

文章编号: 1009-6744 (2007) 06-0045-06

智能交通系统与信息技术

城市快速路入口匝道控制算法的 PARAMICS 仿真研究

范立权, 陈阳舟, 李振龙

(北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

摘要: 基于对城市快速路入口匝道控制问题的分析, 用微观交通仿真软件 PARAMICS 建立入口匝道控制仿真模型, 对三种入口匝道控制算法 (ALINEA, NEW-CONTROL 和 MIXED-CONTROL) 进行仿真对比研究. 结果表明三种算法都能一定程度上改善快速路的交通拥挤. 同时给出三种算法的差异性描述, 从交通流特征和算法特点分析产生差异的原因. 最后指出 MIXED-CONTROL 在优化主线交通流的同时减少了入口匝道的车辆排队长度, 其在高需求时的总体性能优于其它两种算法, 是比较适合于实际应用的匝道感应控制算法.

关键词: 入口匝道控制; ALINEA; NEW-CONTROL; MIXED-CONTROL; PARAMICS 软件

中图分类号: U12

文献标志码: A

Simulation Study of Urban Freeway On-ramp Metering Algorithms on PARAMICS

FAN Li-quan, CHEN Yang-zhou, LI Zhen-long

(The School of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Based on the analysis of urban freeway on-ramp control, an on-ramp model is developed and simulated via the microscopic transportation simulation software PARAMICS using three on-ramp control Algorithms (ALINEA, NEW-CONTROL, and MIXED-CONTROL). The results indicate that all of these algorithms can effectively ameliorate the traffic congestion on the freeway. The differences of these algorithms are also analyzed from the aspect of characteristics of traffic flow and algorithms. MIXED-CONTROL not only optimizes the traffic flow on the mainline but also reduces the vehicle queue of the on-ramp, which is superior to other two control strategies especially in the case of high-demand. The evidence provides that MIXED-CONTROL is a better traffic responsive ramp metering algorithms for real-world implementation.

Key words: on-ramp metering; ALINEA; NEW-CONTROL; MIXED-CONTROL; PARAMICS software

CLC number: U12

Document code: A

0 引言

随着城市化速度的加快, 机动车日益普及, 同

时城市内的路网也越来越复杂, 在交通流高峰期势必会造成交通拥挤, 导致出行时间增加, 能源消耗

收稿日期: 2007-08-31

基金项目: 国家自然科学基金 (60604008); 北京市自然科学基金 (4072005).

作者简介: 范立权 (1982 -), 男, 浙江宁波人, 北京工业大学电子信息与控制工程学院硕士研究生, 主要研究方向为智能交通. E-mail: fanliquan @emails. bjut. edu. cn

加大,甚至引发交通事故。

作为首都及奥运会举办地的北京,近年来经济发展迅速,北京的交通面临越来越大的压力。为了改善城市的交通状况,政府修建了大规模的交通基础设施,例如城市快速路工程和地铁工程。但是交通量持续增加,新的交通需求不断加入,北京的交通拥堵现象十分严重,尤其是快速路(环线)与普通道路交汇路段及相邻路段上,出入口匝道交通拥堵相当严重,不仅影响快速路车辆的顺畅通行,也影响了临近辅路的交通状况。

快速路入口匝道控制一直是国内外专家学者关注的热点。希腊专家 M. Papageorgiou 以及 H. Hadj-Salem 和 J. M. Blosseville 在 1991 年共同提出了 AL INEA 控制算法^[1],并成功应用于一些欧洲的大城市。M. Papageorgiou 等分析了为什么要进行匝道控制的原因,并详细阐述了各种匝道控制的方法及其优缺点^[2]。Klaus Bogenberger 等介绍了 17 种不同的匝道控制算法及其应用情况,最后指出匝道控制算法的发展趋势,认为在线仿真和模糊逻辑将是两种比较有效的方法^[3]。丁同强等探讨了匝道控制中采用的理论和方法,并分析了各种控制策略的特点与适用条件^[4]。陈德望等建立了高速公路入口匝道控制的数学模型,把模糊控制和神经网络算法结合起来实现入口匝道的智能控制^[5]。林尚伟等根据快速路各密度区的交通特点,提出了一种中低密度区采用可变限速控制、中高密度区采用可变限速结合入口匝道控制的交通流控制策略^[6]。陈德望等利用理论推导和系统仿真等方法分析了城市快速路交通控制的一些基本问题,并指出合适的入口匝道控制可以提高整个系统的效益,对快速路和普通道路都有益^[7]。吕智林等提出了基于多 Agent 的入口匝道智能控制策略,该策略基于系统论的思想,引入协调控制策略,建立了一个包括多个入口匝道控制 Agent 和一个协调 Agent 的多 Agent 系统^[8]。上述研究都表明,匝道控制可以直接有效地减少快速路拥挤的发生,维持较高的交通流量。如果使用恰当,可以保持快速路的正常运作,最大化交通流量,提高车辆行驶速度,减少旅行时间和事故发生率。

