

基于车载数据的城市道路交叉口自适应控制研究

姚 佼¹, 范海雁¹, 韩 印¹, 崔 雷²

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 理学院, 上海 200093)

摘要: 在总结现有交叉口交通控制弊端的基础上,通过对控制目标和任务的分析,基于车路协同系统的全时空车载数据,以单车道的车队和多车道的车队簇为控制对象,利用车头时距和间距研究车队和车队簇的形成和动态变化规律,建立了基于车载数据的交叉口自适应控制模型,同时在相位切换逻辑中考虑了两难区.最后基于二次开发的仿真平台,对研究成果进行了测试和验证,相关的案例分析表明,模型应用对于交叉口平峰和低峰情况下的运行效率和安全性有显著改善.

关键词: 车载数据; 自适应控制; 车队; 两难区; 相位切换

中图分类号: U 491.2⁺3 **文献标志码:** A

Adaptive Control at Intersection in Urban Area Based on Probe Data

YAO Jiao¹, FAN Hai-yan¹, HAN Yin¹, CUI Lei²

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 20093, China;

2. College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanahai, 20093, China)

Abstract: To overcome disadvantages of traffic control at intersection in current situation, the control objective and task were analyzed, and then with probe data, the formation and variation of platoon in single lane and cluster platoon in multi lanes were studied. Furthermore, an adaptive control model was established, in which dilemma zone was also taken into account when making phase transition. Finally, based on secondary development of simulation software, relative test and validation work were also finished, and from case study, it is concluded that the model can improve the efficiency and safety of intersection operation, especially in flat and low demand scenarios.

Key words: probe data; adaptive control; platoon; dilemma zone; phase transition

相关研究显示,中国城市道路交叉口延误占整个行程时间的30%~40%^[1].以Webster法和ARRB法(Australia Road Research Board Method)^[2]为代表的传统固定配时信号控制是根据历史性交通资

料,事先经过脱机计算建立起来的,适应于交通需求稳定、交通流运行状态变化不大的情况,不能适应路网上的交通状况的实时改变(如流量大小、分布以及流向的变化),存在控制方案容易老化、效

收稿日期: 2013-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60974093);上海市高校青年教师培养资助计划(slg12009)

第一作者: 姚 佼(1982-),男,讲师.研究方向:智能交通控制、车路协同系统. E-mail: yaojiao@126.com

益低下且不能适应道路网络的扩展变化等弊端^[3];始于1928年美国巴尔的摩的感应信号控制方法^[2]固然能适应各条进口车道上车辆随机到达的情况,但它仅适用于交通流量不大、随机性却较强的交通状况,当交叉口各个进口方向交通流均趋于饱和程度时,只能按某种固定比例分配各方向绿灯时间,无异于“单点定周期”控制^[4];自适应控制根据采集到的交通状态数据,优化控制模型,在线实时地自动调整控制参数,理论上能够建立最优的信号配时,能够适应交通流状态的连续变化,是实用性最强、最先进的一种控制方式^[5-6],但其无法在实际城市道路交通控制中得到广泛应用的主要原因是:a. 其所需检测器数量剧大,前期投资较大,后续维护成本昂贵;b. 传统信息采集方式能采集到的交通信息量有限,无法准确获得转向流量比例、路段行程时间、路段生成和吸引交通流量等关键信息,因此,也就无法及时准确预测交叉口车辆到达需求,同时对由驾驶员行为、交通事故等引起交通流的波动响应也严重滞后,其检测-预测的本质非精确性^[2]导致相应的控制策略响应的是假设条件而非真实条件下的交通流状况,其控制的效果不是很理想^[7];c. 控制策略的切换过于频繁,对交通流扰动带来的损失远大于自适应控制本身带来的效益^[5];d. 虽然采用了可变周期,但每个周期的相位顺序是事先确定的,而非对真实交通流的响应,是强加在优化上的假设条件,本质上它并非优化的结果,因此,也并非一定能够提高交通控制的效益^[8];e. 优化算法本身所需时间过长,无法同时满足全局最优与实时优化这两个要求。

