

文章编号:1671-1637(2012)01-0102-06

## 城市快速路速度引导预测控制模型

陈大山, 孙 剑, 李克平

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

**摘 要:**在城市快速路控制系统中,将速度引导作为控制变量,建立了宏观动态交通流模型。以车辆总行程时间与速度引导为目标函数,计算了城市快速路入口区域流量和匝道入口区域流量,建立了快速路速度引导预测控制模型,对速度引导进行优化设计,利用 MATLAB 软件对下游交通流突变进行仿真分析。分析结果表明:通过速度引导控制,交通流平均速度由  $72.704\ 6\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  上升到  $74.167\ 6\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,交通流平均密度由  $23.011\ 2\ \text{veh} \cdot \text{km}^{-1}$  下降到  $21.156\ 7\ \text{veh} \cdot \text{km}^{-1}$ ,波动均小于 8%;速度方差下降,且最大值仅为  $420\ (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^2$ ;速度引导控制前后的速度方差与密度方差之比分别为 3.57、1.91;在交通流突变时段内,速度引导控制前后的速度方差与密度方差之比分别为 4.56、2.34。可见,速度引导控制模型有效。

**关键词:**城市快速路;交通控制;宏观动态交通流模型;速度引导;预测控制模型

**中图分类号:**U491.112

**文献标志码:**A

## Speed guidance predictive control model on urban expressway

CHEN Da-shan, SUN Jian, LI Ke-ping

(School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In the control system of urban expressway, speed guidance was taken as control variable, and the macro dynamic traffic flow of urban expressway model was established. Total vehicle traveling time and speed guidance were taken as objective functions, and the entrance flows of urban expressway and ramp were calculated. The speed guidance predictive control model of urban expressway was established to optimize speed guidance, and the mutation of downstream traffic flow was simulated by using MATLAB. Simulation result shows that because of speed guidance control, the average speed of traffic flow increases from  $72.704\ 6\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  to  $74.167\ 6\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ , the average density of traffic flow decreases from  $23.011\ 2\ \text{veh} \cdot \text{km}^{-1}$  to  $21.156\ 7\ \text{veh} \cdot \text{km}^{-1}$ , and their fluctuations are less than 8%. The speed variance of traffic flow decreases, and the maximum value is only  $420\ (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^2$ . The speed and density deviation ratios between before and after speed guidance control are 3.57 and 1.91 respectively. During traffic flow's mutation period, the speed and density deviation ratios between before and after speed guidance control are 4.56 and 2.34 respectively. So the control model is effective. 2 tabs, 12 figs, 17 refs.

**Key words:** urban expressway; traffic control; macro dynamic traffic flow model; speed guidance; predictive control model

**Author resumes:** CHEN Da-shan(1983-), male, doctoral student, +86-21-69583656, shyhits@126.com; LI Ke-ping(1960-), male, professor, PhD, +86-21-69583656, keping\_li@vip.163.com.

收稿日期:2011-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(61004113);高等学校博士学科点专项科研基金项目(200802471072)

作者简介:陈大山(1983-),男,江苏宿迁人,同济大学工学博士研究生,从事交通信息控制研究。

导师简介:李克平(1960-),男,上海人,同济大学教授,工学博士。

## 0 引言

城市快速路路网分担了较大比例的城市交通量,北京市主要快速路的长度仅占北京路网总长度的 8%,却承载了近 50% 的交通量<sup>[1]</sup>;上海市高架道路长度仅占市区路网总长度的 5%,却承载着市内 35% 的交通量<sup>[2]</sup>。城市快速路的常规控制策略主要有匝道控制、车道控制、限速控制等<sup>[3-5]</sup>,然而,伴随着交通需求的快速增长,城市快速路不但变得更加拥挤,而且因交通流的大幅波动易造成高频性的突变现象<sup>[6-7]</sup>。裴玉龙等对国内高速公路的车速标准差和亿车公里事故率进行了建模分析<sup>[8]</sup>,结果发现车速分布越分散,事故率越高;王正武等指出了可以通过高速公路主线可变限速与匝道融合来缓解交通拥挤<sup>[9]</sup>;王薇等基于强化学习与有限阶段马尔可夫决策的可变限速控制模型来改善高速公路主线的交通状况<sup>[10]</sup>;Brinckerhoff 等指出速度控制的研究重点应该主要集中在可变速度控制上,把可变限速变为点选择速度控制,为解决车辆速度的突变问题提供了一种新的思路<sup>[11-12]</sup>;杨兆升等通过 VISSIM 仿真软件分析了快速路匝道调节与动态速度引导的协同控制策略<sup>[13]</sup>,研究结果表明使用协同控制策略,主线通行能力可增大 10%,平均行驶时间可节省约 30%。