北京大望桥地处北京市三环与四环之间,交通状况比较复杂,京通快速横跨而过,周边还有不少

出入口匝道,而且匝道与立交桥信号灯距离只有 200 多米。因此在上下班高峰期,经常发生拥挤。本文以此为背景,根据实际路况信息对主要的入口匝道进行了控制,并通过微观交通仿真软件 PARAMICS 模拟该路段的交通状况,采用三种不同控制算法(AL INEA、NEW-CONTROL 和 MIXED-CONTROL)进行仿真研究。

1 入口匝道控制问题

入口匝道控制是国外应用最广泛和成熟的高速公路交通控制措施,它是以道路本身容量为依据,控制匝道进入的交通流量,保持主线交通流始终处于畅通。其基本原理结构图如图 1 所示。通过回路检测器检测到的交通流参数(占有率、流量、排队长度等),反馈后得到误差值,再通过入口匝道控制器计算出新的匝道调节率,作用到城市快速路交通系统中,从而改善快速路下游的交通流状态。图 1 中 o_c 表示快速路下游占有率, $e(k)$ 表示误差函数值,道路交通流包括快速路上下游和入口匝道。



图 1 入口匝道控制基本原理结构图

Fig. 1 Basic framework of the on-ramp metering

图 2 为入口匝道交通流示意图。从图 2 中可以看到快速路可以像这样分成若干段,每一段的交通流主要由本段的上游交通量 Q_{up} ,本段的下游交通量 Q_{down} 和匝道入口交通量 Q_{in} 组成。为了让快速路交通流处于平稳、良好状态,要求 Q_{up} 与 Q_{in} 之和不超过道路的最大通行能力,并且最大密度不超过临界密度。因此可以通过对 Q_{up} 和 Q_{in} 进行控制来达到这个目的。对上游交通量 Q_{up} 的控制主要有动态速度引导和诱导分流两种方法,但效果并不明显。对入口匝道的流入量 Q_{in} 进行控制,即通过限制进入快速路的车辆数来保证高速公路自身的交通需求不超过其交通容量。杨兆升^[9]等人提出一种匝道调节和主线动态速度引导协同控制策略,仿真实验表明对改善主线交通流有一定的效果。

匝道调节是在匝道上使用交通信号灯对进入

车辆实行计量控制(单位时间内允许进入的车辆数称为匝道调节率),交通信号灯一般采用红绿或红

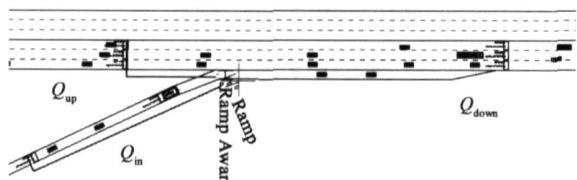


图2 入口匝道交通流示意图

Fig.2 Traffic flow of the on-ramp

黄绿两种方式.入口匝道调节方法主要可分为入口匝道定时调节、入口匝道感应(动态)调节和入口匝道协调控制.

2 入口匝道感应控制算法

定时调节是根据历史交通数据,按预先给定的调节率进行控制,因此它不能响应交通量的随机变化,难以排除交通拥挤.它不是闭环控制,不考虑交通的实时变化.为了克服这个缺点,可采用交通感应调节方法.其特点是:调节率的调整是基于实时交通流状况的,如占有率、交通流量、排队长度等,因此能适应交通流的随机变化.目前比较常用的匝道感应控制方法^[10]有:需求-容量控制,占有率控制和反馈控制等.本文主要介绍 ALINEA, NEW-CONTROL 和 MIXED-CONTROL 三种感应控制算法.