车路协调系统(VII)的出现,使得全时空车载数据的获取成为可能,这是因为:a. 交通系统的交通信息采集方式逐步由粗放的政府大规模基础设施投资转为更为集约的基于车载单元的分布式交通信息采集,交通数据信息采集系统建设和维护成本大大降低,有利于大规模地推广与应用;b. 通过车路通信可以采集到准确的车载数据,能够及时准确预测交叉口的实时交通需求及各种突发情况,使信号配时的自适应控制的真正实现成为可能;c. 系统数据采集粒度、精度的大大提高,使交通信号控制与车辆控制、交通诱导的整合亦成为可能,Bell的研究结果表明,仅仅依靠传统的交通信号已不够解决日益严重的城市交通拥堵问题,与车载数据的集成及整合将是未来的发展趋势^[9-10]。

1 基于车载数据的交叉口自适应控制建模

1.1 交叉口控制的主要任务和目标

我国现有交叉口运行普遍存在排队溢出、绿灯空放及秩序混乱等问题,因此,交叉口控制的主要任务是:在交叉口空间设计的基础上,基于全时空车载数据状态信息,充分利用交叉口的时间资源,尽可能地减少车辆在交叉口的延误,降低交叉口的安全隐患。

1.2 基于安全的考虑

交叉口设置信号灯的初衷就是为了各行其道,避免交通事故^[11],因此,安全是交通控制优化的基础.在信号控制中,主要考虑潜在冲突点的消除和两难区的避免.前者主要是通过交通控制的相位相序结构设计来实现(如经典的美国电器制造协会(NEMA)的双环结构),已较为成熟;后者则主要是对黄灯期间的车速、驾驶员行为进行研究,与交通控制的结合有待进一步加强.现研究在前者的约束下,利用车载数据对两难区进行分析。

当车辆驶入交叉口时,若信号恰好切换至黄灯,可能会陷入一个两难决策区域,如图1所示.一方面,由于离交叉口太近,减速停车则会最终越过停车线,落入交叉口内部;另一方面,因为离交叉口太远,黄灯期间不能顺利通过(即到达停车线前,信号灯已经变红,出现闯红灯的现象).在黄灯期间,车辆处于这种既不能停下来,又不能顺利通过的尴尬区域,称之为两难区。

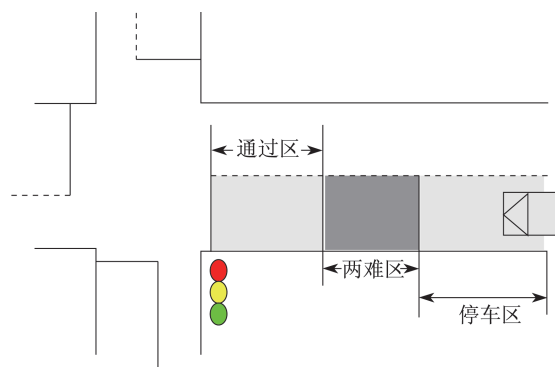


图1 交叉口两难区示意图

Fig.1 Delimma zone at intersection

假定黄灯亮起时,车辆距离交叉口停车线的距离为 x ,初始速度为 v_0 。

若选择停车,假设减速度为 a ,驾驶员反应时间为 δ ,则在停车线前能够安全停车的最小安全距离

$$x_s = \frac{v_0^2}{2a_-} + v_0 \delta_- \quad (1)$$

若选择通过,假设其在黄灯时间 T_Y 期间是以恒速 v_0 通过交叉口,则其距离停车线的最大距离

$$x_p = v_0 T_Y \quad (2)$$

根据两难区定义,将车辆距离停车线的距离 x 表述为

$$v_0 T_Y \leq x < \frac{v_0^2}{2a_-} + v_0 \delta_- \quad (3)$$

如果

$$v_0 T_Y \geq \frac{v_0^2}{2a_-} + v_0 \delta_- \quad (4)$$

则可认为两难区消失.

由式(4)解得

$$v_0 \leq 2a_- (T_Y - \delta_-) \quad (5)$$

所以,交叉口要切换黄灯时,可根据切换时刻距离停车线最近车辆的速度和减速度,以及驾驶员反应时间等车载数据,确定交叉口的黄灯时间

$$T_Y \geq \frac{v_0}{2a_-} + \delta_- \quad (6)$$

这样就能够有效避免车辆落入两难区.