以上研究大多是针对交通控制策略进行的,关于宏观动态交通流的并不多见,本文在以上研究的基础上,把速度引导控制策略引入到中国城市快速路的交通管理中,并扩展了宏观动态城市快速路交通流模型,以此模型作为预测控制的基础,以车辆总行程时间与速度引导作为目标函数,采用多步预测与多步控制对速度引导下城市快速路控制进行仿真分析,为改善城市快速路的交通安全状况提供一种新的思路。

## 1 宏观动态交通流模型

面向控制的宏观动态交通流模型主要用来描述交通流状态随空间与时间变化以及与交通控制变量

之间的关系。1955 年,英国学者 Lighthill 与 Whitham 提出了著名的 LW 模型;Payne 针对 LW 模型的缺陷提出了动态的速度与密度关系方程,即为 Payne 模型<sup>[14]</sup>;希腊学者 Papageorgiou 对 Payne 模型进行了改进,提出了 Papageorgiou 模型<sup>[15]</sup>;国内外的其他学者也提出了各自的模型,绝大部分研究都是围绕动态的速度与密度关系进行的。本文把速度引导作为控制变量引入到城市快速路的控制系统中,并针对 Payne 模型进行相应的扩展。

在本文模型中,引入新的控制变量使得路段动态速度的变化不仅仅受常规的交通流的影响,路段上下游的速度引导也对动态速度有控制作用。把城市快速路划为若干段,每段最多含有 1 个入口和 1 个出口,令  $q_i(k)$ 、 $\rho_i(k)$ 、 $v_i(k)$  分别为  $k$  时段第  $i$  路段的交通流量、密度与速度; $r_i(k)$ 、 $s_i(k)$  分别为  $k$  时段第  $i$  路段匝道的驶入与驶出流量; $\lambda_i$  与  $L_i$  分别为第  $i$  路段的车道数量与路段长度; $v_{sg,i}(k)$  为  $k$  时段第  $i$  路段的速度引导值; $T$  为模型采样时间; $\tau$  为因前方交通流密度变化导致的滞后时间; $\eta$  为期望系数; $\gamma$  为速度引导变化敏感因子; $a$  为模型常量参数; $v_f$ 、 $\rho_c$ 、 $\rho_{\max}$  分别为交通流的自由流速度、临界密度与阻塞密度。客观动态交通流模型为

$$q_i(k) = \rho_i(k) v_i(k) \lambda_i \quad (1)$$

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L_i \lambda_i} [q_{i-1}(k) - q_i(k) + r_i(k) - s_i(k)] \quad (2)$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau} [A - v_i(k)] + \frac{T}{L_i} v_i(k) [v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \frac{\eta T}{\tau L_i} \left[ \frac{\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)}{\rho_i(k) + \kappa} \right] + \frac{\gamma T}{\tau L_i} \left[ \frac{v_{sg,i+1}(k) - v_{sg,i}(k)}{v_{sg,i}(k)} \right] \quad (3)$$

$$A = \min \left\{ v_f \exp \left[ -\frac{1}{a} \left( \frac{\rho_i(k)}{\rho_c} \right)^a \right], v_{sg,i}(k) \right\} \quad (4)$$

式中: $\kappa$  为修正变量。

在  $k$  时段,城市快速路入口区域流量  $q_0(k)$  为

$$q_0(k) = \min \left\{ q_{\lim,1}(k), d_0(k) + \frac{w_0(k)}{T} \right\} \quad (5)$$

$$q_{\lim,1}(k) = \begin{cases} q_{c,1} & v_{\lim,1}(k) \geq v_0 \\ v_{\lim,1}(k) \rho_c \left\{ -a \ln \left[ \frac{v_{\lim,1}(k)}{v_f} \right] \right\}^{\frac{1}{a}} & v_{\lim,1}(k) < v_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$v_{\lim,1}(k) = \min \{ v_1(k), v_{sg,1}(k) \}$$

