DOI:10.11918/202406005

网联环境下多主线匝道提前换道分流控制策略

朱进玉,何思雨,齐 凡,巩建刚,杨 睿,汪贵平

(长安大学 机器人与具身智能学院,西安 710064)

摘 要:为了提高双车道快速路合流区的通行能力,提出了一种网联环境下的主线提前换道分流控制策略。以空间位置为划分原则,将总控制区划分为换道调整区和合流调整区。针对换道调整区,以提高换道成功率、双车道通行能力和平均速度为目标,构建换道决策优化模型来确定最优换道车辆组合;同时,提出了三阶段协同换道控制算法,利用时距规划模型为车辆生成换道安全间距,并基于模型预测控制对车辆进行纵向距离调整,最后实施换道。实现群体车辆协同控制下安全高效的换道,在减弱对后续交通流影响的同时,为匝道车辆创造更多的合流空间。针对合流调整区,采用先入先出的规则确定车辆的合流次序,通过最优控制算法优化车辆轨迹,实现高效合流。利用 SUMO 和 Python 进行仿真验证,结果表明:所提出的控制策略在降低车辆平均延误时间和提升车辆平均速度方面始终优于其他 3 种控制算法;有效减轻了车辆在匝道合流时的速度波动,提高了驾驶舒适性;换道成功的车辆数也进一步验证主线提前换道分流控制策略的优越性。

关键词:智能交通;群体车辆;匝道合流;协同换道;阶段优化;模型预测控制

中图分类号:U495 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)07-0042-12

Advance lane changing diversion control strategy of multi-mainline ramp in intelligent and connected environment

Zhu Jinyu, He Siyu, Qi Fan, Gong Jiangang, Yang Rui, Wang Guiping

(School of Robotics and Embodied Intelligence, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To improve the capacity on the two-lane expressway merging zone, proposed a mainline advance lane changing diversion control strategy in intelligent and connected environment. Taking spatial location as the division principle, the total control zone is divided into lane changing adjustment zone and merging adjustment zone. For the lane changing adjustment zone, a lane changing decision optimization model is constructed to determine the optimal combination of lane changing vehicles with the objectives of improving the success rate of lane changing, two-lane capacity and average speed. Three-stage collaborative lane changing control algorithm is proposed, which generates the safe distance for the lane changing vehicles by using the time-distance planning model and adjusts the longitudinal distance of the vehicles based on the model predictive control, and finally implements the lane changing. Realize safe and efficient lane changing under group vehicles cooperative control, and create more merging space for ramp vehicles while weakening the impact on the subsequent traffic flow. For the merging adjustment zone, the first in first out rule is used to determine the merging order of vehicles, and the optimal control algorithm is used to optimize the vehicle trajectories to achieve efficient merging. Using SUMO and Python for simulation verification, the results show that the proposed control strategy always outperforms the other three control algorithms in reducing the average vehicle delay time and increasing the average vehicle speed. The method also effectively reduces the speed fluctuation of the vehicles when merging on the ramp and improves driving comfort. The number of vehicles lane changing successfully further verifies the superiority of the mainline advance lane changing diversion control strategy.

Keywords: intelligent transportation; group vehicles; ramp merging; cooperative lane changing; phase optimization; model predictive control

入口匝道是连接主车道与其他车道的重要节点,在合流过程中,匝道车辆汇入主车道时,容易导致合流区车辆频繁出现加减速、换道等驾驶行为,降低合流区实际通行能力,影响整个路网的通行效

收稿日期:2024-06-04;**录用日期**:2024-08-20;**网络首发日期**:2025-04-08
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250408.1317.004
基金项目:国家自然科学基金重点项目(52232015);陕西省自然科学基础研究计划(2023-JC-YB-507);咸阳市秦创原科技创新项目(2021ZDZX-GY-0009);咸阳市重点研发计划(L2022-ZDYF-GY-004)
作者简介:朱进玉(1991—),男,硕士,高级工程师
通信作者:汪贵平,gpwang@chd.edu.cn

率[1-2]。智能网联交通系统引入了多智能体的协同决策与控制技术的创新方案，通过群体车辆之间的相互通信和协作，分阶段优化车辆分布，精确控制车辆行为，为解决这一问题开辟了新途径[3-5]。

在匝道合流区，智能网联汽车（intelligent connected vehicle，ICV）协同合流控制的研究已经取得了丰富的研究成果。一些学者[6-8]通过设定合流规则来协调主车道车辆和匝道车辆进行高效合流。也有学者[9-12]以优化匝道通行效率为目标，采用考虑多种约束条件的最优控制器对车辆进行控制，从而求解得到最优合流次序。近期研究如 Karbalaieali 等[13]通过时间预测与规则驱动方法减少匝道延误。Yang 等[14]引入协同博弈理论，构建多目标成本函数以优化合流序列，同时提升行驶效率、舒适性及油耗。Gao 等[15]进一步提出针对智能网联汽车的最优轨迹优化策略，考虑换道动机与队列效应，并转化为非线性规划问题求解。然而，这些方法多聚焦于合流优化次序，忽略了多车道间交通流动态交互的复杂性，未能充分利用多车道通行能力。

为克服这一局限性，学者们转而探索合流区上游换道控制策略，并取得一定成效。Hu 等[16]在合流区上游设计了协同换道区，通过规则指导下的换道模型提前引导车辆换道，增加合流空间，减少延误。Ding 等[17]根据入口匝道车辆的交通需求建立了时间收益模型确定主车道车辆的换道行为，有效提高了合流瓶颈下游的流出率。何延全等[18]通过合流区各车道运行状态，调整合流区路面标线施划方式，制定对应协同控制策略，实现对主线分车道管控。王正武等[19]依据最小安全跟车间距与速度效益原则，引导主线外侧车道车辆提前换至内侧相邻车道，有效缓解了合流区外侧车道的拥堵状况，提升了合流区域的交通效率。Liu 等[20]运用强化学习优化车道选择，结合时间－能量最优控制策略，旨在平衡车道间流量分布，优化合流操作。