1.3 基于效率的考虑

相关研究表明^[12],城市的主要交通干线上超过70%的车辆是在车队中运行.如不切断车队的运行,将很大程度减少车辆延误.因此,现研究是在上述交通安全约束下,基于车载数据,根据车载数据的实时位置和速度信息,将车辆归类为车队,进一步跟踪车队中车辆的动态变化,确定相位的切换逻辑,进行交叉口的自适应信号优化,以期最小化车均延误.

1.3.1 单车道车队

单车道中车队以车辆间的车头时距进行划分,即当任意两车间车头间距大于阈值 h_t ($h_t \geq T_Y$) 时,

则认为车队终止,可以触发相应的信号切换逻辑.

根据车头时距的定义^[3],同一车道两连续车辆车头端部通过某一断面的时间间隔如图2所示.

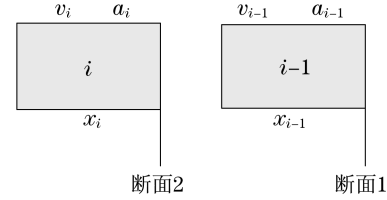


图2 单车道车队中前后车关系

Fig.2 Car relationship in single lane

图2中 v_i, a_i, x_i 分别代表第 i 辆车的速度、加速度和位置, $v_{i-1}, a_{i-1}, x_{i-1}$ 分别代表第 $i-1$ 辆车的速度、加速度和位置.

设车辆 $i-1$ 通过断面1的时刻为0,则车辆 i 通过断面1的时刻 t 可以表达为

$$x_i - x_{i-1} = v_i t + \frac{1}{2} a_i t^2 \quad (7)$$

因此,两车车头时距

$$h_i = t = \frac{\sqrt{v_i^2 + 2a_i(x_i - x_{i-1})} - v_i}{a_i} \quad (8)$$

1.3.2 多车道车队簇

对某些流向有多个车道的情况,交通控制的对象并非单一车道而是所有车道的车辆,因此,控制的最好效果应当尽量让车道组车辆以车队簇的形式通过.所谓车队簇,即车道组一定空间范围内若干个车队或车辆,如图3所示,其并非简单的单车道车队的叠加.对单车道而言,一个车队簇中可包含本车道前后几个车队(如图3中的车道3),甚至包括单车的情况(如图3中的车道1).因此,需要从相对空间关系中对不同车道中车队首车的车头间距进行研究.

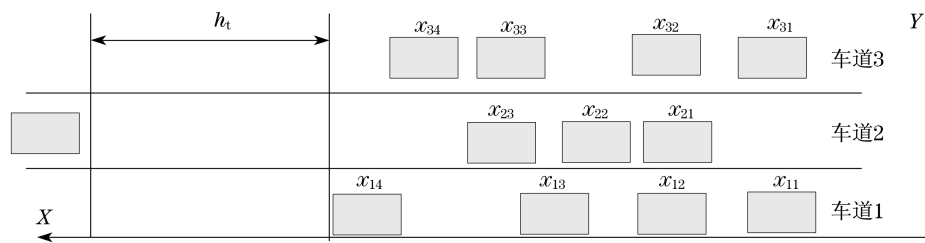


图3 多车道中的车队簇

Fig.3 Platoon cluster in multi lanes

图3中 $x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}$ 分别代表车道3中的第1辆、第2辆、第3辆和第4辆车, x_{21}, x_{22}, x_{23} 分别代表车道2中的第1辆、第2辆和第3辆车, $x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$ 分别代表车道1中的第1辆、第2辆、第

3辆和第4辆车.

如图3所示,车道组中如果存在任意两车间的距离小于 h_s ,则车队簇继续向后延续,即

$$x_j \leq x_i + h_s \quad (9)$$

式中, h_s 为临界车头空距, $h_s \geq T_Y v$; v 为道路的限制值; x_i 为第 i 辆车的位置.