2.1 ALINEA 方法

ALINEA 算法^[1]是由希腊学者 M. Papageorgiou 以及 H. Hadj-Salem 和 J. M. Blosseville 在 1991 年共同提出的.它是一种基于经典反馈控制理论的局部反馈匝道控制算法,把主线交通流作为控制对象,入口匝道调节率作为控制量,采用实时交通占有率作为输入,通过设定入口匝道调节率使交通流平稳并且不超过主线容量.即通过把快速路下游占有率维持在期望占有率附近来最大化主线交通流量. ALINEA 算法匝道调节率计算公式为

$$u(k) = u(k-1) + K[o_c - o_{down}(k-1)] \quad (1)$$

其中 $u(k)$ ——第 k 个周期内的入口匝道调节率;

$u(k-1)$ ——第 $k-1$ 个周期实际的入口匝道调节率;

K ——大于零的可调参数(车辆数/小时);

o_c ——匝道下游主线期望的占有率(或临界占有率);

$o_{down}(k-1)$ ——第 $k-1$ 个周期匝道下游主线的测量占有率.

2.2 NEW-CONTROL 方法

NEW-CONTROL 算法^[11]是由 Dr. Pushkin Kachroo 和 Dr. Kaan 提出的,其基本原理与 ALINEA 有点相似,或者说是 ALINEA 上的改进,也是一种反馈控制方法.根据车辆守恒关系可知,匝道路段的流入量应该与流出量相等,因此该算法的控制目标也是期望匝道下游主线占有率趋近于临界占有率.不过该算法除了把快速路下游占有率作为确定匝道调节率的一个因素外,还考虑到了快速路上下游的流量之差. NEW-CONTROL 算法匝道调节率计算公式为

$$u(k) = -K[o_{down}(k) - o_c] + [Q_{down}(k) - Q_{up}(k)]$$

其中 $u(k)$ ——第 k 个周期内的入口匝道调节率;

K ——大于零的可调参数(车辆数/小时);

o_c ——匝道下游主线期望的占有率(或临界占有率);

$o_{down}(k)$ ——第 k 个周期匝道下游主线的测量占有率;

$Q_{up}(k)$ 和 $Q_{down}(k)$ ——分别为匝道上流和下游主线的流量.

2.3 MIXED-CONTROL 方法

MIXED-CONTROL 算法^[12]也是由 Dr. Pushkin Kachroo 和 Dr. Kaan 提出的,该算法除了考虑把主线下游密度维持在临界密度左右外,还考虑到了快速路上下游的流量之差,同时也把匝道的排队长度考虑在内.该算法具体描述如下:

控制目标函数为

$$e(k) = w_1 |\rho(k) - \rho_c| + w_2 l(k) \quad (2)$$

匝道调节率的计算公式为

$$u(k) = G^{-1}[-F - Ke(k)] \quad (3)$$

$$F = \text{sign}(\rho(k) - \rho_c) \cdot$$

$$w_1 [\rho(k) - \rho_c + \frac{h}{\Delta x} (Q_{up}(k) - Q_{down}(k))] + w_2 [l(k) + hr(k)] \quad (4)$$

$$G = [\text{sign}(\rho(k) - \rho_c) w_1 \frac{1}{\Delta x} - w_2] h \quad (5)$$

其中 $e(k)$ ——控制目标函数值;

- ρ_c ——匝道下游主线期望的密度 (或临界密度);
- $\rho(k)$ ——第 k 个周期匝道下游主线的车辆密度;
- w_1, w_2 ——权值系数;
- l ——匝道排队长度;
- $u(k)$ ——第 k 个周期内的入口匝道调节率;
- K ——大于零的可调参数 (车辆数/小时);
- h ——时间步长;
- Δx ——快速路各段的长度.

3 PARAMICS 仿真实现

PARAMICS 提供了丰富的 API 接口函数,可以很方便地将算法嵌入 PARAMICS 仿真模型中. 首先,根据道路实际信息建立模拟的交通路网,主线上下游处各放置了回路检测器,用来采集实时交通流数据,匝道入口处设置红绿灯信号和一个流入检测器,另一端则放置一个排队长度检测器,如图 2 所示. 然后用 C 语言编写不同算法的源程序并进行仿真调试.

匝道处设置的信号灯为两相位,红灯和绿灯相位,整个信号周期固定为 20 秒,也就是说红灯时间和绿灯时间之和为 20 秒. 这样绿灯时间每隔 20 秒

就更新一次,是根据检测器检测到的交通流数据和控制算法计算出来的,剩下的时间即为红灯时间.

