

# 城市快速路入口匝道控制方法

陈学文<sup>1,2</sup>, 王殿海<sup>1</sup>, 金 盛<sup>1</sup>, 王彩霞<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 交通学院, 长春 130022; 2. 辽宁工业大学 交通工程学院, 辽宁 锦州 121001)

**摘要:**以北京快速路为研究对象, 基于典型路段调查数据对快速路的交通流特性进行了分析, 提出了入口匝道优化控制方法。采用时间占有率与速度两个参数作为控制变量实现入口匝道的反馈控制机制, 以两者的综合控制效果确定入口匝道的调节流量。采用模式识别中的线性判别函数对模型中的临界阈值进行标定。利用 VISSIM 对提出的控制方法进行了模拟验证。结果表明: 与无信号控制方式相比, 本文方法可提高主线平均速度 8%左右, 减小行程时间 7.2%。

**关键词:** 交通运输系统工程; 城市快速路; 入口匝道控制; 模拟验证

**中图分类号:** U412.36    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1671-5497(2008)Sup.-0043-06

## On-ramp metering control strategy of urban expressway

Chen Xue-wen<sup>1,2</sup>, Wang Dian-hai<sup>1</sup>, Jin Sheng<sup>1</sup>, Wang Cai-xia<sup>1</sup>

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Traffic Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

**Abstract:** Taking Beijing urban expressway system as a research object, its traffic flow characteristics were analyzed based on the survey data collected from its representative sections, and a optimization control strategy for the on-ramp metering was suggested. A feedback control to the on-ramp was realized by the time occupancy and the vehicle speed as the control variables, and using the comprehensive control effect of both parameters to determine the on-ramp metering rate. The critical threshold in the model was calibrated using the linear discriminant function in the pattern recognition. The suggested strategy was verified by simulation with software VISSIM. The results show that compared with those of without signal control mode, the suggested strategy increases the average speed on the mainline upstream at on-ramp by about 8%, and decreases the travel time on the mainline section by 7.2%.

**Key words:** engineering of communications and transportation system; urban expressway; on-ramp metering; simulation verify

匝道控制被认为是一种缓解高速公路交通拥挤的有效方式。国内外学者对高速公路匝道控制

进行了大量研究, 可以概括为以下 3 个方面。在匝道局部控制方面, 主要以高速公路主线当前的

收稿日期: 2006-05-20.

基金项目: “973”国家重点基础研究发展规划项目(2006CB705505); 国家自然科学基金项目(50338030); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划项目(357).

作者简介: 陈学文(1974-), 男, 讲师, 博士。研究方向: 交通控制与交通流理论。E-mail: xuewen.chen@163.com

通讯联系人: 王殿海(1962-), 男, 教授, 博士生导师。研究方向: 交通控制。E-mail: wangdianhai@sohu.com

交通状态为控制条件,运用优化技术、自动化控制理论、模糊控制和神经网络控制等技术确定入口匝道处的实际流率。比如 Papageorgiou 和 Middelham 提出的经典 ALINEA 算法<sup>[1,2]</sup>,主要以入口匝道主线下游占有率为控制变量与期望占有率进行比较确定入口匝道的调节率,该算法的显著特点在于控制方式比较平缓,适合于高速公路的单入口匝道控制。Zhang<sup>[3]</sup> 等与 Taylor<sup>[4,5]</sup> 等分别采用神经网络、模糊控制技术研究入口匝道控制取得了一些成果,但这类方法距离实时应用还有差距。在匝道协调控制方面,如 Jacobsen 提出的 Bottleneck 算法<sup>[6]</sup>,Lau 提出的 Zone 算法等<sup>[7]</sup>。这些算法是在局部优化控制的基础上,以瓶颈处的流量控制为目标,结合历史交通需求及交通拥挤影响范围确定静态协调区域以实现小范围多匝道内部协调控制。该研究方法可以实现高速公路主线状态的改善,但容易加剧辅路拥挤现象。在交通通道集成控制<sup>[8-10]</sup> 方面,主要将城市道路交叉口的信号控制、匝道调节、高速公路控制、VMS 控制及路线诱导等不同控制措施进行综合,目的是从大范围路网角度出发解决交通拥挤问题。但该方法仍处于理念研究阶段,实时应用性较差。通过以上分析可知,国内外对高速公路匝道控制理论的研究是比较完善的,但对于快速路匝道的控制研究还相对较少,而且北京市快速路入口匝道目前仍未采用信号控制。作者主要从工程应用角度出发,以北京市快速路为研究对象,根据实际交通调查数据分析交通流特性,提出快速路入口匝道优化控制方法,采用时间占有率为控制变量实现入口匝道的信号调节。