对车队簇的判断, 具体遵循如下的步骤和逻辑:

a. 按前述的判断, 如果第 i 辆车所在车道有后续车辆组成车队, 则车队簇一直持续到本车队结束, 再进行下一步的判断; 否则, 判断车道组中所有 $x_j > x_i$ 的车辆与第 i 辆车之间的距离是否满足式(9)的要求, 如果满足, 则用 $x_j - x_i$ 值最小的第 j 辆车取代第 i 辆车, 重复此步的判断.

b. 当所在车道车队结束时, 用最后一辆车代替第 i 辆车, 重复第 a 步中的判断.

c. 当车道组中所有 $x_j > x_i$ 的车辆均不满足式(9)的要求, 则本车队簇终止, 触发相应的信号切换逻辑.

1.3.3 车队的动态变化

车队在运行过程中, 由于速度的差异, 不断有车辆加入和离开车队, 即车队处于不断的动态变化当中. 在单车道情况下, 对于车队中车辆的加入有两种情况, 即车队后方一辆车加速缩短与车队最后一辆车距离, 以至于取而代之成为车队最后一辆车; 另一种情况则是前方车辆减速缩短与车队头车距离, 以至于取而代之成为车队头车. 同理, 对于车辆离开车队也存在两种情况, 即车队最后一辆车减速脱离车队; 另一种情况则是车队头车加速拉开与后车距离, 以至于逃离本车队. 考虑到车队中车辆加减速的波动, 参考相关文献[8], 取临界加减速为 $\pm 0.5 \text{ m/s}^2$, 据此可以得出单车道条件下动态车队更新的流程, 如图4所示. 对于多车道的情况亦如此, 只是判断的标准由车头时距的阈值变为车头间距的阈值.

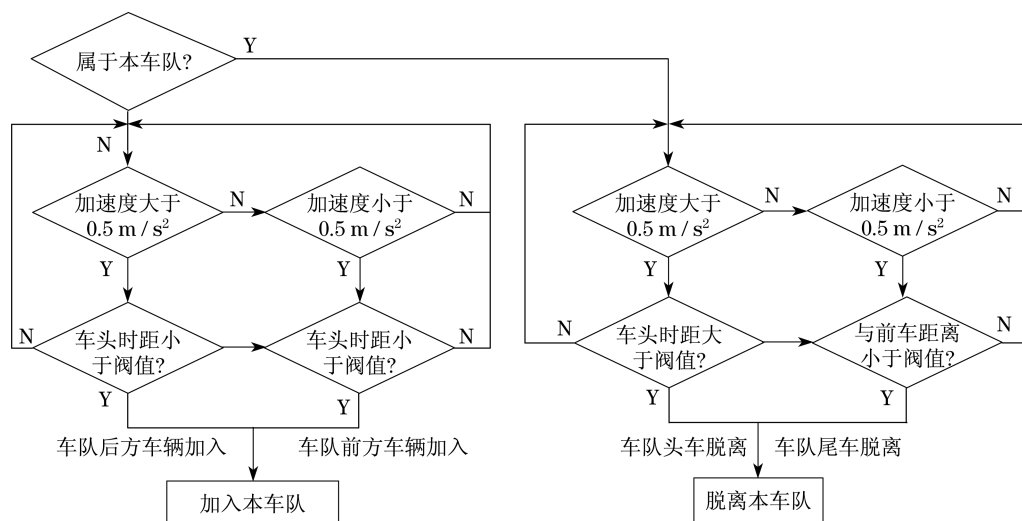


图4 车队动态更新流程

Fig.4 Dynamic update flow of platoon

1.4 相位切换逻辑

基于车载数据, 通过前述车队形成及动态变化切换相位, 尽可能避免打断车队和车队簇, 具体的相位切换逻辑主要分以下3个步骤:

a. 首先计算交叉口下一时刻可以放行的所有相位流向每个车道车辆累计等待时间 (accumulate waiting time, AWT), 如式(10)所示, 以此作为交叉口信号控制相位切换的依据. 如停车线前第一辆车在下一辆车来之前已经等待 10 s, 两车又同时等待了 10 s, 则此相位累计等待时间为 30 s. 若相位车道的累计等待时间超过预先设定的阈值, 则发出绿灯请求, 进入第 b 步; 否则, 继续运行本相位. 关于累计等待时间阈值的设置, 可以根据交叉口类型, 以及该流向的交通流量、饱和度等进行设置.