由于控制算法计算出来的是匝道调节率,所以为了方便执行还须将匝道调节率转换成相应的绿灯时间. 如果计算得到的调节率为 $u(k)$ veh/h,该匝道的饱和调节率为 u_{sat} veh/h,信号周期为 C 秒,那么调节率和绿灯时间的转换公式为 $g(k) = (u(k)/u_{sat})C$. 最大、最小绿灯时间设置为 15 秒和 2 秒. 最后,根据不同控制算法和上述信号灯的设置和转换编写相应的程序,并嵌入 PARAMICS 仿真模型中.

4 仿真结果与分析

根据对北京大望桥地段的实际观测,选取附近的一个典型的入口匝道作为仿真对象,用微观交通仿真软件 PARAMICS 建立了该匝道的路网拓扑图,再加入上述三种不同算法,进行仿真研究,如图 2 所示. 仿真软件模拟了上班时段 7:30—8:30 的交通状况,用 PARAMICS 的 profile 文件设置了三个时段:7:30—7:50,7:50—8:10 和 8:10—8:30,分别安排了总需求的 20%、60%和 20%的车辆. 与无控制相比,上述三种算法都不同程度地改善了快速路的交通状况,如表 1 所示.

表 1 不同算法的控制效果

Table 1 Control effect of different Strategies

	拥挤时段数 n	匝道平均 排队长度 (veh)	路网平均 延时 (veh·h)	快速路下游 平均/最大 占有率 (%)	快速路下游 平均速度 (km/h)	快速路下游 平均密度 (veh/km)	快速路下游 平均流量 (veh/h)
NO	138	6.83	96.27	0.313 / 0.500	76.40	19.31	1 403.15
ALINEA	108	22.69	101.35	0.282 / 0.467	81.31	17.34	1 341.47
NEW	98	19.58	88.76	0.279 / 0.422	80.32	18.10	1 368.83
MIXED	104	7.69	81.84	0.274 / 0.477	81.84	17.04	1 352.73

从拥挤时段数量来看,与 NO-CONTROL 相比,ALINEA,NEW-CONTROL 和 MIXED-CONTROL 三种算法分别减少了约 22%,29%和 25%. 可见三种算法的效果差不多,都能改善快速路交通流,减少拥挤.

从车辆平均延时来看,由于 ALINEA 算法只考虑快速路下游交通流,不考虑匝道的排队长度,所以它虽然能减少快速路上的车辆延时,但却增加了匝道上车辆的延时,这样 ALINEA 反而会稍微增加整个路网的车辆延时 (+ 5.3%). 而 NEW-CONTROL 又考虑了快速路上下游之差,这影响到匝道

的调节率,所以可以从整体上减少路网车辆的延时 (- 7.8%); MIXED-CONTROL 除考虑上述两个方面外,还加入排队长度的计算,因此减少路网车辆延时的效果比 NEW-CONTROL 还要好 (- 15%).

从匝道平均排队长度来看,只有 MIXED-CONTROL 考虑了排队长度,因此效果明显要好于其它两种算法,而且只比 NO-CONTROL 略有增加. 而 NEW-CONTROL 由于考虑快速路上下游之差,所以效果较 ALINEA 略好,如图 3 所示.

快速路下游的临界占有率为 26%,严重拥挤

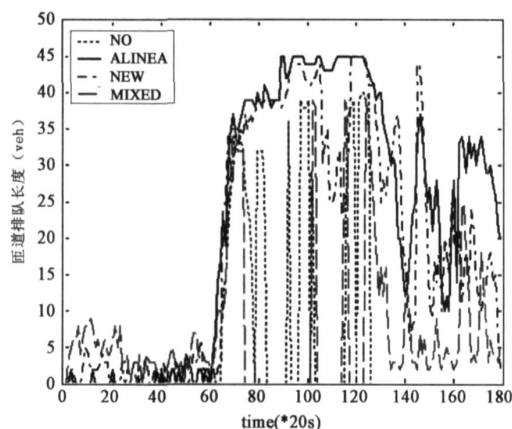


图3 入口匝道排队长度

Fig.3 Traffic queue of the onramp

或交通瘫痪时的占有率为 50 %。NO-CONTROL 时, 最大占有率为 50 %, 即为严重拥挤或瘫痪。三种算法都能将下游平均占有率维持在临界占有率附近, 而且最大占有率都没达到 50 %, 相对于 NO-CONTROL 改善了许多。在这个方面, 三种算法的效果也差不多, 因为他们都是以保持快速路交通流运行在最佳状态为目标的, 即都希望快速路下游占有率维持在临界占有率附近。