## 1 交通流特性分析

为分析交通流特性,采用摄像法对北京快速路北三环联想桥至四通桥与东二环朝阳门桥至东四十条桥路段进行了多次实地调查,采集了大量交通流数据(流量、速度、时间占有率)。调查时间经历了早晚高峰时段,获得的调查数据为控制方法的模拟验证提供了必要条件。这里仅以快速路北三环联想桥至四通桥(见图 1)的调查数据为例分析交通流参数的变化规律。其中,入口匝道主线上游内侧车道流量、速度和时间占有率的时变特性如图 2 所示(其他车道也有类似规律,只是曲线形状略有不同,这里不再细述)。

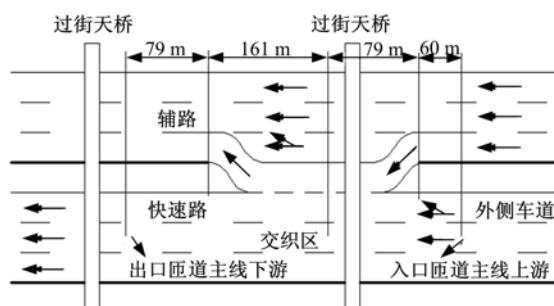
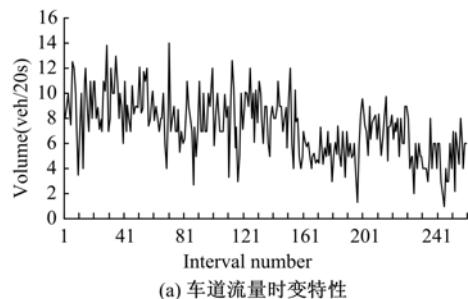
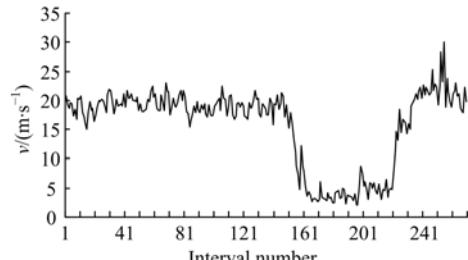


图 1 联想桥-四通桥交通数据调查示意图

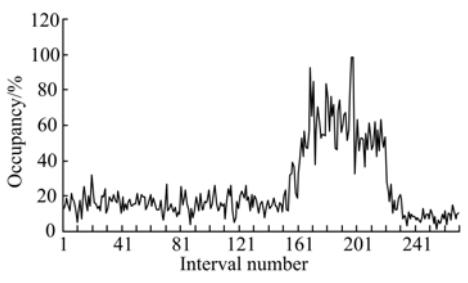
Fig. 1 Sketch map between Lianxiang Bridge and Sitong Bridge survey



(a) 车道流量时变特性



(b) 车道速度时变特性



(c) 车道占有率时变特性

图 2 入口匝道主线上游内侧车道流量、速度及时间占有率的时变特性

Fig. 2 Time dependent characteristics of traffic volume, speed and occupancy on inner lane of mainline upstream at on-ramp

从图 2 可以看出,在交通流从非拥挤状态向拥挤状态转变(或相反)的过程中,速度快速下降(或上升)而占有率则快速上升(或下降),两曲线变化较明显,而流量曲线没有明显变化。也就是说,速度与时间占有率两参数较流量参数能更好

