

文章编号: 0253-374X(2009)02-0207-07

基于ALINEA算法的上海快速路入口匝道控制方法

陆克丽霞, 杜豫川, 孙立军

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:通过分析上海典型匝道——内环内侧武夷路上匝道, 将国外运用较为成功的单点控制方法——ALINEA算法, 在附加考虑匝道排队长度限制的基础上, 运用于实际的工程实践。经过离线模拟, 发现主线速度得以提高, 同时匝道流量的脉冲性被一定程度地平滑了。故认为: 以ALINEA算法为基础的控制方法, 适用于上海快速路入口匝道控制。

关键词: 快速路; 入口匝道控制; ALINEA算法; 排队长度限制

中图分类号: U 491

文献标识码: A

ALINEA Algorithm-based On-ramp Control for Expressways in Shanghai

LU Kelixia, DU Yuchuan, SUN Lijun

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: ALINEA algorithm is adopted to solve the congestion of the merging area of Wuyi on-ramp with a consideration of the restriction of the queue length by analyzing the geometric layout and traffic data of the Wuyi on-ramp. Results show that the speed of the mainline has enhanced and the pulse characteristics of ramp volumes has weakened by off-line simulation. So ALINEA algorithm is deemed to be a suitable method for on-ramp control of Shanghai expressway.

Key words: expressway; on-ramp control; ALINEA algorithm; restriction of the queue length

随着经济的快速发展, 机动车数量急剧增多, 而快速路对出行者的吸引力, 致使大量车流涌入, 交通需求超过交通供给, 交通阻塞现象屡见不鲜。快速路交通流的这些特点, 亟需有效的交通控制方法。

与城市快速路较为相似的是高速公路。国外对

高速公路的交通控制已经进行长期大量的研究, 其中, 入口匝道控制是研究最为深入、应用最为广泛且最有效的一种缓解高速路拥挤的交通控制方式, 它通过调节进入快速路的交通总量及其时空分布, 来避免或消除快速路主线的交通拥挤。

然而, 快速路和高速公路在设施结构和交通模式上存在着很多的差异性, 归纳起来主要有: 快速路匝道密集, 主线经常处于高饱和运行状态, 匝道与地面交叉口的间距较小, 周边路网发达, 匝道车辆的可行替代路径较多^[1]。

这些差异决定了城市快速路匝道调节不可直接引用国外现有的经验和方法, 而是需要在借鉴现有方法的同时, 针对实际情况相应地调整。

1 入口匝道单点控制方法回顾

入口匝道的单点控制方法按其是否响应实时的交通状况, 可分为定时控制(fixed-time strategies)和交通感应控制(traffic responsive control)两大类。后者根据控制参量的不同包含多种控制方法^[2]。其中, 可接受间隙汇合控制方法不适用于交通量较大的设施, 故对城市快速路没有实际的意义。以下简要介绍除此之外的其他几种方法。

1.1 定时匝道控制

Wattleworth^[3]在1965年提出的入口匝道定时控制方法的基本思想是: 根据历史交通数据, 估算得到不同时间段的固定调节率。其缺点是没有考虑交通状况的时变性, 不能针对主线实时的交通状况对匝道调节率相应变更。

1.2 感应匝道控制

感应性匝道控制是根据快速路检测线圈实时检测到的交通流参数, 以某个控制参数保持在最佳值

收稿日期: 2007-10-25

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BAG01A02)

作者简介: 陆克丽霞(1983—), 女, 博士生, 主要研究方向为道路与铁道工程。E-mail: lucretiamiki@126.com

附近为目标,计算入口匝道调节率。

(1) 需求-容量差额控制(demand-capacity control, DC)^[2-3] 这是一种动态前馈控制方法。通过调节由匝道进入快速路的交通量,使得进入快速路的总交通需求不超过主线下游设施的总供给能力,从而满足快速路需求供给平衡要求。缺点是对外在不可测量的扰动较敏感。

(2) 占有率控制(occupancy control)^[2-4] 通过实测主线下游占有率,用经验公式来估算其剩余通行能力。如果实测的占有率比临界占有率小,下游剩余通行能力就为正,否则为负。负值说明该段快速路的交通流量超过了最大通行能力,应采用最小调节率^[5]。但此法属于开环控制,对外界的扰动敏感性大。