尽管国内外针对多主车道匝道合流问题的研究已有许多成果，但关于合流区上游提前换道的研究仍存在以下问题：1）早期研究在处理多主车道匝道合流问题时在合流区上游随机选取换道车辆，未充分考虑随机性对整体交通流和换道成功率的影响[16]，因此通过建立换道决策模型消除这种随机性很有必要；2）现有研究虽然也同时考虑了换道安全间距和速度约束，但是未能有效利用目标车道所有车辆之间的间隙且速度约束复杂使得能够满足换道条件的车辆很少[19]。如果能够协调目标车道所有车辆通过轻微速度调整为换道车辆生成安全间距，既降低了对速度的严格要求，也能有效减轻换道行为对交通流的负面影响。

基于以上问题，将双车道快速路合流区划分为换道调整区和合流调整区分别进行优化控制。针对换道调整区，提出了主线提前换道分流控制策略。在换道决策阶段，为了解决现有研究随机选取受控换道车辆可能影响区域内整体换道效率的问题，提出了以优化换道成功率、双主车道通行效率和车速为目标的换道决策模型，以获得最小目标成本的最优换道组合；在车辆控制阶段，为了解决在较少的约束条件下能同时满足换道安全间距和速度收益的要求，提出了基于模型预测控制（model predictive control，MPC）的三阶段协同换道控制算法，以间隙产生和在间隙产生过程中最小化干扰为控制目标，通过时距规划、纵向距离调整、换道实施 3 个阶段对群体车辆进行协同控制，减小换道过程对后续车流的影响，增大合流空间。合流调整区则采用先入先出（first in first out，FIFO）规则为外侧车道和匝道的车辆分配到达合流点的时间，结合最优控制算法规划车辆轨迹，实现安全高效的协同合流。

1　系统框架

快速路合流区在高交通需求条件下，匝道车辆难以找到合并间隙，极易造成拥堵和排队[21]。主线提前换道分流控制策略可以提前协调合流区上游主车道车辆换道，为匝道车辆创造合流空间。系统控制流程如图 1 所示。

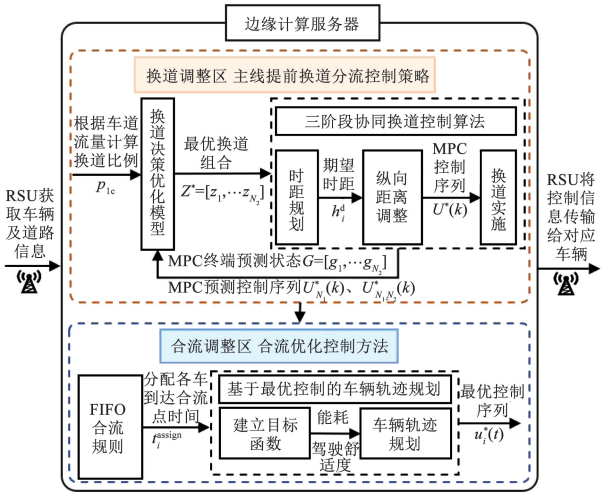


图 1　系统控制流程

Fig. 1　System control flow

在换道调整区，边缘计算服务器接收路侧单元（road side unit，RSU）获取的总控制区内所有车辆的动态信息并对其进行整合，以合流区下游车流量平均分配的原则确定换道比例后，根据换道决策优化模型确定该区域内主车道 2 具体换道的车辆，再基

于三阶段协同换道控制算法规划车辆安全时距,计算出各车控制量,并将其下发到对应车辆实现群体车辆协同控制。车辆进入合流调整区,边缘计算服务器通过分配合流调整区内车辆到达合流点的时间,优化其合流轨迹,实现安全高效的合流。

图 2 为研究场景示意。研究区域包括合流区上游部分路段(500 m)和合流区(350 m)[22]。经多次试验观察得到,在任意交通流量下车辆均在约 350 m 前能够完成换道。此外,考虑到若换道调整区的控制策略尚未完成,将延误合流调整区的控制执行时机,故将换道调整区长度适度延展至 400 m,作为安全冗余,以确保换道成功率和安全性。合流调整区长度设置为 350 m,固定合流点位置为合流区出口前 100 m 处[10]。

在智能网联环境下,对研究场景作出以下假设:1)为方便信息收发并保证控制策略的执行,假设所有车辆均是 ICV,均可通过 V2I 与边缘计算服务器进行通信,忽略通信延时,并在接收到控制命令后严格执行;2)为减小频繁换道对乘客舒适度的影响,假设在换道调整区只允许主车道 2 车辆向主车道 1 换道,且只可换道 1 次;3)在给定时间内完成换道,不考虑车辆横向控制[23]。

考虑到当前全网联环境的普及程度,若人工驾驶车辆配备信息收发终端并能遵循既定控制策略,则该策略可有效应用于混合交通场景。对于未安装此类终端的车辆,通过算法优化,从而实现对非受控车辆行为的精准预测与适应性控制。鉴于实际通信延时较小,其对纵向控制实时性及横向换道操作的时效性不构成显著影响,故在策略设计时可将此因素忽略不计。