式中:  $q_{\text{lim},1}(k)$  为  $k$  时段速度引导下的城市快速路初始段流量;  $d_0(k)$  为  $k$  时段城市快速路初始段交通需求;  $w_0(k)$  为  $k$  时段城市快速路初始段排队长度;  $v_{\text{lim},1}(k)$  为  $k$  时段速度引导下的道路受限速度;  $q_{c,1}$  为城市快速路初始段的通行能力;  $v_0$  为入口区域交通流临界速度。

在  $k$  时段, 匝道入口区域流量  $q$  为

$$q = \min \left\{ Q_i \frac{\rho_{\max} - \rho_i(k)}{\rho_{\max} - \rho_c}, d_i(k) + \frac{w_i(k)}{T} \right\} \quad (7)$$

式中:  $d_i(k)$  为  $k$  时段第  $i$  路段上的交通需求;  $w_i(k)$  为  $k$  时段第  $i$  路段上的排队长度;  $Q_i$  为第  $i$  路段上的匝道通行能力。

由以上分析可知, 在匝道入口区域有

$$w_i(k+1) = w_i(k) + T[d_i(k) - q_i(k)] \quad (8)$$

式(1)~(8)为扩展后速度引导控制下的城市快速路宏观动态交通流模型, 可作为城市快速路速度引导预测控制模型的基础。

## 2 速度引导预测控制模型

### 2.1 控制原理

在过程控制领域, 预测控制模型的 3 大机理分别为模型预测、滚动优化与反馈校正<sup>[16]</sup>。在所建模型的基础上, 根据已知时刻的初始状态, 优化计算未来新时段的控制变量, 求出最优控制集, 实施最优控制, 并在下一时刻重复进行预测与优化。模型预测控制中的优化是一种有限时段的滚动优化, 在每个采样时刻, 优化性能指标只涉及到从该时刻起到未来有限的时间段, 而到下一个采样时刻, 这一优化时段继续向前推移, 优化不是一次离线完成, 而是反复在线进行。预测控制模型原理见图 1,  $m$  为控制时段数,  $p$  为预测时段数。

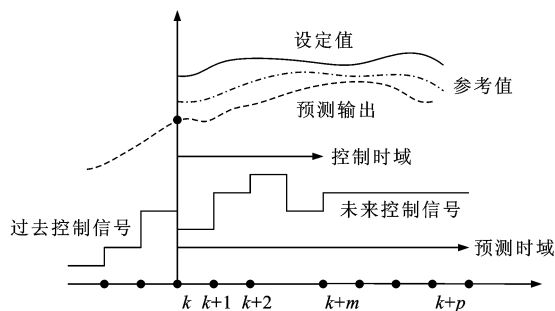


图 1 控制原理

Fig. 1 Control principle

### 2.2 预测方法

根据扩展后的城市快速路宏观动态交通流模型与速度引导, 进行未来多个时刻交通流参数的预测,

以车辆总行程时间与速度引导为目标函数  $J$ , 则有

$$J = T \sum_{k=1}^{N_2-1} \left[ \sum_{i=1}^{N_3} \rho_i(k) L_i \lambda_i + w_i(k) \right] + \beta \sum_{k=1}^{N_1-1} \sum_{i=1}^{N_3} [v_{sg,i}(k) - v_{sg,i}(k-1)]^2 \quad (9)$$

式中:  $N_1$  为基于交通流模型采样时间的控制步长;  $N_2$  为基于交通流模型采样时间的预测步长;  $N_3$  为研究路段数量;  $\beta$  为权重系数。

速度引导下的模型预测方法流程见图 2。

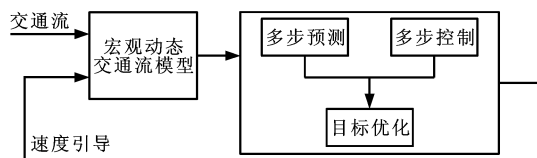


图 2 预测流程

Fig. 2 Predictive flow

## 3 仿真结果分析

本文以上海市内环高架长度为 5.1 km 的城市快速路(黄兴路至西藏北路)为研究对象, 应用 MATLAB 软件抽象建模, 仿真路段见图 3。将快速路段分为 8 个路段(前 7 个路段均设有速度引导控制), 交通流模型参数见表 1, 速度引导变化周期为 1 min; 在每个速度引导变化周期内, 交通流模型迭代 6 次; 预测周期为 10 min; 交通流模型预测迭代 60 次, 即  $N_2$  为 60; 控制周期为 7 min, 即  $N_1$  为 42。第 8 段为虚拟路段, 密度变化函数为

$$\rho_8(t) = \begin{cases} 27 & 1 \leq t \leq 10 \\ 27 + 5(t-10) & 10 < t \leq 20 \\ 77 & 20 < t \leq 23 \\ 77 - 5(t-23) & 23 < t \leq 33 \\ 27 & 33 < t \leq 90 \end{cases}$$