1.3 控制方法小结

除了定时控制以外,需求-容量差额控制和占有率控制方法都是根据实时交通数据动态确定匝道调节率。优点是简单,易操作;缺点是不能把控制后的变化反馈给系统。换句话说,就是无法达到再优化控制。所以,根据城市快速路的交通流状况,这些方法都不具备很好的适用性。

2 武夷路入口匝道现状及交通特点

2.1 物理位置及现状描述

此次研究以内环内侧的武夷路入口匝道为切入点,其物理位置如图1所示。选取的研究断面主要包括:主线31断面,32断面。经观察发现,即使交通流处于非拥挤态,由于32断面位于物理弯道,车辆也会以相对较低的速度经过;当匝道出现大脉冲流量时,32断面车速会进一步下降,且在接近该断面处车辆会排队,并向上游蔓延。

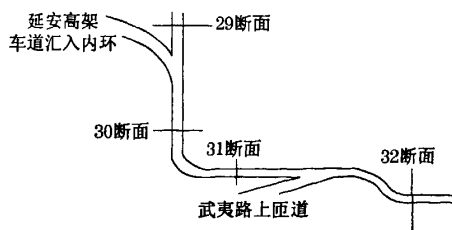


图1 武夷路入口匝道物理位置
Fig1 Location of Wuyi on-ramp

2.2 快速路入口匝道车流特点

对武夷路入口匝道的交通量数据分析后发现,受地面道路信号周期的影响,流量呈明显的“波动

性”。图2为某日早晨6:30—7:30的交通流量时变图,其中,1 min的匝道最大交通量达28 pcu(pcu为标准车辆),最低为3 pcu。

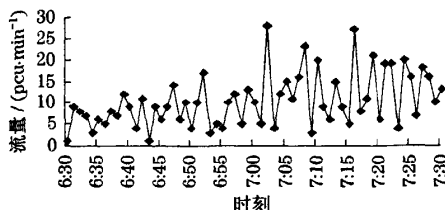


图2 武夷路入口匝道交通流量波动性
Fig2 Undulatory property of traffic volume for Wuyi on-ramp

以2007年4月26日不同时段流量数据为例(图3),把匝道流量和“主线31断面+匝道”流量放在一起比较,发现两个特点:一是前者具有明显的脉冲性,二是二者显现出基本同样的变化趋势。

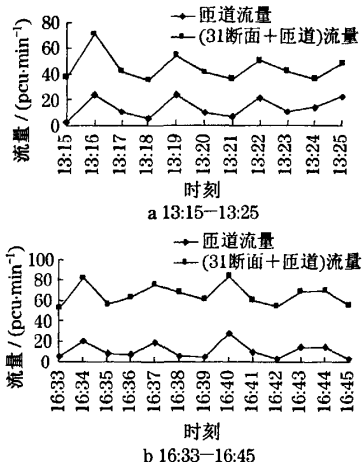


图3 武夷路入口匝道处交通流量脉冲性示意图
Fig.3 Pulse characteristics of traffic volume for Wuyi on-ramp

通过对大量入口匝道分析后发现,波动性和脉冲性是匝道车流的普遍特性,且很多理论研究都指出:匝道流量的脉冲性会冲击主线车流的顺畅性。因此,入口匝道控制的一个方面就是平滑匝道流量的“脉冲性”,从而提高主线车速尤其是汇合点的车速。

3 设计

Papageorgiou 于 20 世纪 70 年代提出了 ALINEA 模型。这是一种基于闭环反馈控制的匝道

控制模型,也是感应匝道控制方法之一^[5-7]。本匝控模型就是以其为原型,根据城市快速路交通量大、密度高的特点,同时考虑到匝道车流的来源和到达规律受地面交叉口影响甚大的特点,根据匝道调节状态下的匝道车辆排队长度,对ALINEA模型的调节率结果进行修正,使改进后的控制模型在策略上协调快速路与地面道路交通流。

此优化策略的合理性在于:虽然快速路与地面道路是空间层次上的两个不同路网,但匝道使它们相互影响和干扰;而在控制快速路交通的同时,若忽略了地面道路受到的关联影响,那么控制的结果就是仅使交通拥挤转移了空间。所以,在对快速路匝道采用的ALINEA控制模型时,需要修正匝道车流的排队,才能使控制更为合理。