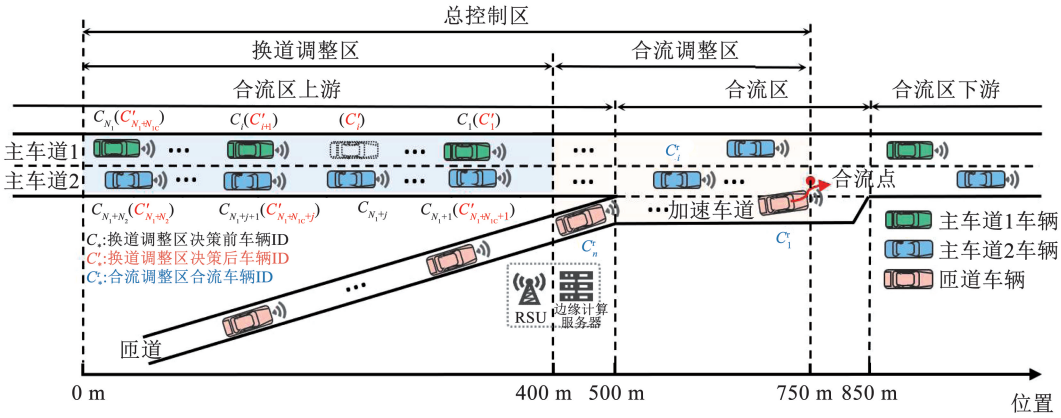


图 2 城市快速路匝道合流区

Fig. 2 Urban expressway ramp merging zone

2 主线提前换道分流控制策略

换道调整区主线提前换道的主要目的是在最小化后续交通流影响的同时,通过控制主车道群体车辆的行为,为主车道 2 增加可用空间,从而为匝道车辆的合流提供有利条件。该方法包括换道决策优化模型和三阶段协同换道控制算法。在获取到各车道的交通流量后通过求解换道决策优化模型得到主车道 2 的决策向量$\boldsymbol{Z}^* = [z_1, \cdots, z_{N_2}]_{1\times N_2}$,作为三阶段协同换道控制算法的控制依据,为各个车辆分配合适的时距,从而进行协同控制。

2.1 换道决策优化模型

换道决策优化模型是边缘计算服务器在当前的交通状况下确定换道调整区主车道 2 换道车辆的方法,其关键是:1)确定换道车辆的数量;2)确定具体换道的车辆。在进行换道决策前定义车辆 ID,假设换道调整区内主车道 1 有 N_1 辆车,车辆 ID 依次为 $C_1 \sim C_{N_1}$,主车道 2 有 N_2 辆车,车辆 ID 为 $C_{N_1+1} \sim C_{N_1+N_2}$,如图 2 黑色编码所示,则主车道的第 i 辆车表示为C_i。

根据合流区下游主车道流量平均分配的原则,计算得到主车道 2 上的换道车辆比例p_{lc}:

$$p_{\mathrm{lc}} = \begin{cases} 0, p \leqslant 0 \\ p, p > 0 \end{cases} \tag{1}$$

$$p = \frac{q_2 + q_{\mathrm{r}} - q_1}{2q_2}$$

式中:q_1, q_2, q_{r}为当前主车道 1、主车道 2 及匝道的交通流量。若 $p \leqslant 0$ 即匝道与主车道 2 合流后车流量仍然小于主车道 1 的流量,换道不会对交通流运行产生进一步的积极作用,同时额外增加车辆油耗,因此不需要引导主车道 2 的车辆换道,即换道比例 $p_{\mathrm{lc}} = 0$。主车道 2 的换道车辆数$N_{\mathrm{lc}} = p_{\mathrm{lc}} \cdot N_2$。

在明确换道比例之后,所有换道组合都确定。在保证安全的前提下,一定存在使得车辆通行效率和驾驶舒适度最高的最优换道组合,因此建立以提高换道成功率、双主车道通行能力和平均车速为目

标的换道决策优化模型：

$$\min_{\boldsymbol{Z}^*}\{(\boldsymbol{Z}-\boldsymbol{G})\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}+\|\boldsymbol{U}^-_{N_1}\|_2+\|\boldsymbol{U}^-_{N_1+N_2}\|_2-w_1\times[\sum_{n=0}^{N_p-1}\bar{v}(k+n+1\mid k)]/N_p\}\tag{2}$$

式中：第 1 项保证选取的车辆都能成功换道；第 2 项和第 3 项保证换道调整区内主车道所有车辆的通行效率；第 4 项保证在预测时域内所有车辆平均速度最大。二进制向量 $\boldsymbol{Z}=[z_1,\cdots,z_{N_2}]_{1\times N_2}$ 和 $\boldsymbol{G}=[g_1,\cdots,g_{N_2}]_{1\times N_2}$，其中 $z_j\,(j=1,\cdots,N_2)$ 代表车辆 C_{N_1+j} 是否被选择换道(1 为是，0 为否)；$\boldsymbol{G}$ 是利用三阶段协同换道控制算法通过增大预测时域得到的终端预测状态，g_j 代表着 C_j 在未来 N_p 后能否换道(1 为能，0 为不能)。若 $\boldsymbol{Z}-\boldsymbol{G}$ 为零向量，则表明所有预选换道车辆均能成功换道，反之，则至少有一辆车无法完成换道。引入常数向量 $\boldsymbol{M}=[m,\cdots,m]_{1\times N_2}$，($m\in\mathbf{R}$ 且取值较大)，当换道受阻时对整个目标函数进行惩罚；$\boldsymbol{U}^-_{N_1}$ 与 $\boldsymbol{U}^-_{N_1+N_2}$ 是控制区内主车道 1 和主车道 2 的末车在预测时域 N_p 内的负控制量，反映对后续车流的影响；$w_1\in\mathbf{R}$ 为平均预测速度的权值；$\bar{v}(k+n+1\mid k)=[\sum_{i=1}^{N_1+N_2}v_i(k+n+1\mid k)]/(N_1+N_2)$ 是 k 时刻换道调整区内所有车辆在 $k+n+1$ 时刻平均预测速度。