快速路下游的速度、流量和密度如图 4, 5, 6 所示。从图中可以看到不同算法在三个不同时段段的仿真效果。第一个时段, 由于交通需求量不大, 快速路的交通流状况在有算法控制和无算法控制时差不多, 都保持在较好的水平。第二个时段, 交通需求量增加, 交通状况急剧变差, 但有算法控制下的状况明显要比 NO-CONTROL 好。第三个时段, 交通需求又开始减少, 但受第二个时段的影响, NO-CONTROL 时拥挤消除比较慢, 交通状况明显不如算法控制的。从平均值来看, MIXED-CONTROL 比 ALINEA 效果要略好, NEW-CONTROL 比 ALINEA 效果要略差。

从交通流特征和算法特点可以分析产生上述差异的原因。在低需求时, 快速路上游交通量 Q_{up} 和匝道入口交通量 Q_{in} 之和小于快速路的最大容量。此时快速路的交通流密度较低, 车速较高, 处于非拥挤状态, 而且交通流比较平稳, 有规律性, 近似符合均匀分布, 所以三种算法的效果都差不多。在高需求时, 快速路上游交通量 Q_{up} 和匝道入口交通量 Q_{in} 之和大于快速路的最大容量, 此时快速路的交通流密度超过临界密度 ρ_c , 车速较低, 处于拥

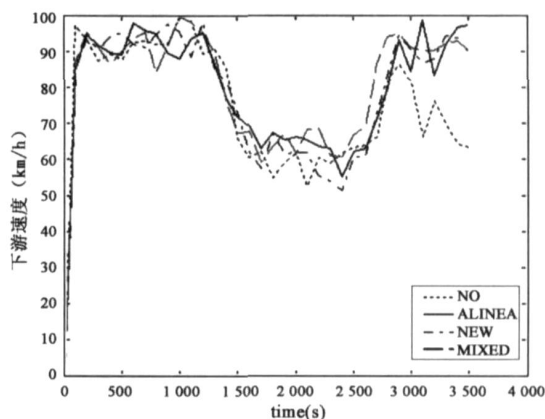


图4 快速路下游速度

Fig.4 Downstream speed on the freeway

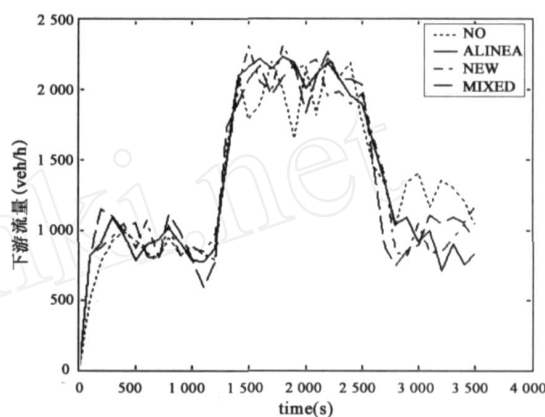


图5 快速路下游流量

Fig.5 Downstream flow on the freeway

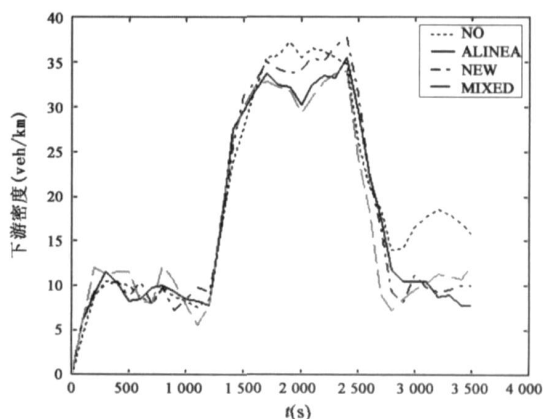


图6 快速路下游密度

Fig.6 Downstream density on the freeway

挤状态, 而且交通流不稳定, 随机性大, 所以三种算法就表现出不同的控制效果。ALINEA 算法的控制目标只关注快速路交通流的密度, 而不考虑匝道的

排队长度,所以在交通需求量大时就会造成匝道车辆排队加剧,从而增加整个路网的车辆延时. NEW-CONTROL 虽在 ALINEA 基础上对算法进行了改进,但依然没有考虑匝道的排队长度,所以在交通需求量大时效果也不是很好. MIXED-CONTROL 算法的控制目标既关注快速路主线的密度又考虑匝道的排队长度,所以在交通需求量大时能做出较好的协调,使整个路网的效益更高.

