

面向出口匝道拥挤的快速路速度协调控制模型

王艳丽¹, 李晓庆², 王忠宇³, 吴兵¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 长沙市规划勘测设计研究院, 湖南 长沙 410007;
3. 上海海事大学 交通运输学院, 上海 201306)

摘要: 为缓解快速路出口匝道的交通拥挤, 提出了从主线上进行速度协调控制的方法, 在现有基于断面的速度协调控制模型的基础上, 通过对入口匝道、出口匝道等的修正构建了面向出口匝道的基于车道的速度协调控制模型, 描述和预测每个车道的交通流状态, 以路网行程时间最短、总通过量最大为优化目标, 对每个车道分别进行最佳速度引导. 并搭建仿真系统, 分析不同交通需求情形下, 基于车道和基于断面的速度协调控制策略的实施效果. 结果表明: 速度协调控制策略更加适用于中高密度, 当交通需求量较高时, 相比于无控制策略, 基于车道和基于断面的速度协调控制模型均能降低车辆平均延误, 且在大多数情形下, 基于车道的速度协调控制模型效果优于基于断面的控制模型, 对缓解交通拥堵、提高交通安全具有一定助益.

关键词: 城市快速路; 速度协调控制; 出口匝道交通拥挤; 基于车道的宏观动态交通流模型; 交通仿真

中图分类号: U491.112

文献标志码: A

Speed Harmonization Model for Off-ramp Bottlenecks on Urban Expressway

WANG Yanli¹, Li Xiaoqing², Wang Zhongyu³, WU Bing¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Changsha Planing & Design Survey Research Insititute, Changsha 410007, China; 3. College of Transport and Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to mitigate the traffic congestion around the off-ramp, the speed harmonization control method of main line is proposed. Based on existing section-based speed harmonization model, a lane-based speed harmonization model was designed with factors of on-ramp and off-ramp. The model can describe and forecast the traffic state, and give the optimal speed on each lane with shortest travel time as well as maximum total through traffic volume. Finally, the simulation

system was developed to scientifically evaluate the effectiveness of lane-based and section-based speed harmonization model in different traffic demand situations. The simulation results indicated that, speed harmonization strategy is more adaptive for medium and high traffic flow density. When traffic demand is high, both of lane-based model and section-based model can reduce the vehicle average delay compared to no control strategies, and in most cases, the lane-based speed harmonization model is superior to the section-based model, which is helpful to mitigate traffic congestion and improve traffic safety.

Key words: urban expressway; speed harmonization; traffic congestion in off-ramp; lane-based macroscopical dynamic traffic flow model; traffic simulation

随着汽车保有量的迅速增长, 城市交通拥堵问题日趋严重, 快速路作为城市交通的骨干, 交通阻塞现象更是屡见不鲜, 突出问题表现在入口匝道“上不来”和出口匝道“下不去”. 目前的解决方法, 主要针对的是入口匝道, 对出口匝道的研究相对较少. 在出口匝道方面, 已有研究, 如 Günther^[1]、马继萍^[2]等提出的改善方法, 大多局限在出口与衔接道路的交通组织与工程改造特别是交通信号管理与控制上, 虽对主线的交通拥堵具有一定的缓解作用, 但在衔接道路交通能力有限或拥堵严重时效果不佳. 此时, 可探索直接从主线上采取相关控制策略来提高交通效率.

对于主线的控制策略, 随着智慧交通的发展, 主动式交通管理与控制的理念愈加成熟, 作为常用的主动控制策略, 速度协调控制(也叫可变限速或者动态限速)的相关研究增多. Waller^[3]、李志斌^[4]、Li^[5]等学者提出了多种速度协调控制算法和策略, 但均

收稿日期: 2017-10-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51138003), 同济大学校青年优秀人才培养行动计划(2016KJ031), 同济大学第十二期实验教学改革项目(1600104120), 上海市科委科研计划(17DZ1205302)

第一作者: 王艳丽(1985—), 女, 工学博士, 工程师, 主要研究方向为交通运输规划与管理. E-mail: wangyanli@tongji.edu.cn

需依据经验或历史数据确定关键的参数,比如通行能力、临界速度甚至速度引导值.于是有学者提出了选取行程时间最小等为优化目标,根据历史或者实时交通数据,通过模型计算求得最优速度的方法,如 Yang^[6]、Carlson^[7]、Zhu^[8]等.这类方法模型因目标和地点的不同有所差异,虽可有效缓解交通拥堵,但具体效果还与算法以及不同需求的适用性等因素有关.

目前速度协调控制策略主要运用在主线以及入口匝道等瓶颈处,针对出口匝道瓶颈的运用相对较少.一方面,出口匝道与主线等的交通具有一定差异,其模型和算法也应不同.另一方面,现有的模型方法大多是以路段整个断面为分析对象,而同一断面不同车道的速度、交通流及失效时间等均有较大的差异^[9],Letter 等^[10]也验证了基于车道的速度引导优于传统基于断面的方法,但其采用的是基于简单的逻辑运算选取事先设定好的限速值.因此,本文提出了实时的面向出口匝道的基于车道的速度协调控制模型,并通过仿真对模型的实施效果进行对比分析.