式中:  $t$  为仿真时间, 累计为 90 min。

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

参 数	取 值
单车道通行能力/(veh · h <sup>-1</sup> )	2 000
自由流速度/(km · h <sup>-1</sup> )	78
车道临界密度/(veh · km <sup>-1</sup> )	38
车道阻塞密度/(veh · km <sup>-1</sup> )	150
交通流模型采样时间/s	10
密度变化影响滞后时间/s	18
速度引导敏感因子/(km <sup>2</sup> · h <sup>-1</sup> )	10

为建模方便, 速度引导取为 10 的整数倍, 最大

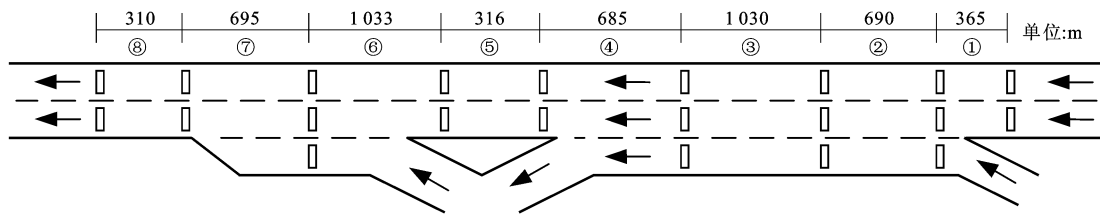


图 3 仿真路段

Fig. 3 Simulation sections

值为  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 最小值为  $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 基于安全约束, 速度引导不应该剧烈变化, 前后路段与前后时段速度引导之差不超过  $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

在没有速度引导下, 城市快速路交通流密度与速度变化分别见图 4、5, 从中可以看出, 下游交通流突变, 并在空间与时间上向上游传播。图 6 为速度引导的变化, 从中可以看出上游第 1 段较下游第 7 段提前了 5 min 进行主动速度引导控制, 考虑到前后相邻路段速度引导的差值不超过  $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 变化较为缓和。图 7、8 分别为在速度引导控制下交通流的密度与速度变化, 从中可以看出, 在速度引导控制下, 交通流突变被逐渐过滤掉, 交通流突变的影响在时间与空间上都得到了控制。