5 结束语

通过微观交通仿真软件 PARAMICS 模拟大望桥附近路段的入口匝道交通状况对三种匝道感应控制算法进行仿真,仿真结果表明三种算法都能改善快速路交通流状况,减少拥挤的发生,维持快速路下流占有率在临界占有率附近,但同时也增加了匝道的排队长度. 从总体的控制效果来看, MIXED-CONTROL 比 ALINEA 和 NEW-CONTROL 的效果都要好,尤其是在交通拥挤时段(高需求时), MIXED-CONTROL 非常有效,只比 NO-CONTROL 时稍微增加了匝道排队长度. 因此, MIXED-CONTROL 是比较适合于实际应用的匝道感应控制算法.

目前,城市快速路的控制越来越显得重要,其中匝道控制是最有效的方法,而匝道控制是以牺牲匝道上车辆为代价来提高快速路的交通状况. 因此一种好的匝道控制算法,应该能最小化快速路瓶颈处的拥挤发生率,同时又要使匝道上车辆牺牲尽量少, MIXED-CONTROL 就是其中一种,这类算法才具有实际应用的前景.

参考文献:

- [1] Papageorgiou M, Hadj-Salem H, Blosseville J M. ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering[J]. Transportation Research Record, 1991, 320: 58 - 64.
- [2] Papageorgiou M, Kotsialos A. Freeway ramp metering: an overview[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(4): 271 - 279.
- [3] Klaus Bogenberger, Adolf D, May. Advanced coordinated traffic responsive ramp metering strategies[R]. California PATH Working Paper, Berkeley, 1999: 1 - 22.
- [4] 丁同强, 郑黎黎, 常涛涛. 高速公路入口匝道控制策略研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 10: 755 - 757. [DING Tong-qiang, ZHENG Li-li, CHANG Yun-tao. Study of freeway ramp metering strategies[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 10: 755 - 757.]
- [5] 陈德望, 等. 基于模糊神经网络的城市高速公路入口匝道控制算法[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(2): 100 - 105. [CHEN De-wang, et al. Freeway ramp control algorithm based on neurofuzzy networks[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(2): 100 - 105.]
- [6] 林尚伟, 林岩. 基于模糊逻辑与可变限速的城市快速路控制[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(1): 51 - 56. [LIN Shang-wei, LIN Yan. Urban expressway control based on fuzzy logic and variable speed limit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(1): 51 - 56.]
- [7] 陈德望, 吴建平, 蔡伯根. 关于城市快速路控制与管理的若干讨论[J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(3): 87 - 91. [CHEN De-wang, WU Jian-ping, CAI Bai-geng. Discussions of the management and control of urban freeway/expressway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2005, 5(3): 87 - 91.]
- [8] 吕智林, 等. 基于多 Agent 的高速公路入口匝道智能控制策略[J]. 计算机应用, 2004(5): 126 - 128. [LV Zhi-lin, et al. An on-ramp intelligent control strategy of freeway based on multi-agent[J]. Computer Applications, 2004(5): 126 - 128.]
- [9] 杨兆升, 保丽霞, 刘新杰, 王彦新. 城市快速路匝道调节与动态速度引导的协同策略[J]. 吉林大学学报, 2006(3): 144 - 147. [YANG Zhao-sheng, BAO Li-xia, LIU Xin-jie, WANG Yan-xin. Study on coordination of ramp metering and dynamic speed guidance for urban expressway[J]. Journal of Jilin University, 2006(3): 144 - 147.]
- [10] 刘智勇. 智能交通控制理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 228 - 232. [LIU Zhi-yong. Intelligent Transport Control Theory and Its Application[M]. Beijing: Science Publishing Company, 2003: 228 - 232.]
- [11] Pushkin Kachroo, Kumar Krishen. System dynamics and feedback control design formulations for real time ramp metering[J]. Transactions of the SDPS, Journal of integrated design & Process science, 2000, 4(1): 37 - 54.
- [12] Pushkin Kachroo, Kaan Ozbay. Feedback Ramp Metering in Intelligent Transportation Systems[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum, 2003: 211 - 221.