1 速度协调控制基础模型

1.1 速度协调控制基本流程

速度协调控制技术基本思路是对瓶颈上游的路段进行速度引导,放缓上游交通流的速度,使瓶颈区域的交通量与其通行能力相匹配,从而缓解已拥堵路段的拥挤程度,加快拥堵的消散.实时速度协调控制模型的基本流程如图 1 所示.

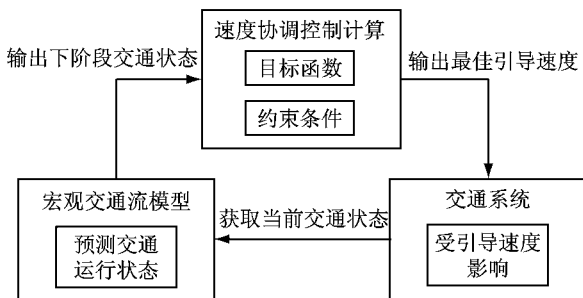


图 1 速度协调控制模型的基本流程

Fig.1 Basic flow of the speed harmonization control model

1.2 基于断面的速度协调控制模型

目前常用的速度协调控制模型多以整个断面作为分析单元,一般包括修正的宏观交通流模型 Metanet、目标函数和约束条件^[6-7, 11-12].

(1)包含引导速度的 Metanet 模型:

$$q_i(k) = \rho_i(k)v_i(k)\lambda_i \tag{1}$$

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L_i\lambda_i}(\rho_{i-1}(k)v_{i-1}(k) - \rho_i(k)v_i(k) + r_i(k) - s_i(k)) \tag{2}$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau}(u_i(k) - v_i(k)) + \frac{T}{L_i}v_i(k)(v_{i-1}(k) - v_i(k)) - \frac{1}{\tau}\left(\frac{\sigma T}{L_i}\frac{\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)}{\rho_i(k) + \varphi}\right) \tag{3}$$

式(1)~(3)中; i 为路段编号; k 为数据采集时间间隔编号; T 为数据采集的周期, h ; λ_i 为路段 i 的车道数; L_i 为路段 i 的长度, km ; τ 为驾驶员反应的时间延迟, h ; σ 为表示驾驶员根据下游密度高低改变车速的敏感性, $km^2 \cdot h^{-1}$; φ 为使模型适用于中高密度情况,并且避免在低密度情况下出现奇异和反常行为的参数, $veh \cdot km^{-1}$; $q_i(k)$ 为路段 i 在 k 时刻的交通流量, $veh \cdot h^{-1}$; $\rho_i(k)$ 为路段 i 在 k 时刻的平均密度, $veh \cdot km^{-1}$; $v_i(k)$ 为路段 i 在 k 时刻的平均速度, $km \cdot h^{-1}$; $r_i(k)$ 为路段 i 在 k 时刻的匝道汇入率, $veh \cdot h^{-1}$; $s_i(k)$ 为路段 i 在 k 时刻的匝道流出率, $veh \cdot h^{-1}$; $u_i(k)$ 为路段 i 在 k 时刻的速度引导值, $km \cdot h^{-1}$.

此模型是在 Metanet 模型的基础上加以改进得到的,其中主要的改进之处是考虑了速度引导对驾驶员的影响.即将 Metanet 基本模型中路段 i 在 k 时刻的期望速度 $V(\rho_i(k))$,改为式(3)中的速度引导值 $u_i(k)$,表示在速度协调控制下,驾驶员的期望速度随限速值而定.

(2)速度协调控制模型目标函数

目前常用的目标函数,是从交通系统整体的运行效率考虑,车辆总行程时间(A)最小和总行驶公里(B)最大的多目标函数. A 最小则表示尽量降低行驶过程中的延误, B 最大则表示尽量让路网中通过的交通量最多.

$$\text{Min } J = \alpha_A A - \alpha_B B \tag{4}$$

$$A = T \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^M L_i \lambda_i \rho_i(k+j) \tag{5}$$

$$B = T \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^M L_i \lambda_i v_i(k+j) \cdot \rho_i(k+j) \tag{6}$$

式(4)~(6)中; J 为目标函数; k, j 为数据采集时间间隔编号; M 为最大路段编号; N_p 为最大数据采集时间间隔编号; α_A 和 α_B 分别表示车辆总行程时间 A 和总行驶公里 B 的系数.

(3)速度协调控制模型约束条件

①通行能力约束

瓶颈点上游的流量应不超过瓶颈路段的实际通行能力,如式(7)所示:

$$\lambda_i \rho_i(k+1) v_i(k+1) \leq Q_b \quad (7)$$

式中: Q_b 为瓶颈的通行能力, $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$.