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_j \quad (10)$$

式中, N 为流向车道总数; d_j 为单车的累计等待时间, 可从车载数据中通过位置和速度判断得到.

b. 根据前述的算法, 当前相位车队或车队簇结束触发, 或达到最大绿灯时间时, 进行相位切换.

c. 根据相位冲突表对发出绿灯请求的相位, 若存在已达到最大红灯时间的相位, 优先切换至此相位; 否则, 选取发出绿灯请求相位中车道累计等待时间最大的相位.

2 案例分析

为评价本研究相关模型和算法的效果, 对微观

交通仿真软件 Vissim 进行二次开发,如图 5 所示. 利用编程软件 Visual Basic 通过 COM(component object model)接口调用 Vissim,采集相关车载数据,再嵌入本研究的控制模型,通过不同场景的大量重复试验,对控制策略的效益进行分析.

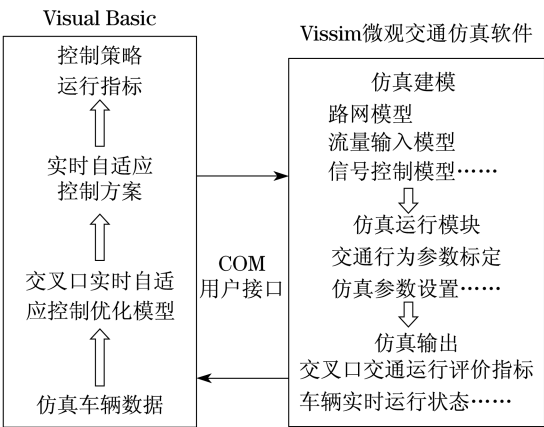


图 5 基于 Vissim 二次开发的交通仿真流程
Fig.5 Simulation diagram of vissim secondary development

根据前述相关研究所需要的数据,结合 Vissim 中 Vehicle Recorder 的格式特点,定义本研究车载数据的内容包括车辆编号、路段编号、车道编号、车辆位置、速度、加速度等.

研究选取广州市主城区东北片区的区庄立交桥北侧的一个关键交叉口先烈路太和岗路交叉口进行分析,现有交叉口的车道功能划分如图 6 所示.

按照现状控制策略,分早高峰(7:00~8:30,饱和度 0.82~0.92)、午间平峰(11:00~13:00,饱和度 0.67~0.80)、晚高峰(17:30~19:30,饱和度 0.80~1.00)、夜间低峰(0:00~6:00,饱和度 0.20~

0.56)这 4 个场景,每个时段的具体配时方案如表 1 所示.

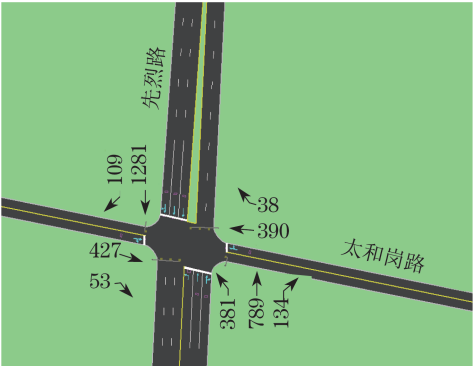


图 6 案例交叉口交通渠化图
Fig.6 Configuration of case intersection

表 1 案例交叉口现状控制策略
Tab.1 Current control policy of case intersection

场景	周期/s	南直左 绿灯时间/s	北直行 绿灯时间/s	东西直行 绿灯时间/s
夜间低峰	55	20	20	15
早高峰	65	24	21	20
午间平峰	60	20	20	20
晚高峰	70	25	23	22

在仿真分析中,根据实际调查数据,标定交通成为 10% 公交车,90% 小汽车,车道饱和流量为 1 800 pcu/h. pcu 为标准车当量数. 整个仿真运行 4 000 s. 其中,前 400 s 为初始化阶段,选取后 3 600 s 的仿真数据进行统计分析,车载数据的采集时间精度为 0.1 s. 对比现状控制方案以及交通信号配时软件 Synchro 优化方案,本研究方案的评价结果如表 2 所示.