地反映交通流状态的变化。因此,作者采用这两个参数作为控制变量来判断快速路的交通状态,进而确定入口匝道的调节量来实现控制目的。

图3为北三环联想桥至四通桥路段交通流参数的变化关系散点图。

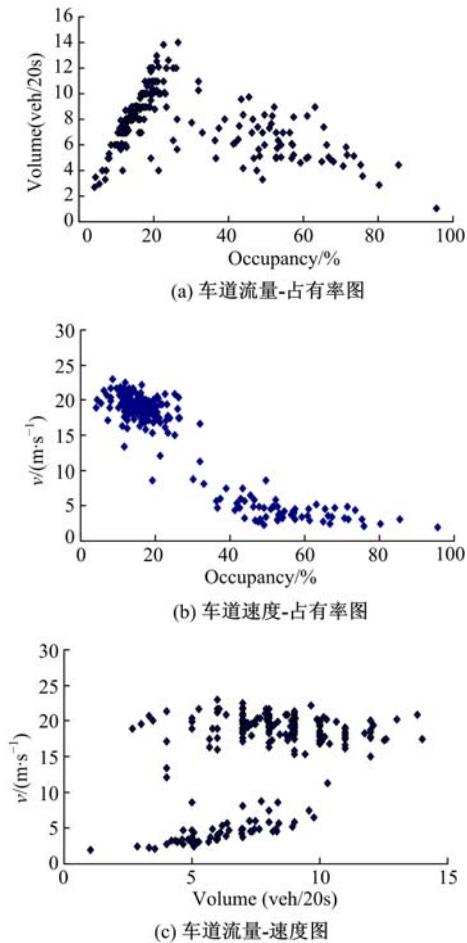


图3 入口匝道主线上游内侧参数关系图

Fig. 3 Relationship among speed, occupancy and traffic volume on inner lane of mainline upstream at on-ramp

从图3中同样可以看出,在畅通状态与拥挤状态之间存在一个短暂的不稳定状态,而这种状态也正是控制的关键,其对应的上界与下界值乃是交通控制阈值确定的理论依据。通过交通流的时变特性分析发现,时间占有率和速度两参数均可较好地反映交通状态的改变,因此可以利用其中任一参数来判定交通状态的变化,但单一的参数又具有不稳定性<sup>[11]</sup>。从图2、图3可知,当交通流处于拥挤状态时,速度与占有率两参数均存在一定的波动现象。因此,作者提出基于时间占有率与速度双重指标的入口匝道控制方法。

## 2 占有率与速度联合控制方法

### 2.1 模型的建立

基于交通流特性分析可知,速度和占有率两个参数可以较好地反映交通流状态的变化。因此本文采用时间占有率与速度参数分别作为控制变量来确定入口匝道的调节量,然后将各参数确定的调节量的综合值作为该入口匝道的实际调节量。借鉴 ALINEA 算法<sup>[2]</sup>的思想实现反馈控制,当入口匝道上游主路的占有率达到期望的占有率,入口匝道调节率较前一时刻的调节率有所下降,此时通过减小信号的绿灯时间来实现;反之,入口匝道上游主路的占有率小于期望的占有率,入口匝道调节率较前一时刻的调节率有所上升,通过增加信号的绿灯时间来实现。当交通需求过低时,信号灯可常绿。这样根据快速路主路交通状态的变化实现入口匝道的调节,同时确保入口匝道上游主路的占有率维持在期望占有率附近,使快速路主路运行在最大容量附近,占有率控制模型如下

$$r_1(k) = q(k-1) + \varphi_1 [o_c - o_u(k-1)] \quad (1)$$

同占有率控制类似,速度控制模型如下

$$r_2(k) = q(k-1) + \varphi_2 [v_u(k-1)/v_c - 1] \quad (2)$$

式中: $q(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻入口匝道流量检测器实测值; $\varphi_1, \varphi_2$ 为调节系数; $o_c$ 为主路上游占有率临界值; $v_c$ 为主路上游速度临界值; $o_u(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻主路上游占有率; $v_u(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻主路上游平均速度,km/h。