②速度变化约束

一方面,考虑交通规则和驾驶员的实际感受,引导速度需要有一个合理的变化区间,如式(8)所示. 另一方面,考虑交通安全,引导速度在空间上的变化不能太大,如式(9)所示.

$$V_{\min} \leq u_i(k) \leq V_{\max} \quad (8)$$

$$-V_1 \leq u_{i-1}(k) - u_i(k) \leq V_1 \quad (9)$$

式(8)~(9)中: V_{\min} 为路段车辆速度协调的最小值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; V_{\max} 为路段车辆速度协调的最大值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; V_1 为相邻路段的速度引导值变化幅度不能超过的限值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.

2 面向出口匝道拥挤的车道速度协调控制模型

2.1 对基本模型的调整方法

基于车道的模型的基本思路是将每个车道单独作为分析对象进行元胞路段划分,再按照基于断面的速度协调控制的模型方法进行计算,对基础模型主要有以下几个方面的调整和修正.

(1)入口匝道

入口匝道的流量会汇入到下游路段中,影响该元胞单元的密度预测. 以断面作为分析对象时,只需简单加上匝道汇入的流量即可,但以每条车道单独作为分析对象之后,应考虑入口匝道汇入量对每条车道实际所造成的影响. 因此这里假设入口匝道的流量经过一定交织换道之后,会按照一定的比例分配到下游各个车道中,如图 2 所示. 图中, $r_1 \sim r_4$ 为入口匝道的流量按照比例分配到下游各车道的匝道汇入率. 该比例可通过入口匝道上下游各个车道之间的流量进行分析比较得到.

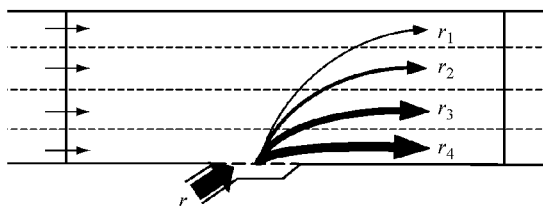


图 2 入口匝道流量汇入各个车道示意图
Fig.2 Schematic diagram of the on-ramp flows into each lane

(2)出口匝道

对于最外侧车道而言,临近出口匝道时,车流会有直行和下匝道两种,即一条输入车道对应两条输出车道,这样上下车道没有对应起来,在模型中不能直接计算. 因此在出口匝道上游附近的断面增加一条虚拟输入车道,即将 Lane4 车道在出口匝道上游的邻近断面 m 分为直行的 Lane4(1)和下匝道的 Lane4(2),如图 3 所示. 且假设该车道在 m 断面的直行和下匝道的车流量成一定比例,该比例可根据交通流实际情况分析得到. 图中, Lane 表示车道.

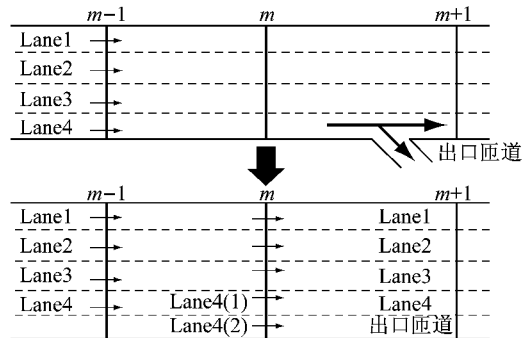


图 3 出口匝道处虚拟车道示意图

Fig.3 Schematic diagram of the virtual lane near the off-ramp

对于 Lane4(1)和 Lane4(2)两个车道,在密度预测时,需要上游和当前断面的交通参数,由于在出口匝道之前同属于 Lane4 车道,因此假设在 $m-1$ 、 m 断面的交通参数均与 Lane4 实际车道相同;但在速度预测时,需要下游断面的交通参数,由于下游 $m+1$ 断面主线对应车道的交通差异较大,所以分别计算最佳引导速度. 最后, Lane4 车道在 m 断面处的速度引导值等于这两个速度引导值的流量加权平均值.

将临近出口匝道处的主线车道虚拟成直行和下匝道两条车道,一方面更加符合出口匝道附近的交通行为,同时在预测 Lane4(2)车道交通状态时,模型中也可以更好地体现出口匝道交通状况(下游密度)对主线交通的影响.

(3)车道间速度差异

当对每个车道均进行速度协调时,考虑路段交通流的运行安全,除相邻断面、相邻时段的速度引导变化不能过大之外,同一断面相邻车道之间的速度引导值也不能相差过大,以免造成频繁的换道行为,故增加各个车道之间速度差异幅度的约束条件.