3.1 ALINEA控制模型简介

ALINEA单点控制模型是通过维持主线下游占有率在一个期望值附近为控制策略,实现主线通过交通量达到最大的目的。在一个控制周期内,模型计算公式如下所示:

$$r(k) = r(k-1) + K_R[\hat{O} - O_{out}(k-1)] \quad (1)$$

式中: $r(k)$ 是第 k 个控制周期计算的匝道调节率; $r(k-1)$ 是第 $(k-1)$ 个控制周期内绿灯相位实际通过匝道停车线的车辆数; K_R 是参数,调整反馈控制中固定的外部扰动; \hat{O} 是主线下游的期望占有率,通常由分析历史数据获得,已有研究发现, \hat{O} 的选取一般小于最佳占有率; $O_{out}(k-1)$ 是第 $(k-1)$ 个控制周期内主线下游的实测占有率。

已有研究结果认为:ALINEA算法对于 K_R 值的选择不敏感,即使 K_R 在很大范围内变动,系统也能保持良好的控制效果^[6-8]。根据Papageorgiou的研究,当 $K_R = 70 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,可得到最佳控制效果。

ALINEA控制算法实现起来较为简单,主要依靠主线下游的检测线圈来获得实际占有率。线圈埋设、信号灯及信息板布设情况见图4。有学者通过对总旅行时间、匝道延误、匝道平均排队、主线时间平均车速、拥挤时间等指标分析后发现,ALINEA控制的结果均优于其他单点控制方法^[9]。

3.2 基于ALINEA算法的快速路入口匝道控制法

通常,交通流状态可以粗略地分为三种:自由流、拥挤流、阻塞流。所以,当快速路主线处于这三种

不同的交通流状态时,对匝道控制采取的措施也相应为三类:匝道开放、匝道调节和匝道关闭。

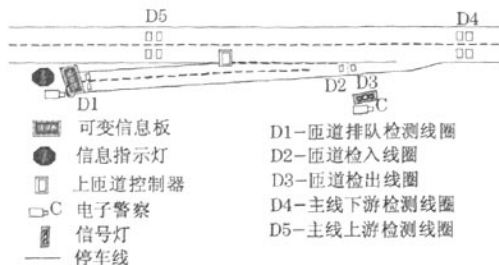


图4 ALINEA控制方法运用时设备布设情况

Fig.4 Locations of the devices for field implementation

在控制流程的设计过程中有两个关键点:①控制阈值的确定;②调节算法与匝道排队长度约束的融合。

合理的控制阈值是“预防为主”,而排队长度约束对调节算法的修正则是快速路与地面交叉口的协调控制。

3.2.1 快速路入口匝道控制阈值确定

随着汽车保有量的逐渐增加,交通高峰这一时间特征越来越弱化。目前,在上海有相当一部分快速路段已出现一天内大部分时间都拥挤的状态,因此,不能仅仅选取高峰时段控制匝道,而是需要根据实时的交通状态来判断所要采取的交通控制措施。

由于任何一种控制都应满足“预防为主”,所以,从以下三个方面来确定匝道控制阈值:

(1) ALINEA模型的控制目标是主线下游占有率。

(2) 在反映主线整体交通状态时,有必要使用较为敏感的交通参数表征主线上游交通状态。

(3) 匝道车流的汇入情况。

通过对主线31断面(图5)、32断面(图6)的连续7d交通数据的分析,对这两个断面的三种交通流状态分别进行7d数据的单独图表描述,将同一个断面在7d内处于相同状态的数据放在同一个数据图表中,具体见图5,6。

鉴于上述三点要求,分别从各数据特征图中选取某一临界值为控制阈值,便可得到主线上下游断面不同状态的阈值点集,从而得到不同的控制条件阈值组合,最终得到武夷路入口匝道控制阈值(表1)。