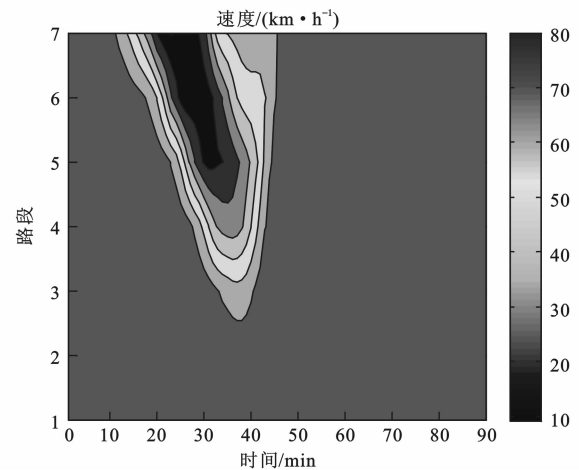


图 5 无速度引导控制下的速度

Fig. 5 Speeds without speed guidance control

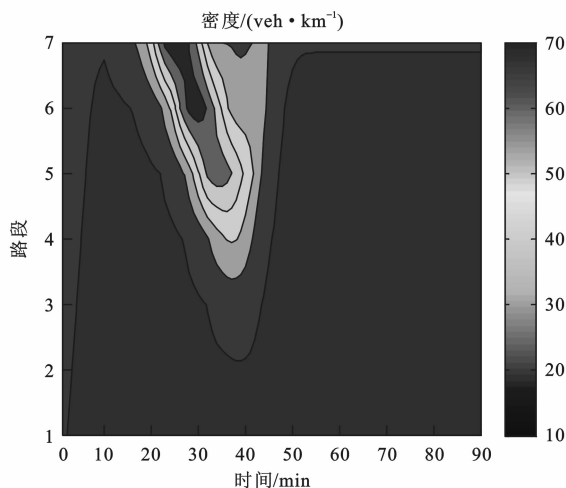


图 4 无速度引导控制下的密度

Fig. 4 Densities without speed guidance control

图 9、10 分别为有无速度引导控制下前 7 个路段交通流平均速度与平均密度比较, 从中可以看出, 在速度引导控制下, 交通流平均速度由  $72.7046 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  上升到  $74.1676 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 交通流平均密度由  $23.0112 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$  下降到  $21.1567 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$ , 总体波动均在 8% 以内。

图 11、12 分别为在有无速度引导控制下, 城市快速路每个路段的交通流密度与速度方差比较, 从中可以看出, 在未发生交通流突变情况下, 交通流速

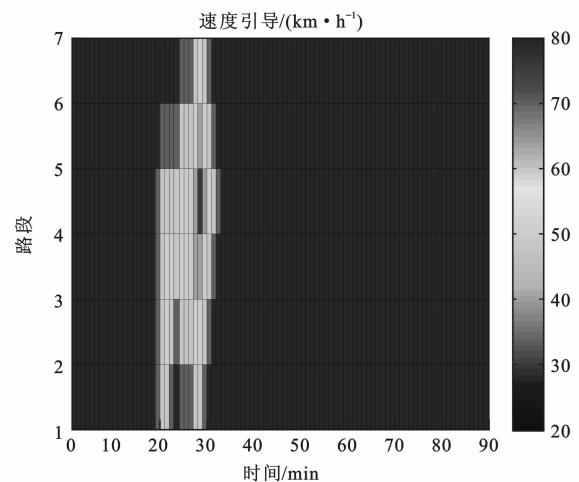


图 6 速度引导

Fig. 6 Speed guidances

度与密度方差基本吻合; 当下游发生交通流突变后, 在无速度引导控制下, 速度方差从  $271 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^2$  急剧上升至  $997 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^2$ , 说明路段间车辆速度差异较大, 对交通安全极为不利; 在进行速度引导控制后, 速度方差下降且最大值仅为  $420 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^2$ , 同时方差大幅波动时间范围缩小。表 2 为有无速度引导的交通流相关数对比, 从中可见, 在进行速度引导控制后, 速度与密度方差均大幅下降, 在交通流突变时段尤其显著。