模型的约束条件为 $\sum_{i=1}^{N_2}z_i=N_{\mathrm{lc}}$，即通过对换道的车辆数量进行限制缩小了解空间，提高了模型的求解速度。该模型的求解可通过遍历得到决策向量 $\boldsymbol{Z}^*=[z_1,\cdots,z_{N_2}]_{1\times N_2}$。

2.2　三阶段协同换道控制算法

在对换道决策优化模型求解得到最优的换道组合即决策向量 $\boldsymbol{Z}^*=[z_1,\cdots,z_{N_2}]_{1\times N_2}$ 后对车辆 ID 进行更新，即假设主车道 2 中车辆已经换道，对所有车辆 ID 重新编号，以方便后续控制器的求解顺序。更新后的车辆 ID 如图 2 所示的红色编码，则主车道的第 i 辆车表示为 C'_i。考虑车辆的速度收益以及最优控制量的求解难度，基于时空优化配置将换道过程分为 3 个阶段：1)阶段 1，时距规划，即从整体出发利用各车间隙为主车道 1 和换道的车辆规划期望时距；2)阶段 2，纵向距离调整，即根据阶段 1 的输出为分配和未分配期望时距的车辆分别设计控制器调整车辆纵向距离；3)阶段 3，换道实施，即车道变更阶段，一旦换道车辆满足换道安全间距则实施换道。由于本文只关注车辆纵向控制，忽略车辆的横向运动，因此给定受控车辆在一定时间内完成换道[23]。整体框架如图 3 所示。

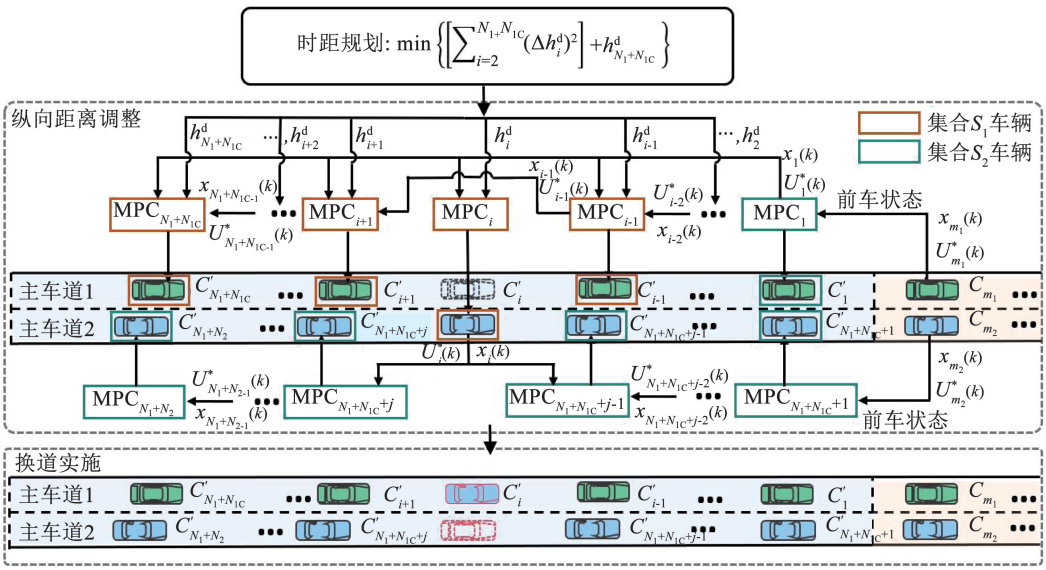


图 3　三阶段协同换道控制算法框架

Fig. 3　Framework of three-stage cooperative lane changing control algorithm

2.2.1　时距规划

如图 4 所示，首先车辆需满足安全间距以避免发生碰撞[24-25]：

$$\begin{cases}p_{i-2}(t)-p_{i-1}(t)\geqslant s^{\mathrm{f}}_{i-1}(t)+L\\ p_{i-1}(t)-p_i(t)\geqslant s^{\mathrm{lc}}_i(t)+L\\ p_i(t)-p_{i+1}(t)\geqslant s^{\mathrm{lc}}_{i+1}(t)+L\end{cases}\tag{3}$$

式中：$p_i(t)$、$v_i(t)$、$s^{\mathrm{f}}_i(t)=t^{\mathrm{f}}\cdot v_i(t)$、$s^{\mathrm{lc}}_i(t)=t^{\mathrm{lc}}\cdot v_i(t)$ 分别为 t 时刻车辆 i 的位置、速度、车辆跟随时与前车需要保持的安全间距、车辆换道时与前车需要保持的安全间距；t^{f} 和 t^{lc} 为车辆跟随和换道时的最小安全时距，考虑到换道车辆在实际场景中还需要进行横向加减速，故 $t^{\mathrm{lc}}>t^{\mathrm{f}}$；$L$ 为车身长度。

以最大化利用车辆间的间隙及对主车道 2 后续

交通流影响最小为目标,建立时距分配方案:

$$\min\left\{\left[\sum_{i=2}^{N_1+N_{\mathrm{lc}}}(\Delta h_i^{\mathrm{d}})^2\right]+h_{N_1+N_{\mathrm{lc}}}^{\mathrm{d}}\right\} \tag{4}$$

式中:$\Delta h_i^{\mathrm{d}}=h_i^0-h_i^{\mathrm{d}}$,$h_i^0=(p_1-p_i-L)/v_i$为时距规划前车辆 C_i' 相对于主车道 1 首车 C_1' 的时距,h_i^{d}为规划后的期望时距;$h_{N_1+N_{\mathrm{lc}}}^{\mathrm{d}}$是换道调整区中主车道 1 的最后一辆车相对于首车的时距,以减小在生成期望时距h_i^{d}时对后续交通流的影响,$h_{N_1+N_{\mathrm{lc}}}^{\mathrm{d}}$过大时$C'_{N_1+N_{\mathrm{lc}}}$减速,其相对位置会往后移,从而影响到后续交通流,时距规划前后对比如图 4 所示。