考虑速度与占有率在数值上相差较大,将速度变量进行调整以期达到与占有率具有类似的变化趋势(控制平缓),本文采用 $v_u(k-1)/v_c - 1$ 作为调整量实现入口匝道的调节。

通过交通流特性分析可知,当交通流处于拥挤状态时占有率具有较大波动性,此时的调节率应以速度控制为主,而畅通状态时两者变化基本一致,最终将两者的综合控制值赋予不同的权重来决定实际的入口匝道调节量,即

$$r(k) = \mu r_1(k) + (1 - \mu) r_2(k) \quad (3)$$

同时考虑如下约束条件

$$r_{\min} \leq r(k) \leq r_{\max} \quad (4)$$

目的是为了使辅路交通不致发生锁死现象。

根据入口匝道的周期 C 及调节率  $r(k)$  计算

入口匝道进入的车辆数  $n$ 。

入口匝道进入的车辆数:  $n = Cr(k)/3600$

入口匝道有效绿灯时间:  $g_e = 3600n/S_r$

入口匝道绿灯显示时间:  $G = g_e + l - A$

入口匝道红灯时间:  $R = C - G - A$

式中:  $r_{\min}$ 、 $r_{\max}$  为匝道的最小、最大调节率, veh/h;  $\mu$  为权重系数, 取值为 0~1;  $S_r$  为入口匝道的饱和流率, veh/h;  $A$  为入口匝道黄灯时间, s;  $l$  为损失时间, s。

## 2.2 检测器的布设

车辆检测器是快速路控制系统中不可缺少的组成部分, 其检测数据是控制中心分析、判断各种交通状态以及发出信息、提出控制方案的主要依据。因此, 车辆检测器的布设直接影响到快速路系统的整体控制水平。本文中检测器的铺设不同于以往的方式<sup>[1]</sup>, 考虑到入口匝道主线上游交通状态不受汇入车流的影响, 将主线检测器布设在入口匝道主线上游(距离入口匝道 100~150 m); 同时为得到速度参数而布设双线圈检测器(线圈 2×2 m、线圈间距 2 m)。具体检测器铺设位置示意图如图 4 所示。

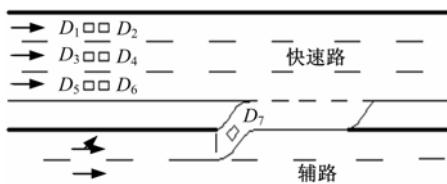


图 4 入口匝道检测器布设示意图

Fig. 4 Detector's disposal between on-ramp and mainline upstream of urban expressway

图 4 中,  $D_1$ 、 $D_3$  和  $D_5$  检测器用于检测快速路主路流量、时间占有率;  $D_1 \sim D_6$  用于检测快速路主路速度;  $D_7$  用于检测入口匝道流量。

## 2.3 参数标定

模型中的临界速度  $v_c$  与临界占有率值  $o_c$  两参数是控制的关键, 本文采用模式识别中的线性判别方法, 把交通状态分为畅通和拥挤两种状态, 对临界速度和临界时间占有率两参数进行标定。

设  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ , 其中  $x_1, x_2, \dots, x_n$  是  $\mathbf{X}$  的若干特征值, 对于  $n$  维空间中的  $c$  个模式类分别给定一个由  $n$  个特征组成的单值函数, 称作判别函数。在  $c$  类情况下, 共有  $c$  个判别函数。记为  $g_1(x), g_2(x), \dots, g_c(x)$ , 对应模式类分别为  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_c$ 。

对判别函数, 假定模式  $\mathbf{X}$  属于第  $i$  类, 则有

$$g_i(x) > g_j(x) \quad i, j = 1, 2, \dots, c, i \neq j.$$

如果特征值满足线性规律, 则判别函数为

$$g_i(x) = w_{i1}x_1 + w_{i2}x_2 + \dots + w_{in}x_n + w_{i0}$$

$$\text{即: } g_i(x) = w_{i0} + \sum_{k=1}^n w_{ik}x_k, \quad i = 1, 2, \dots, c$$