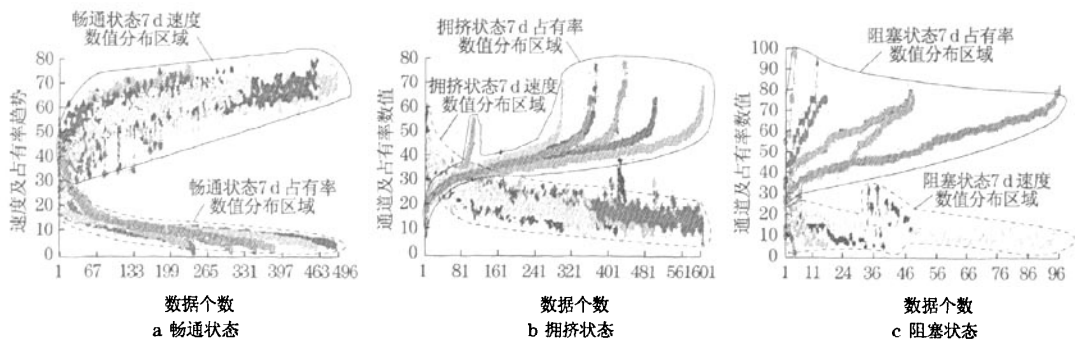


图 5 31 断面 7 d 的畅通、拥挤、堵塞状态数据按占有率升、降序排列

Fig.5 Free, congestion and jam data of main line (31th section) for 7 days arrayed by ascending or descending order about occupancy

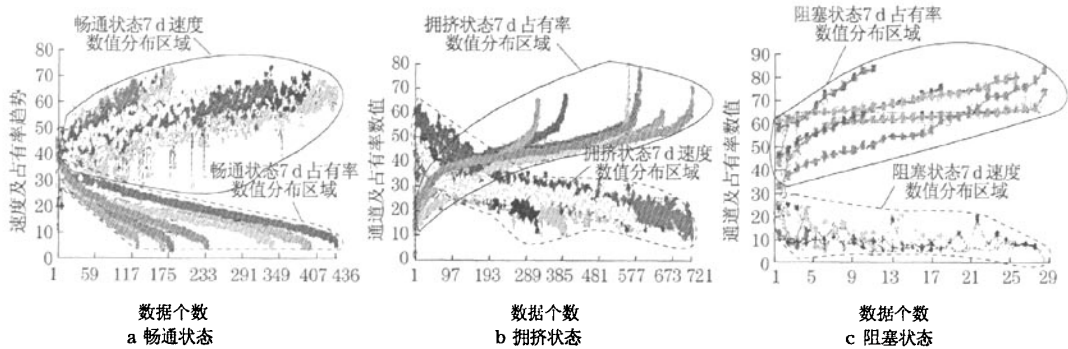


图 6 32 断面 7 d 的畅通、拥挤、堵塞状态数据按占有率升、降序排列

Fig.6 Free, congestion and jam data of main line (32th section) for 7 days arrayed by ascending or descending order about occupancy

表 1 武夷路入口匝道控制阈值

Tab.1 Control threshold about Wuyi on-ramp

控制条件	32 断面		31 断面	(31 断面 + 持续	时间 t/min
	占有 率/%	流量/(pcu· min ⁻¹)	速度/ (km·h ⁻¹)	匝道)流量/ (pcu·min ⁻¹)	
1(开放到调节)	>30			≥80	
2(调节到关闭)	>45	<30	<20		
3(调节到开放)	<30		>40	<80	≥3
4(关闭到调节)	<40	>30	>20		≥3

3.2.2 快速路入口匝道控制流程

如前所述,有效的控制应该是“预防为主”.对于快速路,当发现交通流有从自由流向拥挤流过渡的趋势时,就应调节匝道.这样,既能及时响应实时的交通状态跳转,又能减轻拥挤的程度.

所以,控制流程设计原则是:及时响应从“匝道开放”到“匝道调节”,以及从“匝道调节”到“匝道关闭”;反之,则要通过连续几次状态判别后的综合结

果确定是否改变控制措施,从而保证状态恢复的稳定性.由此得到的快速路入口匝道控制流程见图 7.

调节算法与匝道排队长度约束的融合体现在匝道排队长度对调节率的修正上,并且对于不同的车辆排队长度区间采用不同的修正措施.图 7 对于排队长度区间的划分,需要根据实际的匝道总长度、平坡段长度和期望排队长度等因素决定.设停车线外匝道排队车辆数为 L ,则

(1) 当 $L < 20$ pcu 时,仅判断计算调节率 r 是否在 $[r_{\min}, r_{\max}]$ 内即可;

(2) 当 $L \in [20, 36]$ 或 $L \in [36, 60]$ 或 $L > 60$ pcu 时,要将超限车辆数 Δr 和计算调节率 r 进行大小比较或倍数处理,再与 $[r_{\min}, r_{\max}]$ 作判断.