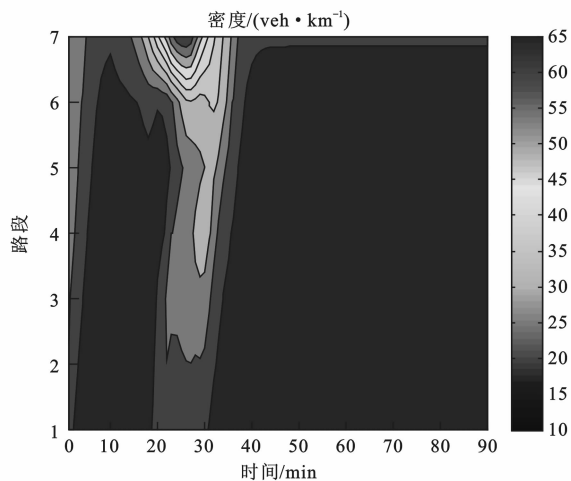


图 7 速度引导控制下的密度

Fig. 7 Densities under speed guidance control

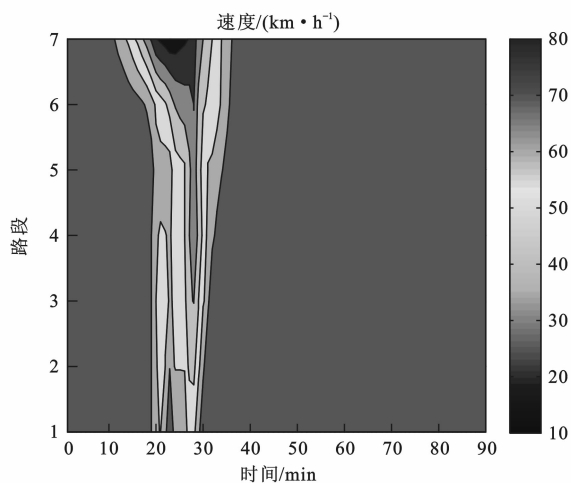


图 8 速度引导控制下的速度

Fig. 8 Speeds under speed guidance control

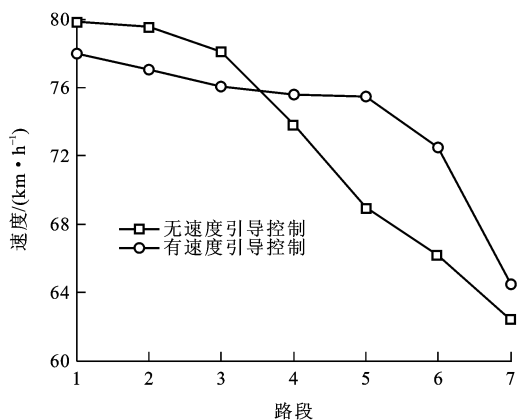


图 9 平均速度比较

Fig. 9 Comparison of average speeds

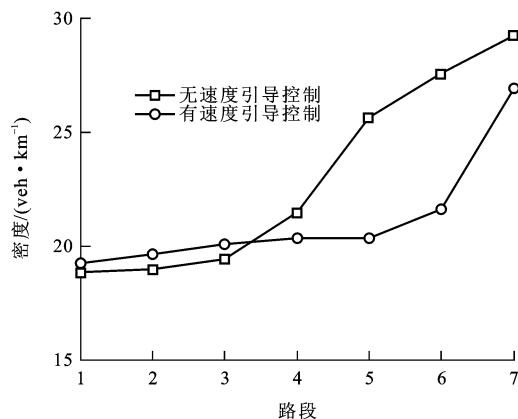


图 10 平均密度比较

Fig. 10 Comparison of average densities

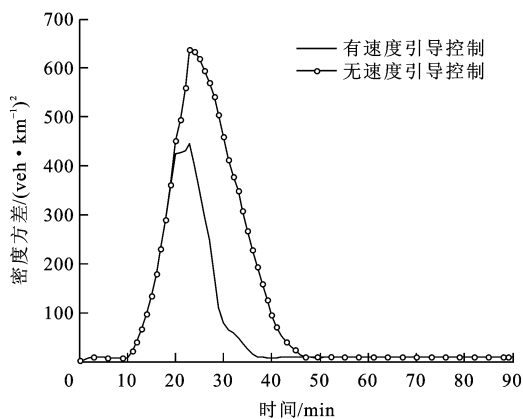


图 11 密度方差

Fig. 11 Variances of densities

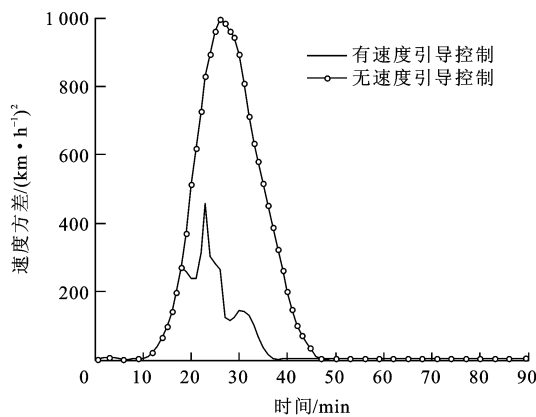


图 12 速度方差

Fig. 12 Variances of speeds

## 4 结 语

本文在扩展后的城市快速路宏观动态交通流模型的基础上,运用主动交通管理的理念,通过引入速

度引导,基于预测控制模型,对有无速度引导下的城市快速路交通流进行了仿真分析。仿真结果表明,在速度引导作用下,城市快速路预测控制效果显著,可为主动交通管理系统构建提供理论支持。目前,速度引导只是限制在前后时段与前后路段间阶梯差不超过  $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,然而在实际应用中因交通流的多变性,需要研究量化后的安全性分析模型<sup>[17]</sup>,以