2.2 基于车道的速度协调控制模型

对基本模型进行调整后的基于车道的速度协调

控制模型如下所述。

(1) 假设前提

①基于车道进行交通流预测时,假设在预测时间单元内,如果没有出入口匝道影响,车道之间的流量占比不会发生太大的变化;②假设当距离出口匝道处很近时,车辆已经完成换道行为,只有最外侧车道有下匝道的车辆;③假设在交通需求不变的情况下,入口匝道的流量经过一定交织换道之后,会按照固定的比例分配到下游各个车道中;④假设在交通需求不变的情况下,出口匝道上游邻近断面最外侧车道上的直行和下匝道车流量成固定比例,该比例可根据交通流实际情况分析得到。

(2) 基于车道的 Metanet 模型

$$q_{m,n}(k) = \rho_{m,n}(k)v_{m,n}(k) \quad (10)$$

$$\rho_{m,n}(k+1) = \rho_{m,n}(k) + \frac{T}{L_{m,n}}(\rho_{m-1,n}(k)v_{m-1,n}(k) - (\rho_{m,n}(k)v_{m,n}(k) + r_{m,n}(k))) \quad (11)$$

$$v_{m,n}(k+1) = v_{m,n}(k) + \frac{T}{\tau}(u_{m,n}(k) - v_{m,n}(k)) + \frac{T}{L_{m,n}}v_{m,n}(k)(v_{m-1,n}(k) - v_{m,n}(k)) - \frac{1}{\tau} \left(\frac{T\sigma}{L_{m,n}} \frac{\rho_{m+1,n}(k) - \rho_{m,n}(k)}{\rho_{m,n}(k) + \varphi} \right) \quad (12)$$

式(10)~(12)中: m 为路段编号, $m=1, \dots, M$, M 为最大路段编号; n 为车道编号, $n=1, \dots, N$; N 为路段 m 上总的车道数; k 为数据采集时间序列编号; $q_{m-1,n}(k), q_{m,n}(k), q_{m+1,n}(k)$ 分别为上游路段、当前路段、下游路段上车道 n 的流量, $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$; $\rho_{m-1,n}(k), \rho_{m,n}(k), \rho_{m+1,n}(k)$ 分别为上游路段、当前路段、下游路段上车道 n 的密度, $\text{veh} \cdot \text{km}^{-1}$; $v_{m-1,n}(k), v_{m,n}(k), v_{m+1,n}(k)$ 分别为上游路段、当前路段、下游路段上车道 n 的速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; $r_{m,n}(k)$ 为上匝道车流分配到路段 m 第 n 个车道的汇入率,与总入口匝道流量成比例, $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$; $u_{m,n}(k)$ 为路段 m 车道 n 上的速度引导值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; $L_{m,n}$ 为断面 m 车道 n 的长度, km 。

其中:

$$r_{m,n}(k) = \theta_{m,n}r_m(k), \sum_{n=1}^N \alpha_{m,n} = 1 \quad (13)$$

$$u_{m_i, n_i}(k) = u_{m_{i1}, n_{i1}}(k) \cdot \beta + u_{m_{i2}, n_{i2}}(k) \cdot (1 - \beta) \quad (14)$$

$$\rho_{m_{i+1}, n_i}(k) = \rho_{\text{off}}(k) \quad (15)$$

式(13)~(15)中: $\theta_{m,n}$ 为上匝道车流分配到断面 m 车道 n 的汇入比例; $u_{m_{i1}, n_{i1}}(k)$ 为出口匝道上游邻近断面最外侧车道的速度引导值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; $u_{m_{i2}, n_{i2}}(k)$ 为虚

拟直行车道的速度引导值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; $u_{m_{i2}, n_{i2}}(k)$ 为虚拟下匝道车道的速度引导值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; β 为最外侧车道的直行车流比例; $\rho_{m_{i+1}, n_i}(k)$ 为虚拟下匝道车道下游密度, $\text{veh} \cdot \text{km}^{-1}$; $\rho_{\text{off}}(k)$ 为出口匝道的密度, $\text{veh} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

(2) 目标函数

目标函数为车辆总行程时间(A)最小和总行驶公里(B)最大的多目标函数,如式(16)。

$$\text{Min } J = T \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N L_m [\alpha_A \rho_{m,n}(k + j) - \alpha_B v_{m,n}(k + j)] \rho_{m,n}(k + j) \quad (16)$$

式中: α_A, α_B 表示车辆总行程时间和总行驶公里系数,这里分别取值 80 和 1。

(3) 约束条件

$$\rho_{m,n}(k+1)v_{m,n}(k+1) \leq Q_{b,m,n} \quad (17)$$

$$V_{\min} \leq u_{m,n}(k) \leq V_{\max} \quad (18)$$

$$-10 \leq u_{m-1,n}(k) - u_{m,n}(k) \leq 10 \quad (19)$$

$$-10 \leq u_{m,n-1}(k) - u_{m,n}(k) \leq 10 \quad (20)$$

其中:式(17)表示预测的交通量不能超过路段 m 车道 n 瓶颈点 b 的通行能力;式(18)表示引导速度的最小和最大区间,分别取值 20 和 80 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$;式(19)表示同一车道连续路段速度差不能超过 10 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$;式(20)表示同一路段相邻车道速度差不能超过 10 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.3 模型的标定和求解

