

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.05.010

# 基于 5G 边缘计算的高速公路可变限速与换道协同控制

邓 炜<sup>1</sup>, 于欣海<sup>1</sup>, 张 朗<sup>2</sup>, 杨 伟<sup>3</sup>, 丁 恒<sup>2</sup>

(1. 安徽省高速公路联网运营有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

**摘 要:**针对高速公路瓶颈路段的交通拥堵及安全问题,结合 5G 边缘计算技术,文章提出一种应用于高速公路瓶颈区的可变限速(variable speed limits, VSL)与换道(lane change, LC)协同控制策略。考虑到交通流随时空变化的动态特性,以 5G 路侧单元(road side unit, RSU)为节点,分路段获取并处理交通状态信息,同时实施可变限速控制和换道控制集成控制。首先将改进的元胞传输模型(cell transmission model, CTM)作为预测模型,以提高交通效率为目标计算限速区域最优的速度控制序列;根据改进的 CTM 计算换道区域内车辆的车道级最优分布,诱导车辆提前换道;最后以 3 车道总长为 4.8 km 的高速公路路段为分析场景,在卡车和小汽车混合交通流条件下进行了仿真实验分析。实验结果表明, VSL-LC 协同控制策略可以有效优化交通流运行状态,大幅提高交通流的效率和安全指标。

**关键词:**高速公路;边缘计算;可变限速(VSL)控制;换道(LC)控制

**中图分类号:**U491.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)05-0642-09

## Collaborative control of variable speed limits and lane change on freeway based on 5G edge computing

DENG Wei<sup>1</sup>, YU Xinhai<sup>1</sup>, ZHANG Lang<sup>2</sup>, YANG Wei<sup>3</sup>, DING Heng<sup>2</sup>

(1. Anhui Expressway Network Operation Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Transport Consulting and Design Institute Co., Ltd., Hefei 230088, China)

**Abstract:** Aiming at the traffic congestion and safety problems in the bottleneck area of a freeway, this paper proposes a collaborative control strategy of the variable speed limits(VSL) and lane change(LC) in the bottleneck area of the freeway combined with 5G edge computing technology. Considering the dynamic characteristics of traffic flow changing with time and space, this study uses 5G road side unit (RSU) as a node to obtain and process traffic status information by road sections, while implementing an integrated VSL and LC control. Firstly, the improved cell transmission model(CTM) is used as a prediction model to calculate the optimal speed control sequence in the speed limit area with the goal of improving traffic efficiency. Then, based on the improved CTM, the optimal lane-level distribution of vehicles in the lane-changing area is calculated to induce vehicles to change lanes in advance. Finally, using a three-lane freeway section with a total length of 4.8 km as the analysis scenario, simulation experiments were conducted under the mixed traffic flow conditions of trucks and cars. The results show that the VSL-LC collaborative control strategy proposed in this paper can effectively optimize

**收稿日期:**2023-09-11; **修回日期:**2023-10-19

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52072108);安徽省住房城乡建设科学技术计划资助项目(2022-YF145)和合肥市自然科学基金资助项目(2022020)

**作者简介:**邓 炜(1980—),男,广东湛江人,安徽省高速公路联网运营有限公司工程师;

丁 恒(1980—),男,安徽阜南人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail:dingheng@hfut.edu.cn.

the operation status of traffic flow, and significantly improve the efficiency and safety indicators of traffic flow.

**Key words:** freeway; edge computing; variable speed limits(VSL) control; lane change(LC) control

## 0 引 言

由于机动车保有量的快速增长,高速公路交通需求也大幅度上升,导致高速公路交通拥堵现象频发,尤其在节假日免费通行期间。传统的交通管控手段主要根据交通需求被动的限流,以减少交通压力<sup>[1-2]</sup>。相较于传统的交通管控手段,主动交通管理(active traffic management, ATM)不仅可以避免拥堵的持续恶化,同时也能降低事故风险<sup>[3]</sup>。可变限速(variable speed limits, VSL)控制技术作为 ATM 中运用最为广泛的一种,基于实时的交通数据对动态变化的交通特征做出反应并自动调整当前限速值,被证明是一种较为有效的管控手段<sup>[4]</sup>。文献[5]基于 Q 学习算法,提出一种 VSL 控制策略,并证明该策略可以在冰雪条件下提高合流区通行效率;文献[6]提出一种旨在消除运动波的 VSL 方法,并通过数值仿真验证该方法在交通效率和安全方面的有效性。

虽然 VSL 已被证明在改善交通效率、安全等方面都具有巨大潜力,但是面对日益增长的交通需求,单独使用 VSL 仍存在一定的局限性。目前关于 VSL 研究的重心大多集中在交通流的宏观层面,对微观的车辆换道(lane change, LC)行为研究较少<sup>[7-8]</sup>。文献[9]发现集成使用可变限速控制和换道控制的控制效果更加明显;文献[10]基于纯网联环境提出将可变限速和换道结合的方法,同时对路段限速值和换道数进行求解,通过仿真证明该方法的有效性。此外,目前大部分研究的对象局限于由单一车型组成的交通流,忽略了实际交通流中大型车辆的影响。

交通系统作为复杂系统,其多输入多输出的特点造成了交通流可能在时空上存在较大的差异,也对交通数据的采集、处理和传输产生不利影响。VSL 和 LC 作为实时的交通管控方法,当交通数据的实时性和准确性较低时,控制效果也会大打折扣<sup>[11]</sup>。而 5G 边缘计算作为一种新型的计算处理模式,可以将数据处理和存储等任务从云端转移到网络边缘,减少数据传输量和网络拥塞。这种分布式计算模式可以为车联网提供低时延和高可靠的计算环境,从而缓解控制中心的计算压力,提高整个车联网系统的数据传输效率。将 5G