表 2 参数比较

Tab. 2 Parameter comparison

比较参数	控制前与控制后之比
路段平均速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	0.98
路段平均密度/( $\text{veh} \cdot \text{km}^{-1}$ )	1.08
速度方差/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) <sup>2</sup>	3.57
密度方差/( $\text{veh} \cdot \text{km}^{-1}$ ) <sup>2</sup>	1.91
突变时段速度方差/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) <sup>2</sup>	4.56
突变时段密度方差/( $\text{veh} \cdot \text{km}^{-1}$ ) <sup>2</sup>	2.34

此进行速度引导控制,在考虑效率的基础上同时又能够以量化后的安全为导向。

## 参考文献:

## References:

- [1] ZHAO Na-le, YU Lei, ZHAO Hui, et al. Analysis of traffic flow characteristics on ring road expressways in Beijing using floating car data and remote traffic microwave sensor data[J]. Transportation Research Record, 2009(2124): 178-185.
- [2] YANG Xiao-fang, YANG Xiao-guang, FU Qiang. Study on integrated control of method of on-ramp and correlated intersection[C]// Southwest Jiaotong University. 2007 International Conference of Transportation Engineering. New York: American Society of Civil Engineers, 2007: 2380-2385.
- [3] CARLSON R C, PAPAMICHAIL I, PAPAGEORGIOU M, et al. Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering[J]. Transportation Science, 2010, 44(2): 238-253.
- [4] PAPAMICHAIL I, KOTSIALOS A, MARGONIS I, et al. Coordinated ramp metering for freeway networks-a model-predictive hierarchical control approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(3): 311-331.
- [5] CARLSON R C, PAPAMICHAIL I, PAPAGEORGIOU M, et al. Optimal mainstream traffic flow control of large-scale motorway networks[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(2): 193-212.
- [6] HEGYI A, SCHUTTER B D, HELLENDORRN H. Optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2005, 6(1): 102-112.
- [7] HEGYI A, SCHUTTER D B, HELLENDORRN H. Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2005, 13(4): 185-209.
- [8] 裴玉龙,程国柱. 高速公路车速离散性与交通事故的关系及车速管理研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 74-78.  
PEI Yu-long, CHENG Guo-zhu. Research on the relationship between discrete character of speed and traffic accident and speed management of freeway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 74-78. (in Chinese)
- [9] 王正武,罗大庸,黄中祥. 高速公路主线限速与匝道融合的协调控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 973-976.  
WANG Zheng-wu, LUO Da-yong, HUANG Zhong-xiang. Coordinated control of variable speed limits and ramp metering[J]. Control Theory and Applications, 2007, 24(6): 973-976. (in Chinese)
- [10] 王 薇,杨兆升,赵丁选. 有限阶段马尔科夫决策的可变限速控制模型[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(5): 109-114.  
WANG Wei, YANG Zhao-sheng, Zhao Ding-xuan. Control model of variable speed limit based on finite horizon Markov decision-making[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 109-114. (in Chinese)
- [11] BRINCKERHOFF P. Synthesis of active traffic management experiences in Europe and the United States[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2010.
- [12] SISIOPIKU V P, SULLIVAN A, FADEL G. Implementing active traffic management strategies in the U.S.[R]. Birmingham: The University of Alabama, 2009.
- [13] 杨兆升,保利霞,刘新杰,等. 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:工学版, 2006, 36(增): 144-147.  
YANG Zhao-sheng, BAO Li-xia, LIU Xin-jie, et al. Study on coordination of ramp metering and dynamic speed guidance for urban expressway[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(S): 144-147. (in Chinese)
- [14] 干宏程,孙立军,郝 媛,等. 城市快速路高阶流体模型实证研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2007, 35(5): 602-606.  
GAN Hong-cheng, SUN Li-jun, HAO Yuan, et al. A case study of urban expressway traffic flow based on high-order continuum model[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(5): 602-606. (in Chinese)
- [15] 谭满春,徐建闽,毛宗源. 高速公路交通流的建模与入口匝道最优控制[J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 83-85.  
TAN Man-chun, XU Jian-min, MAO Zong-yuan. Traffic flow modeling and on-ramp optimal control in freeway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4): 83-85. (in Chinese)
- [16] 周永华. 交通流预测控制的机制与方法[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 107-111.  
ZHOU Yong-hua. Mechanism and approach of traffic flow predictive control[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 107-111. (in Chinese)
- [17] ABDEL-ATY M, DILMORE J, DHINDSA A. Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement[J]. Accident Analysis and Prevention, 2006, 38(2): 335-345.