(1) 模型标定

在计算之前,需对式(12)中的参数 τ, ν, φ 进行标定。在标定过程当中,使得模型计算值与实际测量值的误差最小,如式(21)所示。其中参数向量 $\mathbf{B} = [\tau, \sigma, \varphi]$ 的范围需满足式(22)和式(23)^[13]。

$$M \text{ inf}(\mathbf{B}) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{N_p} \frac{v_{m,n}^{\text{mea}}(k) - v_{m,n}^{\text{pre}}(k | \mathbf{B})}{v_{m,n}^{\text{mea}}(k)} \quad (21)$$

$$\mathbf{B}_{\min} = [0.001, 10, 10] \quad (22)$$

$$\mathbf{B}_{\max} = [0.1, 60, 60] \quad (23)$$

式(21)~(23)中: \mathbf{B} 为待标定参数 τ, ν, φ 的向量; \mathbf{B}_{\min} 为相应对待标定参数的最小值; \mathbf{B}_{\max} 为相应对待标定参数的最大值; $v_{m,n}^{\text{mea}}(k)$ 为每个断面每条车道实际测量的速度值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; $v_{m,n}^{\text{pre}}(k | \mathbf{B})$ 为在特定参数下模型所计算的速度值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

这里采用非线性最小二乘法进行拟合,可通过 Matlab 软件中的 lsqnonlin 函数对交通流模型参数进行标定。由于上下游、车道之间的交通流状态均有所差异,因此在不同位置均有不同的状态参数相

对应.

(2)模型求解

速度协调控制模型为一般非线性约束的规划问题,鉴于序列二次规划法在求解含有等式约束与不等式约束的非线性规划问题方面具有良好的收敛性、计算精度和稳定性^[14],因此这里采用该算法对速度引导值进行求解.在计算时,可通过 Matlab 软件优化工具箱中的 fmincon 函数来得到最优的结果.

3 仿真及实施效果分析

利用微观交通仿真软件 Vissim 设计速度协调控制仿真系统,从而可以实时获取交通运行状态、动态进行速度协调控制,并输出相关的评价参数,对所提出的模型进行评价与对比分析.

3.1 仿真模型构建

考虑快速路出口匝道常发性瓶颈的典型性和数据完整性,选取上海市快速路中环内线方向长约 3 km(五角场-军工立交桥)的路段作为研究对象,以军工路立交出口匝道瓶颈作为分析案例,数据来源于上海市快速路的感应线圈检测数据.选取拥挤严重的 2013 年 7 月 3 日(周三)早高峰作为仿真时段,考虑仿真预热等因素,最终选择 6:20~12:10 时段的交通流进行仿真.其中经过数据分析,发现 6:30 开始交通流失效,拥挤发生^[9].

首先,根据军工路立交出口匝道附近实际道路情况及检测线圈(NHNX08~NHNX15)布设位置(图 4),建立基础的路网模型.其中,ZHNX15 为起始断面,ZHNX13 与 ZHNX12 之间包含一个上匝道,ZHNX09 为瓶颈断面,ZHNX09-ZHNX08 线圈之间为军工路立交出口匝道,匝道上游主线为单向四车道,匝道下游为单向三车道,出口匝道本身为两车道,因驶出车辆过多(高峰期间驶出车辆比例约 65%~85%)、车辆换道行为频繁而形成常发性瓶颈.

(1)流量输入

为了进一步分析不同交通需求下速度协调控制策略的实施效果,以 7 月 3 日实际交通流数据为基础,按照 1.0 倍、0.9 倍、0.8 倍、0.7 倍、0.6 倍、0.5 倍的比例对各个时段内的流量进行等比缩减,建立 6 个仿真基础模型.其中,1.0 倍实际交通需求情况如图 5 所示.由于上匝道流量较低,且没有明显的高峰时段,故在分析不同交通需求情形时,只考虑主线

交通流量的高低变化.

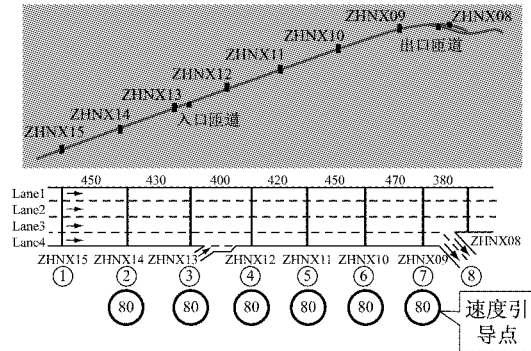


图 4 军工立交出口匝道仿真路网及线圈布设情况
Fig. 4 Simulation network and detectors layout of Jungong interchange around the off-ramp