边缘计算和高速公路控制策略进一步配合,可实现道路资源的动态调配和主动控制<sup>[12]</sup>。

因此,本文针对高速公路交通拥堵问题,基于 5G 边缘计算提出一种高速公路瓶颈区上游混合交通流实时管控方法。该方法利用 5G 通讯平台实现了车辆与基础设施之间的信息交互,并采用分布式计算模式进行数据处理。首先根据路侧单元(road side unit, RSU)的覆盖范围,将瓶颈路段上游划分为不同的区域;接着用改进的元胞传输模型(cell transmission model, CTM)判断和预测路段的交通状态,通过分区域使用动态限速控制和换道控制的协同控制策略,提升高速公路的效率、安全及服务水平;最后通过仿真实验,全面分析了协同控制策略的控制效果。

## 1 控制场景

本研究考虑实际高速公路中交通流为汽车与卡车混合行驶的场景,混合驾驶环境协同控制场景如图 1 所示。

高速公路瓶颈上游路段分为车辆速度动态控制路段和换道控制路段。整个高速公路以 RSU 节点划分为不同单元,RSU 具有获取单元内的车辆信息的能力,同时可以从控制中心接收控制信号。不同单元的 RSU 与对应的边缘服务器对接,边缘服务器直接对 RSU 获取的交通信息进行处理,并上传至控制中心。

基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的速度动态控制策略以高速公路瓶颈上游路段车辆的自由流速度作为控制变量,通过控制中心计算,分区域对车辆速度进行实时动态控制,进而调节流入瓶颈路段的交通量,避免瓶颈路段道路通行能力下降,提高交通效率。

车辆驶出速度动态控制区域后,将进入换道控制区域。换道控制的理念是通过诱导车辆提前变道来减少瓶颈路段的强制换道行为,从而降低瓶颈路段的拥堵程度。同时在该区域内,将解除对车辆施加的速度动态控制,车速限制值恢复为道路的初始限速值。这一操作的目的是让高速公路瓶颈处恢复最大通行能力。由于换道控制的连续性和整体性,根据文献[13]的建议,控制中心以整个换道控制区域为主体进行计算。

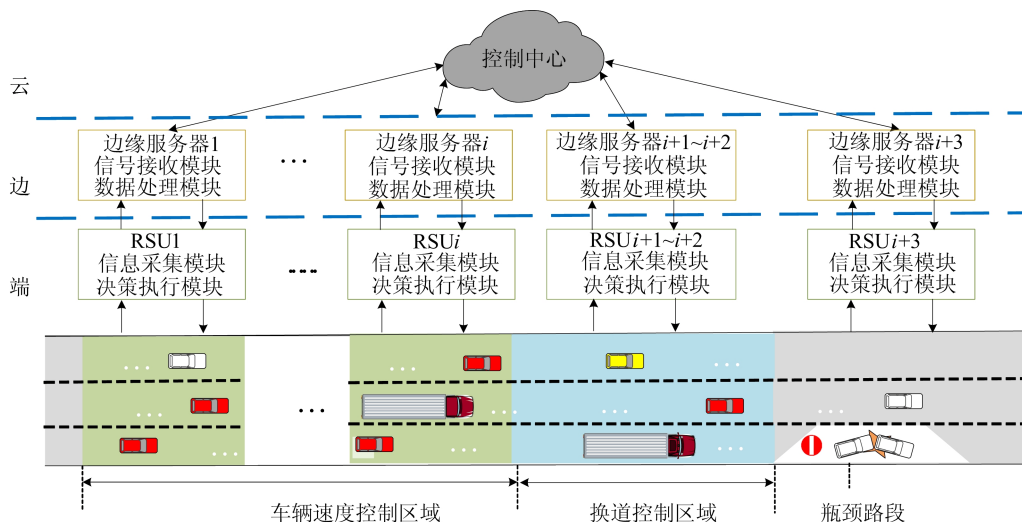


图 1 交通控制场景示意图

本研究提出的管控方法主要由以下单元实现：

1) 路侧单元。用于获取覆盖范围内交通状态信息,同时可以接收控制信号,具备信息获取和决策执行的功能。

2) 边缘服务器。接受并处理路侧单元的实时信号,判断路段状态,然后将数据上传至控制中心。

3) 控制中心。接收整个道路系统的状态信息,计算得到不同区域的车辆最大限速值或车辆换道建议。

4) 标识单元。分区域地在道路上方设置车道级 LED 屏幕,显示路侧服务器计算的最大限速值及车辆换道建议。

## 2 宏观交通流建模

CTM<sup>[14]</sup>由于其需要标定的参数少、计算效率高的特点,常用于宏观交通流的建模。考虑到技术条件和研究需要,本文选择 CTM 对交通流进行建模。然而传统的 CTM 无法反映混合车型交通流的异质性,且缺乏表现高速公路瓶颈处的通行能力下降的能力。在相关研究<sup>[15]</sup>中,通过引入动态车辆折算系数(passenger car equivalents, PCE)<sup>[16]</sup>来衡量混合交通流实时变化的交通特性,同时修改瓶颈元胞的需求与供给函数,使 CTM 能够建模出高速公路瓶颈处的通行能力下降现象。

