): 827-838. (in Chinese)
- [10] WU J, CHANG G. Heuristic method for optimal diversion control in freeway corridors [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1667, 8-15.
- [11] KOTSIALOS A, PAPAGEORGIOU M. Coordinated and integrated control of motorway networks via non-linear optimal control [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2002, 10, 65-84.
- [12] LIU Y, CHANG G. An integrated control model for freeway corridor under non-recurrent congestion [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 60(4): 1404-1418.
- [13] HE G, MA S. AI-based dynamic route guidance strategy and its simulation [C] // IEEE Intelligent Transportation System Conference. Oakland: IEEE, 2001: 28-32.
- [14] 钟石泉, 马寿峰, 贺国光. 交通诱导系统网络状态描述方法及仿真研究 [J]. 系统工程学报, 2009, 24, 25-31.  
ZHONG Shi-quan, MA Shou-feng, HE Guo-guang. Description and simulation of dynamic route guidance system road network [J]. Journal of Systems Engineering, 2009, 24, 25-31. (in Chinese)
- [15] 钟石泉, 马寿峰, 贺国光. 智能式动态路线诱导系统诱导单元决策方法 [J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 715-720.  
ZHONG Shi-quan, MA Shou-feng, HE Guo-guang. Decision making of guidance unit in intelligent dynamic route guidance system [J]. Control and Decision, 2010, 25(5): 715-720. (in Chinese)
- [16] 钟石泉, 马寿峰. 智能动态路线诱导系统子区协调策略及仿真 [J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(12): 1669-1676.  
ZHONG Shi-quan, MA Shou-feng. A coordination strategy of guidance sub-area in intelligent dynamic route guidance system [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(12): 1669-1676. (in Chinese)
- [17] LAVAL J. Graphical solution and continuum approximation for the single destination dynamic user equilibrium problem [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2009, 43(1): 108-118.
- [18] DAGANZO C F. Fundamentals of transportation and traffic operations [M]. Amsterdam, the Netherlands: Pergamon-Elsevier, 1997.
- [19] YU N, MA J, ZHANG H. A polymorphic dynamic network loading model [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure, 2008, 23, 86-103.
- [20] NEWELL G. Applications of queueing theory [M]. London: Chapman and Hall, 1982.
- [21] LAGO A, DAGANZO C F. Spillovers, merging traffic and the morning commute [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2007, 41(6): 670-683.

(责任编辑 郑筱梅)