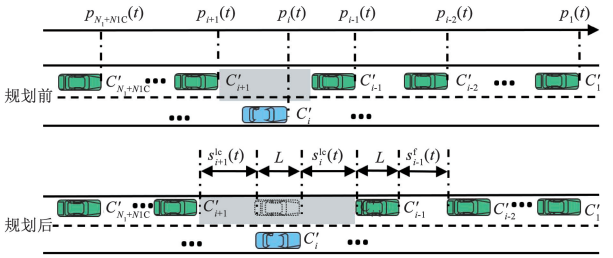


图 4 换道安全间距生成前与生成后对比

Fig. 4 Before-after comparison of lane changing safety distances generation

规划后的期望时距满足式(5)~(7)的安全约束,式(5)满足主车道 1 中车辆的安全跟随时距,式(6)满足主车道 2 需要换道的车辆与目标换道位置后车的安全换道时距,式(7)满足主车道 2 需要换道的车辆与目标换道位置前车的安全换道时距。

$$h_{i+1}^{\mathrm{d}}-h_i^{\mathrm{d}}>t^{\mathrm{f}}+t_l,C_i',C_{i+1}'\in\{C_x\mid x=1,\cdots,N_1\} \tag{5}$$

$$\begin{cases}h_{j+2}^{\mathrm{d}}-h_{j+1}^{\mathrm{d}}>t^{\mathrm{lc}}+t_l,\\ C_{j+1}'\in\{C_x\mid x=N_1+1,\cdots,N_1+N_2\}\\ C_{j+2}'\in\{C_x\mid x=1,\cdots,N_1\}\end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases}h_{j+1}^{\mathrm{d}}-h_j^{\mathrm{d}}>t^{\mathrm{lc}}+t_l,\\ C_j'\in\{C_x\mid x=1,\cdots,N_1\}\\ C_{j+1}'\in\{C_x\mid x=N_1+1,\cdots,N_1+N_2\}\end{cases} \tag{7}$$

式中:t^{f}为车辆跟随时的最小安全时距;$t_l=L/v_i$,表示车辆以速度v_i行驶时通过自身长度所用时间;t^{lc}为车辆换道时的最小安全时距。

2.2.2 纵向距离调整

在换道调整区,车辆根据是否被分配期望时距分为两个集合。集合$S_1=\{C_x'\mid x=2,\cdots,N_1+N_{\mathrm{lc}}\}$,包括主车道 1(除首车外)全部车辆及主车道 2 中换道的车辆;集合$S_2=\{C_x'\mid x=1,N_1+N_{\mathrm{lc}}+1,\cdots,N_1+N_2\}$,包括主车道 1 的首车及主车道 2 中不换道的车辆。阶段 2 在确定集合 S_1 车辆的期望时距后,利用 MPC 算法对集合 S_1 车辆进行纵向距离调整以趋近期望时距,并协调集合 S_2 的车辆,以保证换道过程车辆的安全。集合 S_1、S_2 的控制过程因其控制目标的不同而不同。

首先建立车辆的纵向运动学模型[26]:

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{b}u(k)\\ \boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(k)\end{cases} \tag{8}$$

式中:$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1&\tau\\0&1\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{b}=\begin{bmatrix}\frac{\tau^2}{2}\\ \tau\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}$;$\boldsymbol{x}(k)=[p(k),v(k)]^{\mathrm{T}}$,表示车辆在 k 时刻的位置和速度,是车辆的状态参数;$u(k)$表示车辆在 k 时刻的加速度,是车辆的控制输入参数;$\boldsymbol{y}(k)=[\boldsymbol{y}^p(k),y^v(k)]^{\mathrm{T}}$,是车辆在 k 时刻输出的位置和速度;k 为离散时间步;τ 为采样时间。

考虑车辆加减速和速度能力,需满足以下约束条件:

$$v_{\min}\leqslant v(k)\leqslant v_{\max} \tag{9}$$

$$a_{\min}\leqslant a(k)\leqslant a_{\max} \tag{10}$$

式中:$a_{\min}$、$a_{\max}$分别为最小和最大加速度,$v_{\min}$、$v_{\max}$分别为最小和最大速度。

2.2.2.1 集合 S_1 车辆控制律

对于集合 S_1 中的车辆,其控制目标是在一定时间内趋近分配的期望车头时距h_i^{d}。车辆 $C_i'\in S_1$ 的控制器MPC_i成本函数$J_i^{S_1}$为

$$\begin{aligned}&J_i^{S_1}(\boldsymbol{x}_1(k),\boldsymbol{U}_1^*(k),\boldsymbol{x}_i(k),\boldsymbol{U}_i(k),h_i^{\mathrm{d}})=\\&\sum_{n=1}^{N_p}\left[\left\|y_1^p(k+n+1\mid k)-y_i^p(k+n+1\mid k)-h_i^{\mathrm{d}}y_i^v(k+n+1\mid k)-L\right\|_{w_2}^2+\right.\\&\left.\left\|y_i^v(k+n+1\mid k)-y_1^v(k+n+1\mid k)\right\|_{w_3}^2\right]+\\&\sum_{n=0}^{N_p-1}\left[\left\|u_i(k+n+1\mid k)-u_i(k+n\mid k)\right\|_{w_4}^2\right]\end{aligned} \tag{11}$$