## 3 基于 MPC 的速度动态控制系统

### 3.1 控制框架

速度控制框架如图 2 所示,本文所提出的速

度动态控制基于 MPC 控制框架。MPC 由预测模型、优化方案、评价指标 3 个关键步骤组成。在本文的动态控制场景中,控制中心基于实时交通流数据,对特定优化方案下的交通参数进行预测,并根据所设定好的目标函数计算评价指标,通过持续滚动优化得到最优速度控制序列,并将序列中属于控制时域的控制信号发送给路侧单元。在下一个控制步重复此流程,直至整个控制过程结束。

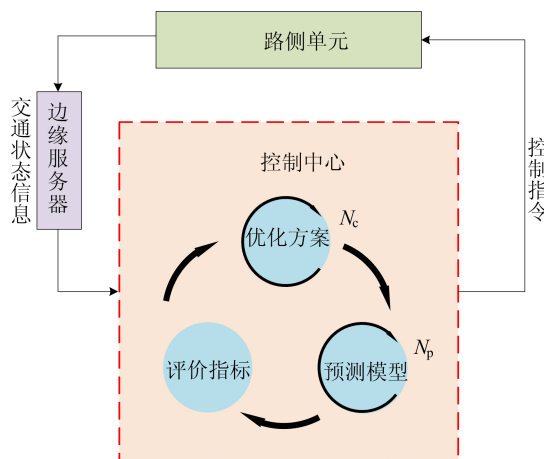


图 2 基于 MPC 的速度动态控制框架

预测模型的仿真时间步长为  $T$ , 仿真时间步序号为  $k$ ; 控制器时间步长为  $T_c$ , 控制器时间步序号为  $k_c$ 。控制器时间步长  $T_c$  大于模型仿真时间步长  $T$ <sup>[17]</sup>, 为简化计算, 令  $T_c = MT$ ,  $M$  为大于 1 的正整数。根据图 2 所示的控制框架, 速度动态控制步骤描述如下。

1) 预测过程。预测时间步  $t = k_c T_c$ , 控制中心根据改进的 CTM 预测从  $k_c T_c$  至  $(k_c + N_p) T_c$

时间段内的系统状态变化,其中  $N_p$  为预测时域。输入的变量除交通系统在  $k_c T_c$  时刻的状态信息外,还有控制信号( $u(k_c), \dots, u(k_c + N_p - 1)$ )。

2) 效果评价。根据预测模型和设定的目标函数,计算各控制信号的评价指标。

3) 优化过程。通过算法在线优化控制信号,通过多次迭代得到最优控制序列。

4) 控制过程。根据选定的最优控制信号( $u^*(k_c), \dots, u^*(k_c + N_p - 1)$ ),执行前  $N_c$  步,即从  $(k_c + N_c - 1) T_c$  时刻后,控制信号不变。在下一个控制步,即  $t = (k_c + 1) T_c$  时,重复步骤 1) ~ 3) 的全过程。

### 3.2 预测模型

MPC 的基本思想是根据系统的预测状态在线求解一个开环优化问题,预测模型作为 MPC 的基础,需要对系统的未来状态进行准确的判断。本研究采用改进的 CTM<sup>[13]</sup> 作为 MPC 的预测模型,通过输入实时的交通流数据(密度、速度等)和控制信号(控制路段分区域的车辆自由流速度限制),可以预测未来各单元的交通状态信息(密度、速度等)。

### 3.3 目标函数及约束条件

#### 3.3.1 目标函数

车辆速度动态控制的主要目的是提高道路通行效率。总行程时间(total travel time, TTT) 的定义为时段内道路中所有车辆的通行时间总和,是常见的效率评价指标。本文的控制目标设定为最小化控制路段的车辆总行程时间。

本文利用改进的 CTM 对高速公路场景进行建模。假设高速公路路段以 RSU 的覆盖范围为单位,均分为单位长度  $L$  的单元,对每个单元从路段上游至下游依次进行编号,  $i = 1, 2, \dots, I$ , 则第  $k_c$  次仿真过程的目标函数构建如下:

$$F(k_c) = \min T(k_c) = \min \sum_{i=1}^I \sum_{k=M k_c}^{M(k_c + N_p - 1)} L \rho_i(k) T \quad (1)$$

#### 3.3.2 约束条件

在控制过程中,决策变量是不同单元的车辆限速值。从控制场景的实际条件和安全角度出发,在尽可能优化目标函数的基础上,还要满足以下约束条件。

1) 时间尺度约束。相邻时间步  $k$  与  $k + 1$  内限速值变化过大不仅会降低道路安全性和驾驶舒适性,而且会降低车辆对控制信号的服从率。因此,被控单元  $i$  内车辆的限速值要满足:

$$|v_{c,i}(k) - v_{c,i}(k + 1)| \leq \Delta v_{c,max} \quad (2)$$

其中:  $v_{c,i}(k)$  为第  $k$  个时间步对单元  $i$  内车辆施加的限速值;  $\Delta v_{c,max}$  为限速值最大变化幅度。