式中:  $w_{ik}$  是特征系数, 称为权;  $w_{i0}$  称为阈值权。

对于第  $i$  类模式, 定义  $n$  维权向量  $\mathbf{w}_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in})^T$ , 则  $g_i(x) = \mathbf{w}_i^T \mathbf{X}_i + w_{i0}, i = 1, 2, \dots, c$ 。对于交通状态而言, 分为畅通和拥挤两种情况, 即对  $c=2$  时的情况加以讨论, 此时

$$g_1(x) = \mathbf{w}_1^T \mathbf{X}_1 + w_{10}; \quad g_2(x) = \mathbf{w}_2^T \mathbf{X}_2 + w_{20}$$

如果  $\mathbf{X} \in \xi_1$ , 则  $g_1(\mathbf{X}) > g_2(\mathbf{X})$ , 即

$$(\mathbf{w}_1^T - \mathbf{w}_2^T) \mathbf{X} + (w_{10} - w_{20}) > 0$$

令  $\mathbf{w}^T = (\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_2)^T$ ,  $w_b = (w_{10} - w_{20})$  得

$$g(\mathbf{X}) = \mathbf{w}^T \mathbf{X} + w_b$$

所以, 易知对于两类模式的线性分类器的决策法则为

$$\begin{cases} \mathbf{X} \in \xi_1, & \text{if } g(\mathbf{X}) > 0 \\ \mathbf{X} \in \xi_2, & \text{if } g(\mathbf{X}) < 0 \end{cases}$$

为了求解判别函数, 可以定义增广模式向量  $\mathbf{Y}$  与广义权向量  $\mathbf{A}_i$

$$\mathbf{Y} = (1, x_1, x_2, \dots, x_n)^T$$

$$\mathbf{A}_i = (w_{i0}, w_{i1}, \dots, w_{in})^T$$

则判别函数改为  $g_i(\mathbf{Y}) = \mathbf{A}_i^T \mathbf{Y}$ , 所以只需求得广义权向量  $\mathbf{A}$ , 即能通过判别函数判断交通状态。

在实际应用中, 广义权向量  $\mathbf{A}$  的计算可以采用固定增量算法。具体步骤如下:

(1) 把全部样本看作是一个序列, 每当前一步迭代的权向量把某个样本错误分类时, 就对这个权向量作一次修正, 而不是等当前权向量  $\mathbf{A}_k$  对全部样本计算后再修改。

(2) 根据准则函数  $J = \sum_{\mathbf{Y} \in \Psi_A} (-\mathbf{A}^T \mathbf{Y})$  得到迭代公式:  $\mathbf{A}_{k+1} = \mathbf{A}_k + \rho_k \sum_{\mathbf{Y} \in \Psi_{A_k}} \mathbf{Y}$ , 设步长增量  $\rho_k = 1$  修正当前权向量  $\mathbf{A}_k$ 。

(3) 把训练集  $\xi_1^*$  和  $\xi_2^*$  中的增广模式向量从  $\mathbf{Y}$  中依次取出, 计算  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{Y}$  的内积  $\mathbf{ATY}$ , 权向量  $\mathbf{A}$  按以下规则调整: ①如果  $\mathbf{Y} \in \xi_1^*$ , 而  $\mathbf{ATY} \leq 0$ , 则用  $\mathbf{A} + \mathbf{Y}$  代替  $\mathbf{A}$ ; ②如果  $\mathbf{Y} \in \xi_2^*$ , 而  $\mathbf{ATY} \geq 0$ , 则用  $\mathbf{A} - \mathbf{Y}$  代替  $\mathbf{A}$ ; ③如果  $\mathbf{Y} \in \xi_1^*$ , 而  $\mathbf{ATY} > 0$ , 则  $\mathbf{A}$  不变; ④如果  $\mathbf{Y} \in \xi_2^*$ , 而  $\mathbf{ATY} < 0$ , 则  $\mathbf{A}$  不变。