式中:第 1 项确保车辆可以趋近期望时距;第 2 项对车辆 C_i' 与首车 C_1' 相对速度作出惩罚以保证速度平稳性;第 3 项对控制的变化量作出惩罚确保驾驶舒适性;N_P为控制器预测时域;w_2、w_3、$w_4\in\mathbf{R}$ 分别为预测时距与期望时距差值的权值、车辆 C_i' 预测车速与首车 C'_1 预测车速差值的权值以及控制量变化的权值;$\boldsymbol{U}_1^*(k)=[u_1^*(k\mid k),\cdots,u_1^*(k+N_p-1\mid k)]$为车辆 C_1' 的控制器得到的未来 N_p时域的最优控制序列;$\boldsymbol{U}_i(k)=[u_i(k\mid k),\cdots,u_i(k+N_p-1\mid k)]$是车辆 C_i' 的控制器MPC_i的预测控制输入;$y(k+n+1\mid k)$为车辆 C_i' 在未来 $k+n-1(n=1,\cdots,N_p)$时刻的预

测位置和速度，预测模型为

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{F}\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{E}\boldsymbol{U} \tag{12}$$

式中：

$$\boldsymbol{Y}=[\boldsymbol{y}(k+1),\boldsymbol{y}(k+2),\cdots,\boldsymbol{y}(k+N_P)]^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{F}=[\boldsymbol{CA},\boldsymbol{CA}^2,\cdots,\boldsymbol{CA}^{N_P}]^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{U}=[u(k),u(k+1),\cdots,u(k+N_P-1)]^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Cb} & \boldsymbol{0} & \cdots & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{CAb} & \boldsymbol{Cb} & \cdots & \boldsymbol{0}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{CA}^{N_P-1}\boldsymbol{b} & \boldsymbol{CA}^{N_P-2}\boldsymbol{b} & \cdots & \boldsymbol{Cb}\end{bmatrix}_{2N_P\times N_P},$$

其中 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{b}$、$\boldsymbol{C}$ 为车辆运动学模型的系数矩阵。

由式(12)可知，在预测时域内的状态量和输出量都可以通过系统当前的状态量 $\boldsymbol{x}(k)$ 和控制量 $\boldsymbol{U}$ 计算得到[27]。则车辆 $C_i'\in S_1$ 的 MPC_i 控制器可以描述为式(13)的最优控制问题：

$$\min_{U_i(k)} J_i^{S_1}(\boldsymbol{x}_1(k),\boldsymbol{U}_1^*(k),\boldsymbol{x}_i(k),\boldsymbol{U}_i(k),h_i^{\mathrm{d}}) \tag{13}$$

式(13)的约束条件为式(3)、(9)、(10)、(12)，保证了车辆的安全性和舒适性。

2.2.2.2　集合 S_2 车辆控制律

集合 S_2 中的车辆主要是配合集合 S_1 的车辆安全地进行纵向距离的调整以及实施换道。引入二进制变量 D_{FC}，$D_{\mathrm{FC}}=1$ 时车辆进入跟随状态，$D_{\mathrm{FC}}=0$ 时车辆进入巡航状态。车辆 $C_j'\in S_2$ 的控制器 MPC_j 的成本函数 $J_j^{S_2}$ 为

$$\begin{aligned}&J_j^{S_2}(\boldsymbol{x}_f(k),\boldsymbol{U}_f^*(k),\boldsymbol{x}_j(k),\boldsymbol{U}_j(k))=\\&\sum_{n=1}^{N_p}D_{\mathrm{FC}}[\,\|y_f^p(k+n+1\mid k)-\\&y_j^p(k+n+1\mid k)-t^{\mathrm{f}}y_j^v(k+n+1\mid k)-L\|_{w_2}^2+\\&\|y_f^v(k+n+1\mid k)-y_j^v(k+n+1\mid k)\|_{w_3}^2]+\\&(1-D_{\mathrm{FC}})\,\|y_j^v(k+n+1\mid k)-v_{\mathrm{des}}\|_{w_5}^2+\\&\sum_{n=0}^{N_p-1}[\,\|u_j(k+n+1\mid k)-u_j(k+n\mid k)\|_{w_4}^2]\end{aligned} \tag{14}$$

式中：第 1 项保证车辆在跟随前车时所需的安全时距；第 2 项保证车辆在巡航时快速达到巡航速度且与第一项不能同时存在；第 3 项对控制的变化量作出惩罚确保驾驶舒适性；$w_5\in\mathbf{R}$ 为车辆预测车速与给定期望巡航车速 v_{des} 差值的权值；$\boldsymbol{x}_f(k)$、$\boldsymbol{U}_f^*(k)$ 为同一车道的前车状态和最优控制序列。

车辆 $C_j'\in S_2$ 的 MPC_j 控制器也可以描述为式(15)的最优控制问题：

$$\min_{\boldsymbol{U}_j(k)} J_j^{S_2}(\boldsymbol{x}_f(k),\boldsymbol{U}_f^*(k),\boldsymbol{x}_j(k),\boldsymbol{U}_j(k)) \tag{15}$$

式(15)的约束条件为式(3)、(9)、(10)、(12)以及针对主车道 2 中换道车辆的后车增加的安全约束 $y_j^p(k+n\mid k)-y_i^p(k+n\mid k)\geqslant y_i^v(k+n\mid k)t^{\mathrm{f}}+L$，$C_j\in S_2$，$C_i\in S_1$，以保证控制过程中后车与换道车辆的安全时距。

3　合流优化控制方法

合流优化控制的目的是协调来自主车道 2 和匝道两个方向的车辆安全有效地通过合流区，采用 FIFO 规则，即车辆合流次序由到合流点的距离或到达时间来决定。按照进入合流调整区的顺序，给车辆 i 依次编号为 $C_1^{\mathrm{r}},C_2^{\mathrm{r}},\cdots,C_i^{\mathrm{r}},\cdots,C_n^{\mathrm{r}}$，如图 2 蓝色编码所示。根据车辆运动学模型建立目标函数：

$$\min_{u_i}\frac{1}{2}\int_{t_i^0}^{t_i^{\mathrm{assign}}}u_i^2\,\mathrm{d}t \tag{16}$$