2) 空间尺度约束。不同控制区域的限速值变化过大不仅会降低车辆的服从率,还会影响交通安全和驾驶舒适性。因此,在同一时间步  $k$ ,被控路段相邻单元  $i$  与  $i + 1$  的车辆限速值要满足:

$$|v_{c,i}(k) - v_{c,i+1}(k)| \leq \Delta v_{c,max} \quad (3)$$

3) 上下界约束。路段的限速值应设置在合理的区间内,不能过小或过大。在第  $k$  个时间步对单元  $i$  内车辆施加的限速值要满足:

$$v_{c,min} \leq v_{c,i}(k) \leq v_{c,max} \quad (4)$$

其中:  $v_{c,min}$  为最低限速值;  $v_{c,max}$  为最高限速值。

### 3.4 求解算法

通过求解构建的非线性规划问题,可以找到最优速度控制序列。本研究选择粒子群优化算法<sup>[18]</sup> 对该问题进行求解。

## 4 换道控制系统

换道控制的目的在于解决高速公路瓶颈车道的车流汇入问题,车辆提前换道可以减少车辆的强制换道次数,延缓拥堵的形成。本研究拓展了文献<sup>[19]</sup> 在合流区换道控制方面的研究,将其与改进的 CTM 结合,并延伸到混合车型环境高速公路瓶颈路段。

### 4.1 控制框架

换道控制框架如图 3 所示。

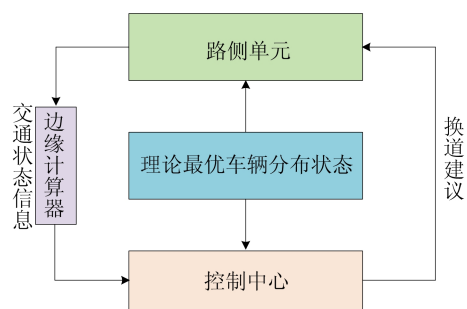


图 3 换道控制框架

在换道控制场景中,控制中心根据实时交通流数据,结合由改进 CTM 得到的车道级车辆最优分布,按照设定好的目标函数求解,得到当前控制步内的各车道的最佳车辆数。换道控制通过向车辆提供换道建议实现这一目标,当车道内车辆分布满足计算的最优状态,在控制步剩余时间内,服务器停止向该车道车辆提供换道建议。换道控

制区域内的路侧单元则分别负责整体区域内的部分数据处理任务。

#### 4.2 目标函数及约束条件

换道控制的目标首先是使各车道当前密度与理想密度的差值最小化,其次是最小化车辆的换道次数,以避免不必要的通行能力损失。

对每个车道从最右侧至最左侧依次进行编号,  $m=1,2,\dots,l$ 。目标函数构建如下:

$$G = \min \left\{ \sum_{m=1}^l \alpha_{i,m} e_{i,m}^2(t) + \beta \sum_{m=1}^l m [n_{i,m}^*(t) - n_{i,m}^s(t)] \right\} \quad (5)$$

$$e_{i,m}(t) = \begin{cases} 0, & n_{i,m}^s(t) \geq n_{i,m}^*(t); \\ n_{i,m}^*(t) - n_{i,m}^s(t), & n_{i,m}^s(t) < n_{i,m}^*(t) \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\alpha, \beta$  为权重系数;  $n_{i,m}^*(t)$  为所求的车道当前最佳车辆数;  $n_{i,m}^s(t)$  为车道  $m$  理想车辆数;  $e_{i,m}(t)$  为车道当前最佳车辆数与理想车辆数的偏差惩罚函数。

为避开车道下降区域,最理想的车辆分布状态是所有车辆均匀分布在左侧两车道,车道的理想车辆数为:

$$n_{i,m}^s(t) = \begin{cases} 0, & m = 1; \\ \rho_{i,m}^c L, & m = 2, \dots, l \end{cases} \quad (7)$$

$$\rho_{i,m}^c = \frac{\rho_i^c}{l}$$

其中:  $\rho_{i,m}^c$  为单元  $i$  内车道  $m$  的临界密度,  $\rho_i^c$  为单元  $i$  的临界密度,在本研究中可由改进的 CTM 得到。

控制的决策变量是不同车道内的最优车辆数,在控制的实际应用中还要满足以下约束条件。

1) 车辆应满足守恒原则,即换道控制前后的各类车辆总数不变。因此车辆数满足:

$$\sum_{m=1}^l n_{i,m}(t) = \sum_{m=1}^l n_{i,m}^*(t) \quad (8)$$

$$n_{i,m}^*, n_{i,m}^s, n_{i,m} \in \mathbf{N} \quad (9)$$

卡车对交通流的影响与汽车存在差异,在换道控制中同样使用动态 PCE 将车道内的卡车数量标准化:

$$n_{i,m}(t) = \sum_{j=1}^J \eta_{i,m}^j(t) n_{i,m}^j(t) \quad (10)$$

2) 为减少换道引起的冲突,规定在换道控制区域的车辆仅向左进行换道,因此车道最佳车辆数  $n_m^*$  与车道内车辆数  $n_m$  的关系满足:

$$\sum_{m=1}^w n_{i,m}(t) \geq \sum_{m=1}^w n_{i,m}^*(t), \quad w \in \{1, 2, \dots, l\} \quad (11)$$

3) 频繁的换道行为会增加交通冲突的风险,造成交通震荡,直接影响车辆行驶安全。因此对换道次数进行限制:

$$|n_{i,m}^*(t) - n_{i,m}(t)| \leq L \bar{r} n_{i,m}(t) \quad (12)$$

其中,  $\bar{r}$  为单位长度内的临界换道率<sup>[20]</sup>。临界换道率与平均车道流量  $\bar{q}$  关系式为:

$$\bar{r} = (-4.25 \times 10^{-4} \bar{q} + 0.99)^{0.56} \quad (13)$$

通过目标函数和约束条件的构建,利用换道控制来调整车辆分布状态这一目标被转化为求解非线性整数规划问题。该问题可通过蒙特卡洛方法求近似解。

## 5 仿真案例分析

### 5.1 场景及参数

在混合驾驶环境中存在 4 种类型的跟驰行为,分别是汽车跟驰汽车(car-car)、汽车跟驰卡车(car-truck)、卡车跟驰汽车(truck-car)、卡车跟驰卡车(truck-truck),因此本文选用改进 IDM 跟驰模型<sup>[21]</sup>对车辆的跟驰行为进行建模,模型考虑了不同车型的性能差异以及车与车之间的作用关系,适用于混合交通流的建模。跟驰模型参数值见表 1 所列。