(4) 全部模式向量都处理一次称为一次迭

代,然后重新继续执行,直到 A 不变化时停止。

本文分别对四通桥-联想桥及朝阳门桥-东四十条桥两地点的入口匝道上游交通状况进行了分析,得到速度和时间占有率的判别函数分别如下:

四通桥-联想桥入口匝道上游

$$g(v) = -4.619 + 0.318v,$$

$$g(o) = -2.293 + 8.602o$$

朝阳门-东四十条桥入口匝道上游

$$g(v) = -4.855 + 0.368v,$$

$$g(o) = -2.049 + 7.953o$$

令  $g(v)=0, g(o)=0$ , 得到上述两地点临界状态的速度和时间占有率分别为:  $v_c=14.525 \text{ m/s}$ ,  $o_c=0.267$ ;  $v_c=13.192 \text{ m/s}$ ,  $o_c=0.258$ 。

## 2.4 控制步骤

(1) 在采样间隔内检测入口匝道上游主线的占有率  $o_u(k-1)$ , 平均速度  $v_u(k-1)$  及入口匝道流量实测值  $r(k-1)$ 。

(2) 根据式(1)、(2)分别计算下一时间段入口匝道的调节率  $r_1(k), r_2(k)$ , 并最终综合得到入口匝道的调节率  $r(k)$ 。

(3) 判断  $r(k)$  是否小于最小调节率,若是,则取最小调节率  $r_{\min}$ 。

(4) 判断  $r(k)$  是否大于最大调节率,若是,则取最大调节率  $r_{\max}$ 。

(5) 根据式(3)确定的调节率  $r(k)$  计算该调节率下的绿灯显示时间 G 和红灯时间 R。

(6)  $k=k+1$ , 进入下一控制间隔,返回(1)。

## 3 模拟验证

为了验证算法的可行性,采用 VISSIM 对北京快速路东二环朝阳门-东四十条桥地点的双入口匝道进行模拟,模拟时间为 90 min,模型采用的具体参数标定结果见表 1,与未采用信号控制方式比较结果如表 2 所示。

表 1 参数标定结果

Table 1 Results of parameter calibration

标定参数	标定值
入口匝道上游主线检测器位置	100 m
临界速度	45 km/h
临界时间占有率	0.26
$\mu$	0.4
入口匝道信号周期	30 s
调节系数 1, 2	80 veh/h
入口匝道最小、最大调节量约束	300 veh/h 1200 veh/h

表 2 两种控制方式结果对比

Table 2 Result comparison between two control modes

控制指标	控制方式		
	本文控制	无控制	提高率
第一入口主线上游平均速度	30.83	27.64	11.5%
第二入口主线上游平均速度	25.78	24.27	6.2%
主线行程时间均值	58.31	62.83	7.2%

模拟结果表明:作者提出的控制方法可以提高第一个入口匝道主线上游平均车速 11.5%, 提高第二个入口匝道主线上游平均车速 6.2%, 主线总平均速度提高 8% 左右。主线路段(第一入口匝道上游至第二入口匝道下游 448 m)行程时间减小 7.2%。