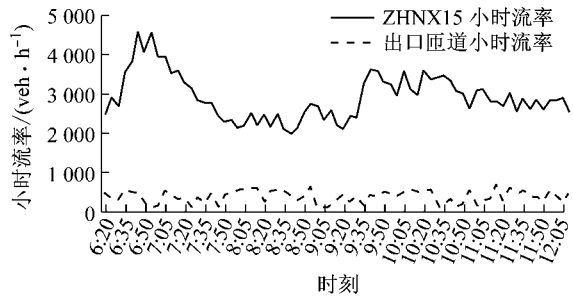


图 5 实际交通需求量
Fig.5 Actual traffic demand

(2)期望车速决策

模型计算出来的引导速度由 Vissim 软件中的“期望车速决策点”(类似于现实道路中的可变限速板)反馈到交通流,车辆在决策点之前开始调整速度,使得经过决策点的速度低于限速值.为了更好地展示速度的变化和差异,这里每个检测点均设置了速度引导点,如图 4 所示,在实际中可根据情况设置.

(3)出口匝道瓶颈设计

军工路立交出口匝道所连接的道路无实际的信号灯控制,设置虚拟的信号控制灯,以模拟出口匝道的通行能力有限、车辆通行受阻,从而引起主线上的交通拥堵.

最后,基于实际数据对模型的车速分布、驾驶行为等参数进行标定,并对模型的初始参数和交通流模型参数进行标定.其中:①各车道入口匝道汇入比 $r_1:r_2:r_3:r_4=0:1:3:6$;②1.0 倍、0.9 倍、0.8 倍、0.7 倍、0.6 倍、0.5 倍的交通需求下的虚拟车道直行比例分别为 0.10、0.15、0.20、0.24、0.27、0.28;③瓶颈断面的通行能力 $Q_b=3\ 420\ \text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$,内侧两车道 $Q_{1b}=Q_{2b}=960\ \text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$,外侧两车道 $Q_{3b}=Q_{4b}=$

750 veh · h⁻¹.

3.2 仿真结果分析

仿真结果分析发现,0.5 倍和 0.6 倍交通需求量下,交通拥堵现象已经很微弱,且交通流状态相似,因此这里只对 0.6 倍至 1.0 倍交通需求下的实施效果进行对比分析.

3.2.1 最佳速度引导值

结合交通流量和交通拥堵的特征规律,选择在 6:50~9:10 时段内进行速度协调控制.以实际交通需求下瓶颈断面 7(图 4 中 ZHNX09 线圈处)为例,对基于车道和基于断面的速度协调控制模型所计算出来的引导速度进行对比,如图 6 所示.以实际需求下最拥堵的时刻 7:55 分为例,所有断面的速度引导值见表 1.

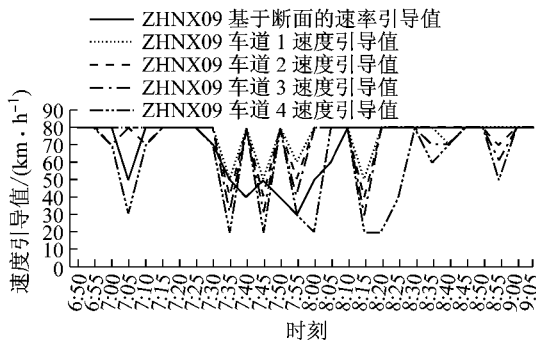


图 6 实际交通需求下断面 7 处断面与车道的速度引导值
Fig.6 Section and lane speed guidance value of section 7 under actual traffic demand

表 1 实际交通需求下各断面 7:55 分速度引导值

Tab.1 speed guidance value of different section at 7:55 under actual traffic demand km · h⁻¹

断面	基于断面速度引导值	基于车道的速度引导值			
		车道 1	车道 2	车道 3	车道 4
断面 2	30	60	50	40	50
断面 3	40	50	60	50	50
断面 4	30	60	60	40	40
断面 5	30	70	50	50	50
断面 6	40	60	40	40	40
断面 7	40	50	30	30	30

从图 6 和表 1 可知,基于车道与基于断面的速度协调控制模型所计算出来的速度引导值在不同时段上和不同断面具有一定的差异.整体而言,基于断面的速度引导值在拥挤时刻偏低,而在非拥挤时刻则比基于车道的速度引导值偏高或位于不同车道速度引导值中间.对于基于车道的速度协调控制模型所计算出来的各个车道的速度引导值,整体上,车道 4、车道 3 的引导速度低于车道 2 和车道 1,这主要可能与车道 4、车道 3 主要为驶出主线的车流,计算模

型中下游车道断面对应的出口匝道密度较高有关.

3.2.2 车辆平均延误

各交通需求下,不同控制方案的车辆平均延误见表 2.