表 1 跟驰模型参数取值

参数	car-car	car-truck	truck-car	truck-truck
$a_{\max}/(\text{m/s}^2)$	1.01	1.03	0.78	0.74
$v/(\text{m/s})$	27.80	19.80	16.70	14.30
$l_{\text{veh}}$	5	5	12	12
$b/(\text{m/s}^2)$	-2.26	-2.12	-1.70	-1.61
$t_0/\text{s}$	1.20	1.40	1.80	2.00
$s_0/\text{m}$	0.85	1.35	1.11	1.53
$s_1/\text{m}$	0.19	0.27	0.12	0.36

汽车和卡车的换道行为均使用 MOBIL 模型进行建模,其中协同换道参数  $p$  取值为 0.5。由于卡车更倾向于保持稳定的驾驶状态<sup>[22]</sup>,将汽车的换道触发阈值  $\Delta a_{\text{th}}$  取值为 0.3,卡车的  $\Delta a_{\text{th}}$  取值为 0.5。在本文中,通过增加车辆的换道激励来实现换道控制,换道控制提供的换道激励为 0.5。

本文仿真高速公路路段为 3 车道,总长度为 4 800 m。在卡车渗透率为 15% 的条件下进行仿真,每次仿真采用相同的流量输入,单次仿真时长为 3 600 s。

仿真场景如图 4 所示,仿真路段被等分为 16 个单元,每个单元长度为 300 m,假设每个单元均被独立的 RSU 所覆盖,控制中心可以获得

实时交通状态信息,同时向各单元 RSU 下达控制指令。为了分析控制策略对高速公路存在瓶颈时的交通流状态的影响,在交通流运行到 900 s 时,第 13 个单元内的最右侧车道发生交通事故导

致一段车道封闭,形成瓶颈。根据相关研究及本研究实际需求,事故发生后,将 1 500~<3 000 m 范围设为车辆速度控制路段,3 000~<3 600 m 范围则被设定为换道控制路段<sup>[13]</sup>。

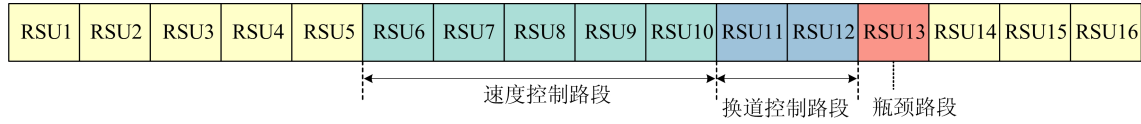


图 4 基于改进 CTM 的高速公路仿真场景

在微观仿真场景下,对改进 CTM 的参数进行标定,结果见表 2 所列。

表 2 改进的 CTM 参数取值

$Q_{max}/(\text{辆}/\text{h})$	$v_f/(\text{km}/\text{h})$	$\bar{\omega}/(\text{km}/\text{h})$	$\zeta$
4 360	61.3	17.5	0.80

为保证预测模型的精度,车辆在单位仿真步长内的行驶距离要小于或等于单元的长度,同时控制器时间步长  $T_c$  应取仿真时间步长的整数倍。结合本研究实际情况,取  $T=10\text{ s}$ ,  $T_c=60\text{ s}$ 。针对控制器的预测时域  $N_p$ ,文献[23]的研究指出其取值应在 3~7 之间,在本文中  $N_p=5$ 。综合控制效果和模型计算成本,控制时域  $N_c$  取值通常小于  $N_p$ ,因此取  $N_c=3$ 。

约束条件中,限速值最大变化幅度  $\Delta v_{c,max}=20\text{ km}/\text{h}$ ,最高限速值  $v_{c,max}$  取路段最大自由流速度  $100\text{ km}/\text{h}$ ,最低限速值  $v_{c,min}=60\text{ km}/\text{h}$ 。

### 5.2 控制效果分析

根据建立的高速公路瓶颈区域场景(图 4),从效率、安全、油耗与排放 4 个角度对控制结果进行分析。

1) 交通效率。速度动态控制的目的是为了缓解交通拥堵,提高交通效率,因此首先分析控制策略对交通运行效率的影响。本文选取不实施路段速度控制(no control, NC)、LC、VSL 和 VSL-LC 进行仿真和对比。4 种控制条件下交通密度随时间的变化情况如图 5 所示。由图 5a 可知,在无控制条件下,交通拥堵在事故发生后的 16 min 左右形成,并逐渐向上游蔓延。事故后至仿真结束期间,瓶颈区域平均密度达到 74 辆/km,最大密度为 146 辆/km。由图 5b、图 5c 知,LC 和 VSL 均能够在一定程度上缓解交通拥堵。在 LC 条件下,瓶颈区域平均密度达到 64 辆/km,最大密度为 140 辆/km。在 VSL 条件下,瓶颈区域平均密