图 5 至图 7 为两种控制方式下的对比效果图。从图 5 和图 6 中可以看出,第二入口主线

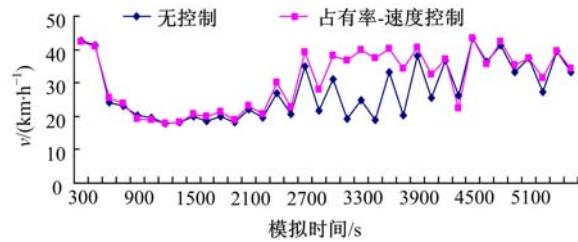


图 5 第一入口主线上游平均车速对比图

Fig. 5 Comparison of average speeds on mainline upstream at on-ramp 1

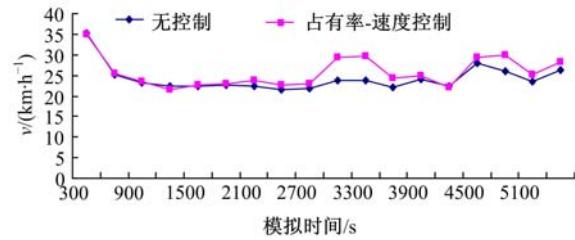


图 6 第二入口主线上游平均车速对比图

Fig. 6 Comparison of average speeds on mainline upstream at on-ramp 2

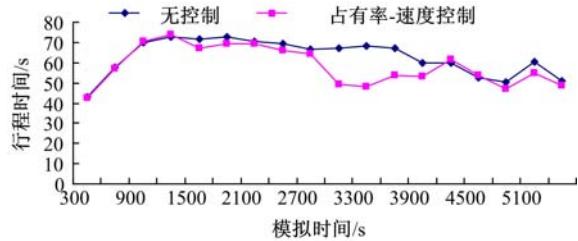


图 7 主线行程时间对比图  
Fig. 7 Comparison of travel time on mainline under two control modes

游平均车速的提高率低于第一入口匝道主线上游平均车速的提高率,原因在于这两入口匝道间的距离过近致使第二入口匝道主路上游交通状态受其上游交通状态的影响而造成的。

#### 4 结束语

以北京市快速路为研究对象,利用典型路段调查数据对其交通流特性进行分析,采用时间占有率与速度两参数作为控制变量实现入口匝道的调节。利用VISSIM对作者提出的控制方法进行模拟验证。模拟结果表明:此法与无信号控制方法相比可使主线平均车速提高8%左右,行程时间减小7.2%,说明本文提出的控制方法是可行的。但缓解快速路交通拥堵仅靠入口匝道的局部控制是不行的,应在局部优化控制的基础上进一步研究快速路匝道与城市道路关联交叉口的协调控制。

#### 参考文献:

- [1] Papageorgiou M, Hadj-Salem H, Middelham F. ALINEA local ramp metering summary of field results[J]. Transportation Research Record, 1997, 1603: 90-98.
- [2] Papageorgiou M, Hadj S H, Blosseville J M. ALINEA: a local ramp feedback control law for on-ramp metering[J]. Transportation Research Record 1991, 1320:58-64.
- [3] Zhang H, Ritchie S G. Freeway ramp metering using artificial neural networks[J]. Transportation Research Part C, 1997, 5(5):273-286.
- [4] Taylor C, Meldrum D, Jacobson L. Fuzzy ramp metering: design overview and simulation results[R]// Transportation Research Record 1634, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1998:10-18.
- [5] 陈德望,王飞跃,陈龙. 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, Wang Fei-yue, Chen Long. Free-way ramp control algorithm based on neurofuzzy networks[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(2):100-105.
- [6] Jacobsen L, Henry K, Mahyar O. Real-time metering algorithm for centralized control[J]. Transportation Research Record 1232, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 1989:17-26.
- [7] Lau R. Ramp metering by zone - the minnesota algorithm[R]. Minnesota Department of Transportation, 1997.
- [8] Zhang H, Recker W W. On optimal freeway ramp control policies for congested traffic corridors[J]. Transportation Research Part B, 1999, 33(6):417-436.
- [9] Papageorgiou M. An integrated control approach for traffic corridors[J]. Transportation Research Part C, 1995, 3(1):19-30.
- [10] Zhang H, Ritchie S G, Recker W W. Some general results on the optimal ramp control problem[J]. Transportation Research Part C, 1996, 4(2):51-69.
- [11] 王英平. 城市快速路交通流数据间隙特性研究[D]. 长春:吉林大学交通学院,2006.  
Wang Ying-ping. Study on the data gap characteristics of traffic stream at urban expressways [D]. Changchun:College of Transportation, Jilin University, 2006.
- [12] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual [M]. Washington DC: National Research Council, 2000.