参数 N 是匝道进入调节状态时对于调节总次数的一个统计值,根据控制次数的约束条件,即一旦匝道进入调节状态则必须经过 5 次以上的调节才能恢复至开放状态,而这只是匝道控制中调节到开放的判断依据之一.图中 A 的含义同 N .

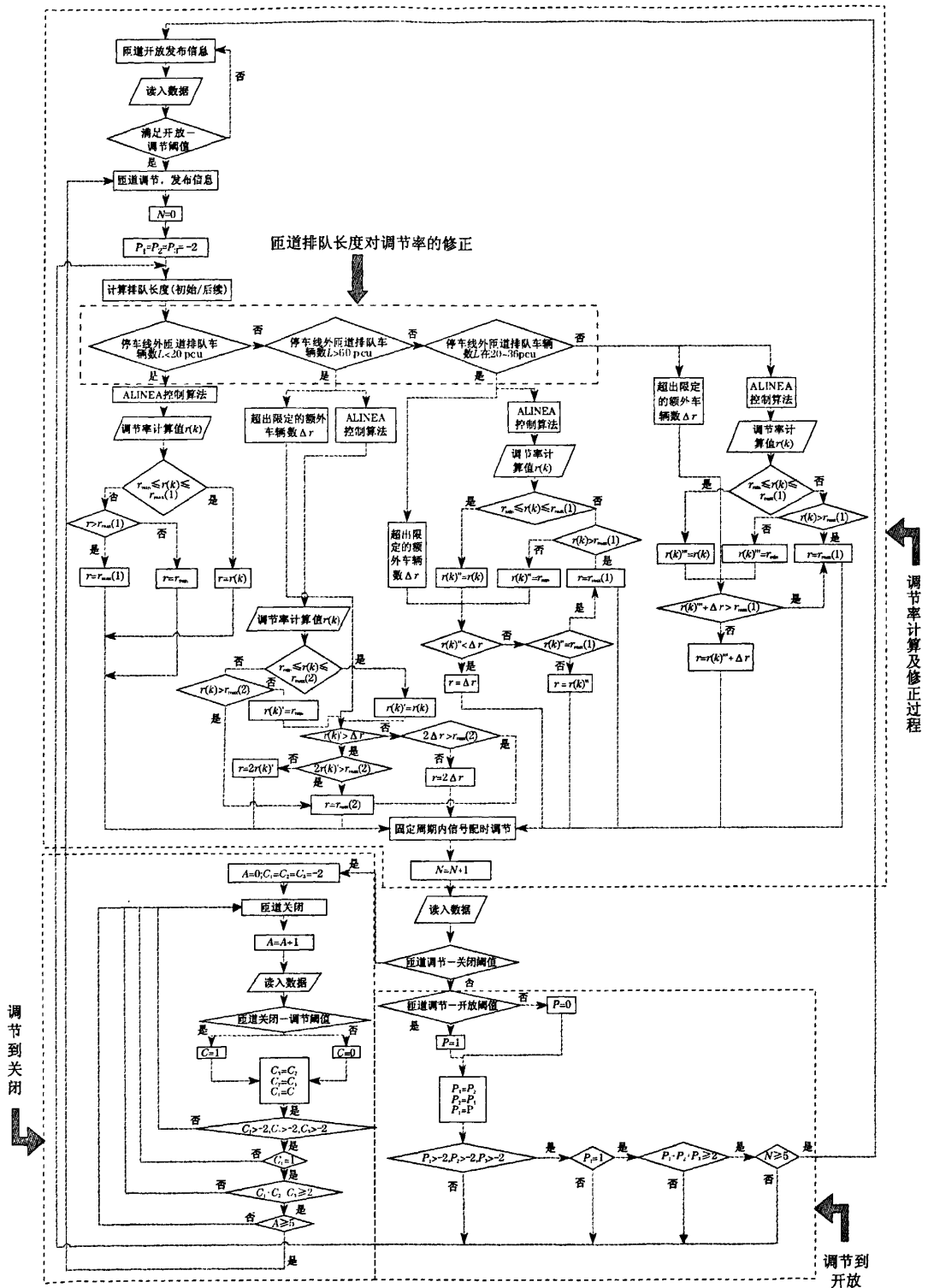


图 7 快速路入口匝道控制流程

Fig.7 Control flow for expressway on-ramp

其次,参数 P_1, P_2, P_3 是指匝道在分别经过第 i 次、 $i-1$ 次、 $i-2$ 次调节控制后,主线交通状态是否满足调节到开放阈值的判断结果.初始值设为负数,图 7 中设为 -2 .当满足匝道开放阈值时 $P=1$,反之 $P=0$.由此, P_1, P_2, P_3 以滑动块的模式不断更新连续三次调节后主线交通状况的判断结果,当连续三次判断结果中有两次是满足从调节到开放阈值的,就可作为匝道改变控制方式的又一个判断依据(C 的含义同 P).示意图见图 8.