度达到 50 辆/km,最大密度为 100 辆/km。LC 和 VSL 的协同控制策略效果最为显著,事故后瓶颈区域的平均密度和最大密度仍维持在较低水平,平均密度为 50 辆/km,最大密度为 90 辆/km。

4 种控制条件下高速公路各路段内车辆的平均速度随时间变化情况如图 6 所示。

由于混合交通流的异质性,4 种控制条件下的车辆速度都表现出了离散性的特点,在此条件下,本文所提出的协同控制策略依然表现出较好的性能。由图 6a 可知,无控制场景下,瓶颈路段的车辆平均速度在事故发生后迅速降低,到 20 min 时,即事故发生 16 min 后,瓶颈区域的平均车速下降到约 28 km/h,随着上游车辆持续到达,交通拥挤状况愈演愈烈,最严重时瓶颈区域的平均车速约 18 km/h。

由图 6b、图 6c 可知,在分别实施 LC 和 VSL 的条件下,事故发生后,瓶颈区车辆的平均车速为 41、47 km/h。在实施协同控制策略条件下(图 6d),瓶颈区域的平均车速都维持在 48 km/h 左右,保障了交通运行顺畅。

为更直观地展现在不同控制条件下,交通运行效率的变化,统计总行程时间、总停车延误,见表 3 所列。

表 3 不同控制条件下的交通效率指标 单位:s

评价指标	NC	LC	VSL	VSL-LC
总行程时间	710 966	691 671	674 196	673 200
总停车延误	14 655	10 047	4 776	4 309

从表 3 可以看出,在 3 种控制条件下的总行程时间和总停车延误指标都呈现下降的趋势。

相较于无控制条件,LC 条件下的总行程时间下降率为 2.7%,总停车延误下降了 31.4%;VSL 条件下的总行程时间下降率为 5.2%,总停车延误下降了 67.4%;协同控制条件下的总行程时间下