式中：t_i^0 为车辆 C_i^{r} 运行的初始时间；t_i^{assign} 为车辆 C_i^{r} 分配的到达合流点的时间。式(16)的约束条件为式(8)～(10)。该最优控制问题的目标是求解最优的控制输入 $u(t)$ 即车辆的加速度，进而减小车辆的能耗并在一定程度上保证车辆驾驶的舒适性[28-29]。

构造哈密顿函数：

$$H_i(t,\boldsymbol{x}_i(t),u_i(t))=\frac{1}{2}u_i^2+\lambda_i^1\cdot v_i+\lambda_i^2\cdot u_i \tag{17}$$

式中：λ_i^1、λ_i^2 为车辆 C_i^{r} 的协态变量，$\boldsymbol{x}_i(t)=[p_i(t),v_i(t)]^{\mathrm{T}}$ 为车辆 C_i^{r} 在 t 时刻的位置和速度。

根据庞特里亚金极小值原理[30]，若 $u_i^*(\cdot)$ 是使式(14)取最小值的最优解，$p_i^*(t)$、$v_i^*(t)$ 为相应的最优轨迹线，则必存在协态函数 $\lambda(\cdot)$ 满足 $\partial H_i/\partial u_i=u_i+\lambda_i^2=0$。由欧拉-拉格朗日方程可推导出：

$$\dot{\lambda}_i^1=-\frac{\partial H_i}{\partial p_i}=0 \tag{18}$$

$$\dot{\lambda}_i^2=-\frac{\partial H_i}{\partial v_i}=-\dot{\lambda}_i^1 \tag{19}$$

由式(18)、(19)可得 $\lambda_i^1=c_i^1$，$\lambda_i^2=-(c_i^1t+c_i^2)$。$c_i^1$、$c_i^2$ 为车辆 C_i^{r} 的积分常数。则 u_i 相对于时间的函数：

$$u_i^*(t)=c_i^1t+c_i^2 \tag{20}$$

将式(20)代入车辆运动学模型中，可得位置 p_i、v_i 的最优轨迹：

$$v_i^*(t)=\frac{1}{2}c_i^1t^2+c_i^2t+c_i^3 \tag{21}$$

$$p_i^*(t)=\frac{1}{6}c_i^1t^3+\frac{1}{2}c_i^2t^2+c_i^3t+c_i^4 \tag{22}$$

式中：c_i^1～c_i^4 为积分常数，可以通过车辆的初始状态 $p_i(t_i^0)$，$v_i(t_i^0)$ 和目标状态 $p_i(t_i^{\mathrm{assign}})$，$v_i(t_i^{\mathrm{assign}})$ 计算；

$p_i(t_i^0)$,$v_i(t_i^0)$分别是车辆在当前时刻t_i^0的位置、速度;$p_i(t_i^{\text{assign}})$是合流点的位置;$v_i(t_i^{\text{assign}})=v_m$是指定的合并速度;$t_i^{\text{assign}}$是所分配的到达合流点的时间。

结合式(20)~(22)得到式(23):

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{6}(t_i^0)^3 & \frac{1}{2}(t_i^0)^2 & (t_i^0) & 1 \\ \frac{1}{2}(t_i^0)^2 & (t_i^0) & 1 & 0 \\ \frac{1}{6}(t_i^{\text{assign}})^3 & \frac{1}{2}(t_i^{\text{assign}})^2 & t_i^{\text{assign}} & 1 \\ \frac{1}{2}(t_i^{\text{assign}})^2 & t_i^{\text{assign}} & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_i^1 \\ c_i^2 \\ c_i^3 \\ c_i^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_i(t_i^0) \\ v_i(t_i^0) \\ p_i(t_i^{\text{assign}}) \\ v_i(t_i^{\text{assign}}) \end{bmatrix} \tag{23}$$

对方程进行求解得到每辆车$c_i^1 \sim c_i^4$的数值解,即可得到合流调整区内车辆的最优控制序列$u_i^*(t)$。

4 实验结果

4.1 实验设置与场景说明

为验证模型的有效性,根据图 2 的匝道场景在 SUMO 仿真软件建立图 5 所示的仿真路网。实验超参数设置[9,16]如表 1 所示。

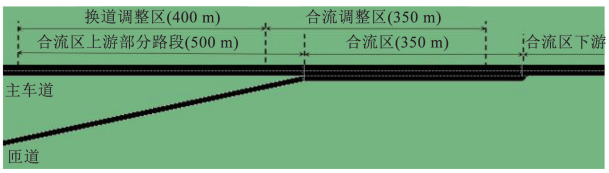


图 5 SUMO 仿真路网

Fig. 5 SUMO simulation road network

表 1 仿真实验超参数

Tab. 1 Hyper-parameters of simulation experiments

符号	物理意义	取值
$v_{\min}$	速度最小值	5 m/s
$v_{\max}$	速度最大值	19.5 m/s
$u_{\min}$	加速度最小值	-4 m/s^2
$u_{\max}$	加速度最大值	3 m/s^2
v_{des}	巡航车速	17.5 m/s
τ	采样时间	0.1 s
t^{f}	车辆跟随安全时距	0.7 s
t^{lc}	车辆换道安全时距	1.2 s
L	车身长度	5 m
N_{p}	预测时域	20 s
w_1	平均预测速度的权值	0.05
w_2	预测时距与期望时距差值的权值	10
w_3	预测车速与首车车速差值的权值	5
w_4	加速度变化量的权值	5
w_5	预测车速与巡航车速差值的权值	10