从表 2 可知,速度协调控制策略适用于中高密度的交通流,对降低车辆延误具有一定的作用,随着流量的增加,效果更加明显.基于车道的速度协调控制管理和控制上更为精细化,在大多数交通需求情形下,优于基于断面的实施效果.尤其是在 1.0 倍实际交通需求情形下,相比无控制策略,基于车道的控制能够降低 21.5% 的车辆延误,约为基于断面模型的两倍.但速度协调控制策略在交通流量较低的情形下,反而有可能会增加车辆延误并不适用.

表 2 不同交通需求下不同控制方案下的车辆平均延误

Tab.2 Average vehicle delay of different control schemes under different traffic demands s

输入流量	基于车道	基于断面	无控制	基于车道降比/%	基于断面降比/%
1.0 倍	435.8	499.6	555.5	21.5	10.1
0.9 倍	248.9	250.8	265.3	6.2	5.5
0.8 倍	114.1	122	119.9	4.8	-1.8
0.7 倍	37.1	40.3	39	4.9	-3.3
0.6 倍	7.0	6.9	6.1	-14.8	-13.1

3.2.3 拥堵时空范围

为了更加直观地展示效果,将各交通需求情形下不同控制方案的拥堵时空范围进行比较,如图 7 所示.

从图 7 可见,1.0 倍实际交通需求情形下,基于车道的策略实施效果显著,成功消除了当天 10 点之后的二次拥堵现象,而基于断面的模型虽然没有完全消除第二次拥堵,但也使拥堵范围缩小至断面 6 (ZHNX10 线圈)处.0.9 倍交通需求情形下,虽然基于断面的策略在缓解断面 4 (ZHNX12 线圈)处的拥堵更具效果,但基于车道的策略使断面 6 处的拥堵更快地消散.0.8 倍交通需求情形下,基于车道和基于断面的速度协调控制策略在拥堵时空范围上的作用不明显,但相比而言,基于车道的控制策略下,拥堵范围内的速度相对较高(颜色较浅)一些.0.7 倍交通需求情形下,三种控制方案下的交通拥堵均集中在瓶颈点处,但相对而言,基于车道策略下的拥堵时间更短一些.

4 结论

针对快速路出口匝道拥堵现象,提出了主线上基于车道的实时速度协调控制模型和方法,并结合

实际快速路网利用交通仿真软件构建了仿真系统,分析了不同交通需求情形下无策略控制、基于车道速度协调控制、基于断面速度协调控制三种方案的仿真结果.结果表明:速度协调控制策略适用于中高密度,对缓解交通拥堵、提高交通安全有一定的助益,且基于车道的控制在拥堵的情形下,优于基于断面的控制.

由于数据、时间等受限,基于车道的控制策略的适用性还需结合进行更多分析,同时基于车道的精细化管理具体的实施细节也还需要进一步研究,后续可进一步探索基于车道的速度协调控制与动态车道管理、地面动态信号控制的联合策略对缓解出口匝道瓶颈处交通拥堵的作用.