降率为5.3%，总停车延误下降了70.6%。其中协同控制条件下相对于VSL条件延误减少了9.7%，

相对于LC条件延误减少了57.1%。这说明协同控制策略在减少延误方面具有显著效果。

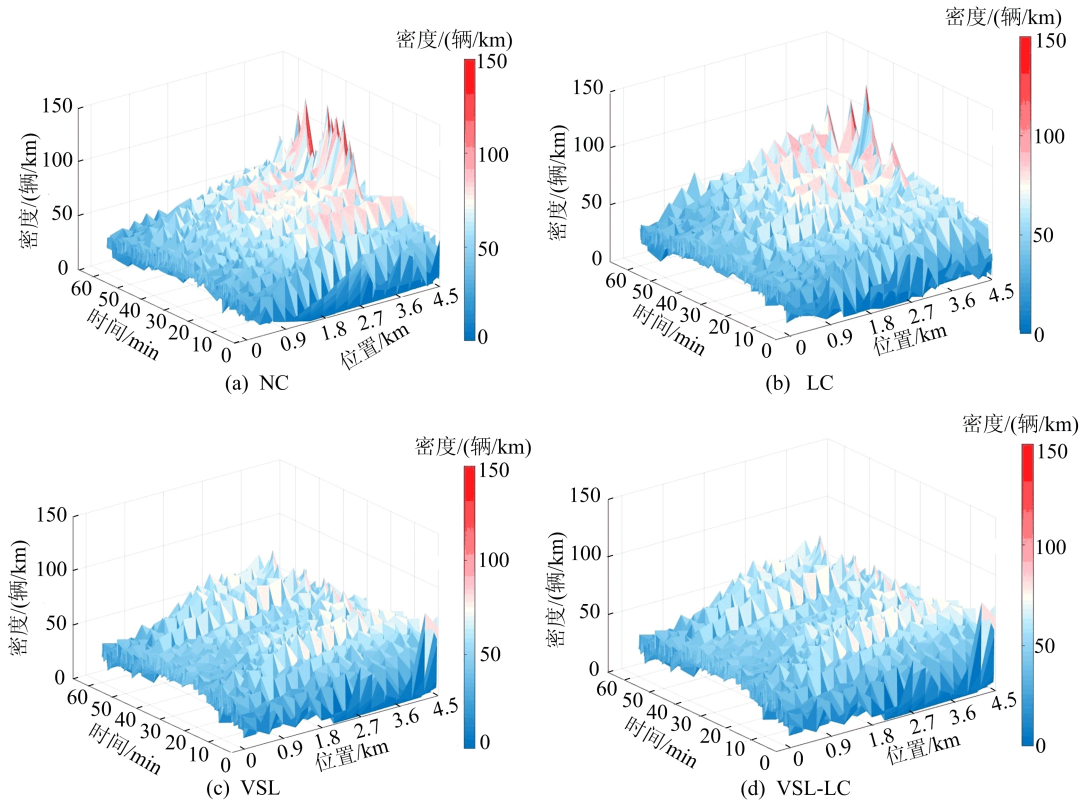


图 5 不同控制条件下交通密度随时间变化情况

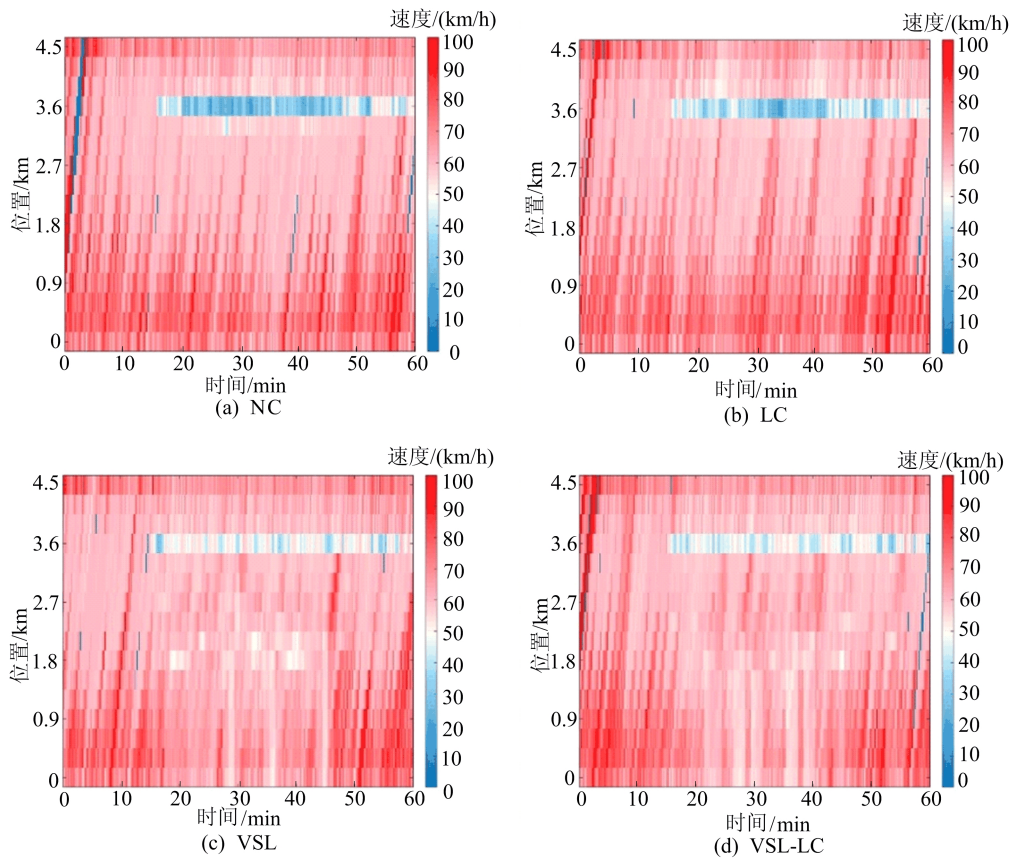


图 6 不同控制条件下车辆平均速度随时间变化情况

2) 交通安全。本文采用通用指标车速标准差 (standard deviation, SD) 和碰撞风险指标  $C_{RTTC}$  来分析 4 种控制策略对交通安全方面的影响。

在道路交通流中,SD 越大,表示交通流车速离散度越大,道路事故率就越高;反之 SD 越小,则表示交通流车速离散度越小,安全性越高。SD 的计算公式为:

$$D_{SD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (v_n - \bar{v}_*)^2}{N - 1}} \quad (14)$$

其中,  $\bar{v}_*$  为道路中所有车辆车速的平均值。

第 2 个交通流安全性评价指标选用碰撞风险指标  $C_{RTTC}$ ,  $C_{RTTC}(t)$  越小,说明前、后两车发生碰撞的风险越小。其计算公式为:

$$C_{RTTC}(t) = \begin{cases} \frac{v_n(t) - v_{n-1}(t)}{\Delta x_n(t) - l_{veh}}, & v_n(t) > v_{n-1}(t); \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

各控制条件相较于无控制条件,交通安全指标下降率的统计结果见表 4 所列。

从表 4 可以看出,LC 和 VSL 均能有效优化交通安全指标。值得注意的是,协同控制条件下,碰撞风险指标的下降率要显著高于单独使用 LC 或 VSL。说明在减少碰撞风险方面,协同控制策略具有相当的潜力。

表 4 不同控制条件下的交通安全指标下降率 %

评价指标	LC	VSL	VSL-LC
车速标准差	3.8	20.5	22.7
碰撞风险指标	2.6	14.5	29.3

3) 油耗和排放。燃油消耗和污染物排放是评价道路服务水平的重要指标之一。本文选用 VT-Micro 模型,通过回归系数的不同取值<sup>[24]</sup> 可以统计不同类型污染物的排放数据。VT-Micro 模型计算公式为:

$$\ln E_{MOE} = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 k_{ij} (v_n)^i (a_n)^j \quad (16)$$

其中:  $E_{MOE}$  为车辆  $n$  的油耗(污染物排放)因子;速度的指数  $i=0, 1, 2, 3$ ;加速度的指数  $j=0, 1, 2, 3$ ;  $k_{i,j}$  为回归系数。

根据式(16)计算各控制条件仿真时段内车辆平均油耗、HC 和  $NO_x$  的平均排放量,结果如图 7 所示。3 种控制策略在减少燃油和排放的效果似

乎并不明显,然而这一现象建立在控制策略提高了车辆的平均速度基础上。尽管如此,本研究所提出的协同控制策略依然在一定程度上减少了车辆的平均油耗和污染物排放,这说明协同控制策略能够平滑车辆的速度曲线,对高速公路服务水平的提高具有显著意义。