3.3 武夷路入口匝道调节离线模拟结果

3.3.1 VB 仿真模拟设计简介

用 VB 程序离线模拟连续 7 d 交通数据. VB 界面见图 9,控制阈值见表 1, $K_R=70, \hat{O}=30\%$.

VB 程序主要根据图 7 的整体控制流程图设计,主要包括几个功能模块:初始化、导入 Excel 数据、调节率计算、条件修正、主流程及状态设置.

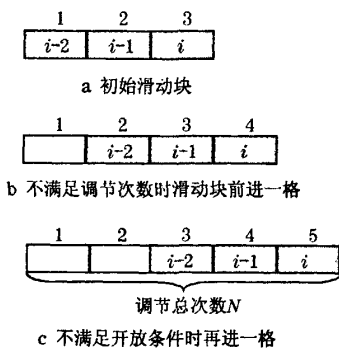


图 8 以滑动块模式对连续三次匝道调节后的主线交通状态判断结果记录

Fig.8 Records of three consecutive judgment results for the main line traffic situation after ramp metering in the mode of sliding-block



图 9 VB 匝道控制模拟界面示意图
Fig.9 Using VB to simulate ramp control

(1) 初始化模块是由用户手动输入控制阈值,可以针对不同的匝道,根据确定的控制阈值在模拟界面中自行输入.

(2) Excel 数据模块的作用是读入已有的历史数据,作为后续状态判断的数据条件.

(3) 调节率计算模块,顾名思义即计算初始调节率,由 ALINEA 公式所得.

(4) 条件修正模块是对由调节率计算模块获得的结果根据排队长度进行修正,得到的优化调节率.

(5) 主流程模块反映流程图的整体架构,状态设置模块则是对模拟控制时匝道状态的输出显示.

3.3.2 VB 仿真模拟结果评价

对匝道调节与不调节情况下,主线下游 32 断面速度、匝道汇入量及匝道排队情况结果进行比较分析(图 10~13).从图中可以看出:

- (1) 断面速度增长明显,平均增长 $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- (2) 匝道流量经过调节后,不再显现出脉冲性很强、波动性很大的情况,而是呈平滑状.
- (3) 流程图中预设的最大匝道排队车辆数为 60,而 7 d 匝道控制的日排队长度的统计中,最大匝道排队车辆数为 52,比预设的最大允许值小.

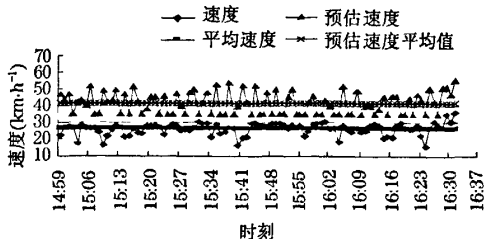


图 10 匝道调节前后 32 断面速度比较
Fig.10 Speed comparison about main line downstream of before and after adjustment of on-ramp

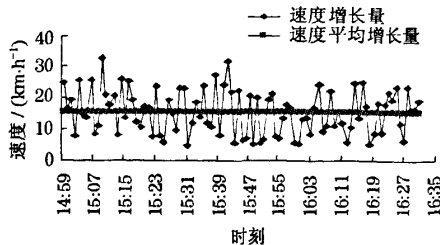


图 11 匝道调节后 32 断面速度增长情况
Fig.11 Growth of speed about main line downstream after ramp control