表 2 本研究控制策略评价
Tab.2 Evaluation of the control policy in this study

方 案	夜间低峰		早高峰		午间平峰		晚高峰	
	车均延误/s	落入两难区车辆数	车均延误/s	落入两难区车辆数	车均延误/s	落入两难区车辆数	车均延误/s	落入两难区车辆数
现状控制方案	15.3	4	29.5	18	15.3	4	29.5	18
Synchro 优化方案	14.9	4	29.0	19	14.9	4	29.0	19
本研究方案	13.8	0	28.8	16	13.8	0	28.8	16

通过表 2 的分析可知,本研究方案的优化主要体现在效率和安全这 2 个方面.

效率方面:a. 对大部分场景车均延误均有所降低,均值达到 6.84%;b. 对午间平峰,效益改善最为明显,达到 15.50%,夜间低峰改善效益略低,为 9.80%,这可能是因为晚间交通需求较低,频繁切换

相位,造成黄灯、全红以及绿灯启动反应时间的损失;c. 本研究策略对于早晚高峰效益的改善分别为 2.37% 和 -0.31%,改善有限,这是因为高峰时间交通需求较大,往往需要运行到最大绿灯时间才进行相位切换,与传统的控制方案无本质区别.

安全方面:本研究方案对夜间低峰,完全可以避

免车辆落入两难区情况的发生;对午间平峰,落入两难区的车辆数显著减少,减少比例达 66.7%;对于早晚高峰,无本质上的显著改善.这是因为根据式(6),黄灯时间的构成与驾驶员反应时间和车速有关.考虑到高峰期间车速较低,而相关的研究表明^[13], δ 在 99% 的置信水平下为 2.8 s,而现状的控制方案中绿灯间隔为 3 s,因此,落入两难区车辆的比例较低,本研究控制策略对高峰期间两难区的改善有限.但由于绿灯结束前车速相对较高,仍有部分车辆落入两难区,而且由于高峰期间交通流量较大,因此,高峰期间,相同时间内落入两难区车辆的绝对数量仍较多.而平峰和低峰期间交叉口车速较快,交通安全隐患的后果较为严重,因此,可以说本研究策略对交叉口控制策略安全性有明显改善.

3 结束语

基于车载数据对交叉口控制策略进行优化是车载数据在交通管理与控制领域应用的初步探索,对拓展交通信号控制新领域具有十分重要的理论意义,对于进一步提高交叉口运行的安全性和效率具有理论应用价值.本研究控制策略对于改善平峰和低峰期间交通控制的效果显著,但对于高峰的改善有限,后续应逐步关注车载数据对于高峰特别是过饱和和主动控制方面的研究.此外应当注意到,本研究的前提假设条件是道路上所有车辆的车载数据可以获得,在车路协同系统推广普及过程中,车载数据内容、生成频率、普及率等时空特性对交叉口自适应控制策略效益改善的影响值得进一步关注.

参考文献:

- [1] 上海市城市综合交通规划研究所. 上海市综合交通 2012 年度报告(摘要下)[J]. 交通与运输, 2012, 28(6): 7-8.
- [2] 全永荣. 城市交通控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [3] 杨佩昆, 吴兵. 交通管理与控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [4] 栗红强. 城市交通控制信号配时参数优化方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [5] Gartner N, Kaltenbach M. Demand-responsive decentralized urban traffic control: Part I: single-intersection policies[R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 1983: 37-59.
- [6] 杨晓光, 曾松, 杭明升. 中国城市道路交通实时自适应控制与管理系统研究[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(2): 74-77.
- [7] MacGowan J, Fullerton I J. Development and testing of advanced control strategies in the urban traffic control system[J]. Public Roads, 1979, 43(3): 97-105.
- [8] 姚佼. 基于车辆行驶数据的交叉口交通控制机制研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.
- [9] Bell M G H. Future directions in traffic signal control[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1992, 26(4): 303-313.
- [10] 姚佼, 杨晓光. 车路协同环境下城市交通控制研究[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(4): 397-403.
- [11] 王炜, 过秀成. 交通工程学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2003.
- [12] Jiang Y, Li S, Shamo D E. A platoon-based traffic signal timing algorithm for major-minor intersection types[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2006, 40(7): 543-562.
- [13] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

(编辑: 石 璞)

[1] 上海市城市综合交通规划研究所. 上海市综合交通