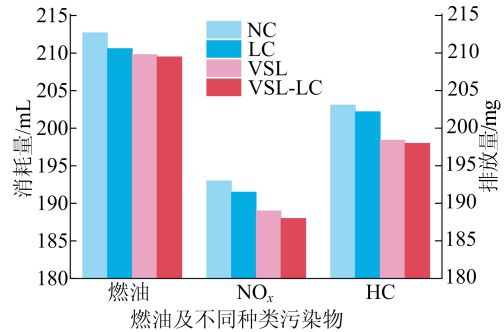


图 7 不同控制条件下的平均油耗及污染物排放量

## 6 结 论

在汽车与卡车混合行驶交通环境下,本文针对高速公路瓶颈区上游提出了一种分区域实施的协同控制策略。该策略基于 5G 边缘计算技术,通过边缘服务器快速处理交通数据,由此可以判断并且预测交通状态信息。协同控制策略分为 2 个部分,分别是基于 MPC 的动态限速策略和换道控制策略。通过在高速公路瓶颈场景的仿真分析,得到以下结论:

针对高速公路瓶颈区拥堵现象,本文提出的协同控制策略可以有效地提升瓶颈路段交通效率和安全,平滑车辆速度曲线,同时减少燃油消耗和污染物排放量。其次,相对于单独使用动态限速控制和换道控制,协同控制策略对高速公路服务水平的提高更高,尤其体现在交通安全方面。

在实际应用场景中,交通流的自由流速度应当在限速值一定范围内波动的,这一现象会对车辆的跟驰、换道微观参数产生影响,进而降低预测模型的精准度和协同控制的控制效果。本文未考虑高速公路基础设施的成本,针对不同程度的拥堵,可能存在一个最佳的控制范围,因此考虑控制成本的相关控制策略值得进一步分析。

## [参 考 文 献]

[1] 杜营营,唐秋生,李阳,等. 大型体育活动车辆需求及交通管控措施研究[J]. 重庆交通大学学报,2011,11(5):30-33.

- [2] 孙壮志,郭继孚,马海红. 北京奥运会交通规划及交通组织管理[J]. 城市交通,2008(3):11-15.
- [3] KURZHANSKIY A A, VARAIYA P. Active traffic management on road networks: a macroscopic approach [J]. Philosophical Transactions, 2010, 368(1928):4607-4626.
- [4] HADIUZZAMAN M, QIU T Z. Cell transmission model based variable speed limit control for freeways[J]. Civil Engineering, 2013, 40(1):46-56.
- [5] 陈永恒,刘鑫山,熊帅,等. 冰雪条件下快速路汇流区可变限速控制[J]. 吉林大学学报(工学版),2018,48(3):677-687.
- [6] 韩雨,郭延永,张乐,等. 消除高速公路运动波的可变限速控制方法[J]. 中国公路学报,2022,35(1):151-158.
- [7] CHEN T, WANG M, GONG S, et al. Connected and automated vehicle distributed control for on-ramp merging scenario: a virtual rotation approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 133:103451.
- [8] IORDANIDOU G R, RONCOLI C, PAPAMICHAIL I, et al. Feedback-based mainstream traffic flow control for multiple bottlenecks on motorways[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2):610-621.
- [9] ZHANG Y H, IOANNOU P A. Combined variable speed limit and lane change control for highway traffic[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(7):1812-1823.
- [10] GUO Y Q, XU H L, ZHANG Y, et al. Integrated variable speed limits and lane-changing control for freeway lane-drop bottlenecks[J]. IEEE Access, 2020, 8:54710-54721.
- [11] DI Y, ZHANG W, DING H, et al. Integrated control for mixed CAV and CV traffic flow in the merging zone of an expressway combined with variable speed limit, ramp metering and lane changing[J]. Transportation Engineering, 2023, 149(2):4022140.
- [12] 范军. 车联网中边缘计算任务卸载与资源分配算法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2022.
- [13] ZHANG Y H, IOANNOU P A. Combined variable speed limit and lane change control for truck-dominant highway segment[C]//2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Gran Canaria: IEEE, 2015:1163-1168.
- [14] DAGANZO C F. The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1994, 28(4):269-287.
- [15] DING H, ZHANG L, CHEN J, et al. MPC-based dynamic speed control of CAVs in multiple sections upstream of the bottleneck area within a mixed vehicular environment[J]. Statistical Mechanics and its Applications, 2023, 613:128542.
- [16] VAN LINT J W C, HOOGENDOORN S P, SCHREUDER M. Fastlane: new multiclass first-order traffic flow model [J]. Transportation Research Record, 2008, 2088(1):177-187.
- [17] FREJO J R D, NEZ A, DE SCHUTTER B, et al. Hybrid model predictive control for freeway traffic using discrete speed limit signals[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 46:309-325.
- [18] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory [C]//MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya: IEEE, 1995:39-43.
- [19] 李巧茹,王少航,陈亮. 高速公路合流区可变限速和换道协同控制研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2022, 41(2):35-43.
- [20] SALA M, SORIGUERA F. Lane-changing and freeway capacity: a Bayesian inference stochastic model[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35(7):719-733.
- [21] LIU L, ZHU L, YANG D. Modeling and simulation of the car-truck heterogeneous traffic flow based on a Nonlinear car-following model[J]. Applied Mathematics and Computation, 2015, 273:706-717.
- [22] KONG D, SUN L, LI J, et al. Modeling cars and trucks in the heterogeneous traffic based on car-truck combination effect using cellular automata[J]. Statistical Mechanics and its Applications, 2021, 562:125329.
- [23] FREJO J R D, CAMACHO E F. Global versus local MPC algorithms in freeway traffic control with ramp metering and variable speed limits[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(4):1556-1565.
- [24] TANG T Q, HUANG H J, SHANG H Y. Influences of the driver's bounded rationality on micro driving behavior, fuel consumption and emissions [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 41:423-432.

(责任编辑 吴 亮)