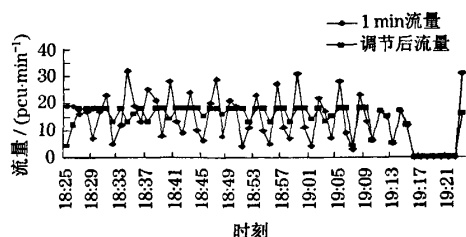


图12 匝道调节前后断面汇入主线流量变化

Fig.12 Change of ramp volume of before and after adjustment of on-ramp

因此,从主线下游速度、匝道流量及排队长度情况看,在考虑了限制匝道排队车辆的情况下,入口匝道控制对改善快速路的交通流运行状况是有明显效

果的,而对匝道车辆排队长度的限制也正是协调快速路与相连的地面道路交通的一种体现。

4 结语

入口匝道控制是将匝道车流分批放行,避免扰动主线。ALINEA控制模型是单点控制方法中研究最为广泛、运用最为成熟且评价较高的一种。本文提出的基于ALINEA算法的城市快速路入口匝道控制方法,出发点是基于对快速路与地面道路交叉口的内在联系和相互影响的考虑,在根据ALINEA控制算法确定匝道调节率的同时,依据匝道车辆排队长度的不同,不同程度和方式地修正计算调节率。从模拟控制结果来看,入口匝道调节有利于提高快速路主线行车速度,进而延缓拥挤和提前恢复畅通。

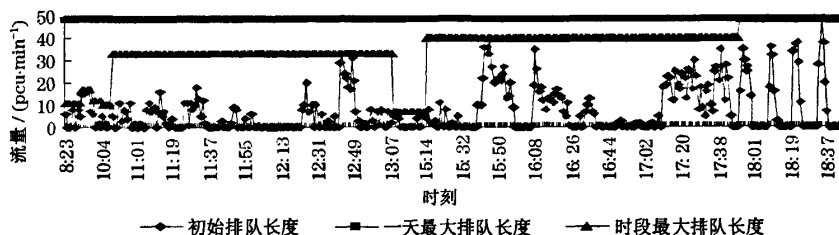


图13 匝道控制后1d的排队情况(2007年7月31日)

Fig.13 Situation about queue on ramp after ramp control for a whole day(2007-07-31)

参考文献:

- [1] 周小鹏,冯奇,孙立军. 城市快速路入口匝道控制策略与流程设计[J]. 山东交通学院学报,2006,14(2):7.
ZHOU Xiaopeng, FENG Qi, SUN Lijun. Urban expressway on-ramp control strategy and flow design[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2006, 14(2):7.
- [2] 郑建湖,董德存,陈洪. 城市快速路入口匝道控制策略比较分析[J]. 计算机测量与控制,2006,14(2):196.
ZHENG Jianhu, DONG Decun, CHEN Hong. Comparative analysis on on-ramp control strategies of urban freeway[J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(2):196.
- [3] Wattleworth J A, Berry D S. Peak period analysis and control of a freeway system — some theoretical investigations[J]. HRB Rec, 1965, 89:1.
- [4] 任黎立. 高速道路入口匝道控制方法综述[J]. 交通标准化, 2006, (5):146.
REN Lili. Summarization on ramp controlling of expressway[J]. Communications Standardization, 2006, 5:146.
- [5] 杨晓芳,付强,杨晓光. 城市快速路与地面道路交通整合控制分析[J]. 交通与计算机, 2005, 23(5):4.
YANG Xiaofang, FU Qiang, YANG Xiaoguang. Study of integrated control of urban expressway traffic systems and traffic signal control[J]. Computer and Communications, 2005, 23(5):4.
- [6] Papageorgiou M, Habib H S, Blosseville J M. ALINEA: a local feedback control law for on-ramp metering[J]. Transportation Research Record, 1991, (1320):58.
- [7] Papageorgiou M, Hadi Salem H, Middleham F. ALINEA local ramp metering: summary of field results[J]. Transportation Research Record, 1997, (1603):90.
- [8] Chu L, Yang X. Optimization of the ALINEA ramp metering control using genetic algorithm with micro-simulation[C/OL]. Washington D C: Transportation Research Board 82nd Annual Meeting, 2003. [2007-09-28]. <http://www.its.vci.edu/its/publications/papers/CTSS/UCI-ITS-TS-WP-03-13.pdf>.
- [9] 聂磊,杨晓光,庄斌,等. 快速路入口匝道控制适应性研究[J]. 交通与计算机, 2006, 24(3):18.
NIE Lei, YANG Xiaoguang, ZHUANG Bin, et al. Adaptability of expressway ramp metering[J]. Computer and Communications, 2006, 24(3):18.