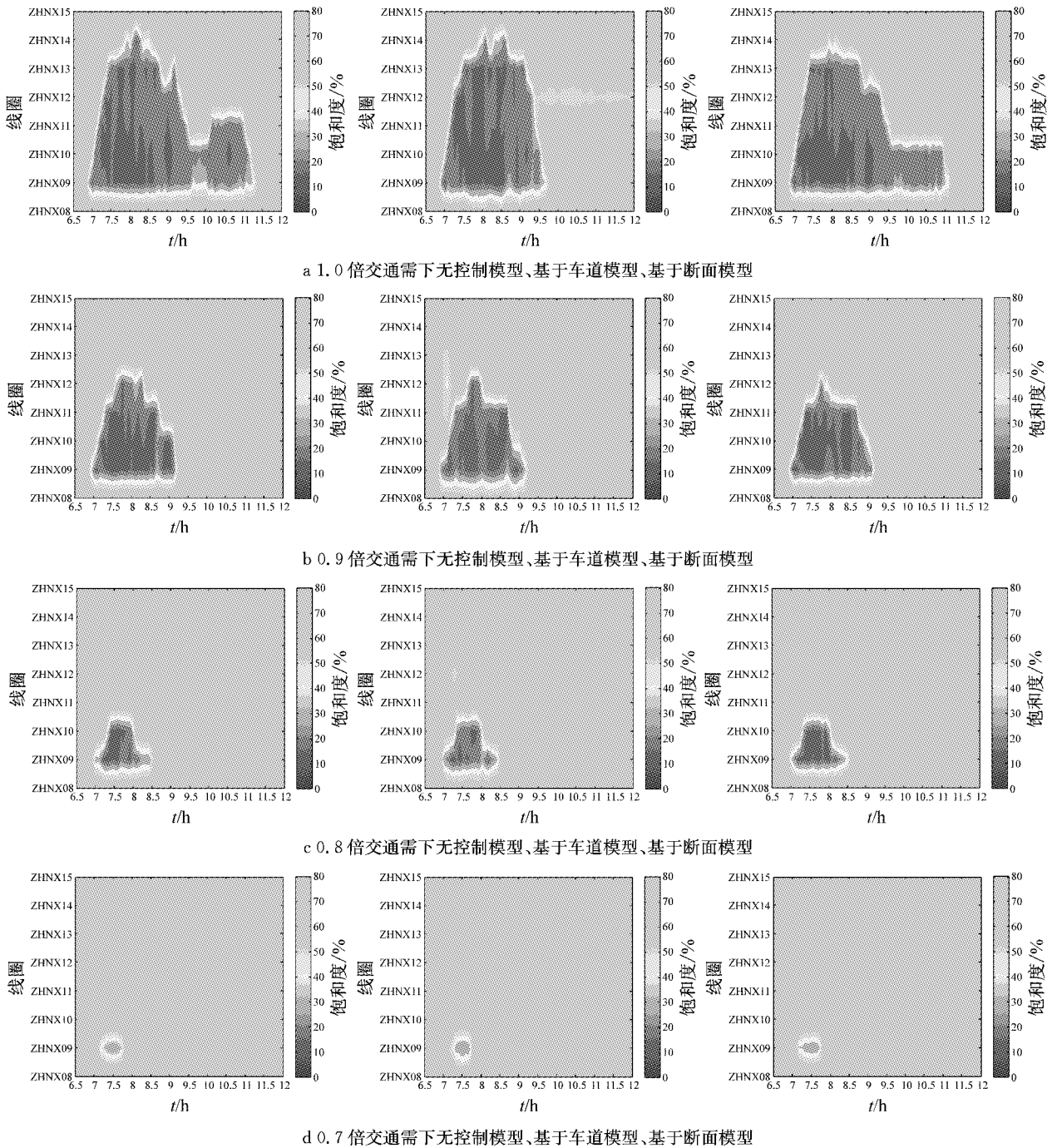


图 7 不同交通需求下不同控制方案下的拥堵时空范围

Fig. 7 Traffic congestion spatio-temporal range of different control schemes under different traffic demands

参考文献:

- [1] GÜNTHER G, COEYMANS J E, MUÑOZ J C, *et al.* Mitigating freeway off-ramp congestion: a surface streets coordinated approach [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 20(1): 112.
- [2] 马继萍. 快速路出口匝道控制策略研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2013.
MA Jiping. Study on controlling strategy of off-ramp in expressway[D]. Xi'an: Chang'an University. School of Highway, 2013.
- [3] WALLER S T, NG M, FERGUSON E, *et al.* Speed harmonization and peak-period shoulder use to manage urban freeway congestion [R]. Texas: Texas Department of Transportation, 2009.
- [4] 李志斌, 金茂菁, 刘攀, 等. 提高高速公路通行效率的可变限速控制策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013(5): 1204.
LI Zhibin, JIN Maojing, LIU Pan, *et al.* Evaluation of impact variable speed limits on improving traffic efficiency on freeways[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2013(5): 1204.
- [5] LI D, RANJITKAR P, CEDER A. A logic tree based algorithm for variable speed limit controllers to manage recurrently congested bottlenecks [C]// *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*. Washington D C: Transportation Research Board, 2014: 1-14.
- [6] YANG X, LIN Y, LU Y, *et al.* Optimal variable speed limit control for real-time freeway congestions[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2013, 96: 2362.
- [7] CARLSON R C, PAPAMICHAIL I, PAPAGEORGIU M. Local feedback-based mainstream traffic flow control on motorways using variable speed limits [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 1261.
- [8] ZHU F, UKKUSURI S V. Accounting for dynamic speed limit control in a stochastic traffic environment: a reinforcement learning approach [J]. *Transportation Research Part C: Emerging technologies*, 2014, 41(2): 30.
- [9] 李晓庆, 王忠宇, 陈可心, 等. 基于车道的瓶颈交通流失效识别实证研究[J]. 交通信息与安全, 2015, 33(4): 49.
LI Xiaoqing, WANG Zhongyu, CHEN Kexin, *et al.* an empirical study for identifying traffic breakdown at bottlenecks [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2015, 33(4): 49.
- [10] LETTER C, ELEFTERIADOU L. An investigation of lane by lane variable speed limit control using simulation [C]// *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*. Washington D C: Transportation Research Board, 2015: 1-18.
- [11] HEGYI A, DE SCHUTTER 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(3): 185.
- [12] 陈大山, 孙剑, 李克平. 城市快速路速度引导预测控制模型[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 102.
CHEN Dachuan, SUN Jian, LI Keping. Speed guidance predictive control model on urban expressway[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2012, 12(1): 102.
- [13] SUN R, HU J, XIE X, *et al.* Variable speed limit design to relieve traffic congestion based on cooperative vehicle infrastructure system [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2014, 138: 427.
- [14] 马昌凤. 最优化方法及其 Matlab 程序设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
MA Changfeng. Optimization method and its Matlab programming [M]. Beijing: Science Press, 2010.