4.2 不同控制方式对比试验

为验证模型在匝道合流时的作用,考虑在匝道流量 800、1 000、1 200 veh/h,双主车道 2 400、2 800、3 200、3 600 veh/h 交通流量状况下,4 种不同控制方案对匝道合流的影响。4 种方案:1) case1,无控制;2) case2,仅 FIFO 控制;3) case3,随机选取换道车辆 + FIFO 控制;4) case4,主线提前换道分流控制策略 + FIFO 控制(本文方案)。

仿真时间设为 900 s,足以反映整个路网的通行状态。方案的有效性用平均延误时间和平均速度体现,其仿真结果如表 2 所示。表 2 中括号内数值为同等流量情况下当前策略相对于 case1 的平均延误时间的下降率和平均速度的提升率。

表 2 不同控制方案不同交通流量下车辆平均延误时间和平均速度对比

Tab. 2 Comparison of average vehicle delay and average speed under different control schemes with different traffic flows

匝道流量/(veh·h^{-1})	控制方案	不同双主车道流量的平均延误时间/s				不同双主车道流量的平均速度/(m·s^{-1})			
		2 400 veh·h^{-1}	2 800 veh·h^{-1}	3 200 veh·h^{-1}	3 600 veh·h^{-1}	2 400 veh·h^{-1}	2 800 veh·h^{-1}	3 200 veh·h^{-1}	3 600 veh·h^{-1}
800	case1	2.97	3.41	5.19	6.68	16.95	16.74	15.95	15.34
	case2	1.93(35.0%)	2.49(27.0%)	2.76(46.8%)	3.26(51.2%)	17.46(3.0%)	17.18(2.6%)	17.05(6.9%)	16.81(9.6%)
	case3	1.46(50.8%)	1.97(42.2%)	2.19(57.8%)	2.79(58.4%)	17.70(4.4%)	17.44(4.2%)	17.33(8.7%)	17.04(11.1%)
	case4	**1.21(59.2%)**	**1.54(54.8%)**	**1.77(65.7%)**	**2.03(69.6%)**	**17.83(5.2%)**	**17.66(5.5%)**	**17.54(10.0%)**	**17.41(13.5%)**
1 000	case1	3.24	4.09	6.68	9.73	16.82	16.43	15.34	14.23
	case2	2.21(31.8%)	3.03(25.9%)	5.11(23.5%)	5.37(44.8%)	17.32(3.0%)	16.92(3.0%)	15.98(4.2%)	15.87(11.5%)
	case3	1.62(50.0%)	2.09(48.9%)	2.66(60.2%)	2.99(69.3%)	17.62(4.8%)	17.38(5.8%)	17.10(11.5%)	16.94(19.0%)
	case4	**1.39(57.1%)**	**1.6(60.9%)**	**1.81(72.9%)**	**2.11(78.3%)**	**17.74(5.5%)**	**17.63(7.3%)**	**17.52(14.2%)**	**17.37(22.1%)**
1 200	case1	4.09	5.86	8.86	10.56	16.43	15.67	14.53	13.27
	case2	2.49(39.1%)	3.69(37.0%)	6.13(30.8%)	7.41(29.8%)	17.18(4.6%)	16.61(6.0%)	15.56(7.1%)	15.06(13.5%)
	case3	1.81(55.7%)	2.33(60.2%)	3.80(57.1%)	4.11(61.1%)	17.52(6.6%)	17.26(10.1%)	16.56(14.0%)	16.42(23.7%)
	case4	**1.49(63.6%)**	**1.83(68.8%)**	**2.07(76.6%)**	**2.29(78.3%)**	**17.69(7.7%)**	**17.51(11.7%)**	**17.39(19.7%)**	**17.28(30.2%)**

注:括号内的数值是同等流量情况下当前策略相对于 case1 平均延误时间的下降率及平均速度的提升率。

结果显示出,在不同交通需求水平下,case4 的性能指标始终优于 case1、case2 和 case3,表明使用该策略能有效提高合流区的通行能力。随着主线交通流量的增大,在匝道流量为 800、1 000、1 200 veh/h 时,与 case1 相比,采用 case2 方案能使车辆平均延误平均降低 40.0%,31.5%,34.2%,平均速度平均

提升 5.5%，5.4%，7.8%；采用 case3 方案能使车辆平均延误平均降低 52.3%，57.1%，58.5%，平均速度平均提升 7.1%，10.3%，13.6%；采用 case4 方案能使车辆平均延误平均降低 62.3%，67.3%，71.8%，平均速度平均提升 8.5%，12.3%，17.3%。数据表明，case4 在降低车辆平均延误和提升车辆平均速度方面均有显著优势。此外，观察表 2 可知，随着双主车道流量逐渐增加，case3、case4 的平均延误时间增加相比于 case1、case2 更加缓慢，说明 case3、case4 的控制方案更加稳定。

图 6 为匝道流量 1 200 veh/h 和主车道流量 3 600 veh/h时各车道所有车辆的时空轨迹，位置 750 m 处为合流点，颜色代表不同车辆在不同位置的速度信息。由图 6 可知：在 4 种控制方案下合流过程对远离匝道的主车道 1 无较大影响，如图 6(a)、6(d)、6(g)、6(j)所示。由于 case3 对车辆进行换道协同控制时是根据后车减速以生成换道安全间距，因此主车道 1 部分车辆会有轻微的减速现象，如图 6(g)中黑色虚线框所示。而 case4 在换道协同控制时同时考虑了换道安全间距和速度收益，协调主车道 1 所有车辆进行轻微速度调整，因此对主车道 1 车流无明显影响，如图 6(j)所示。

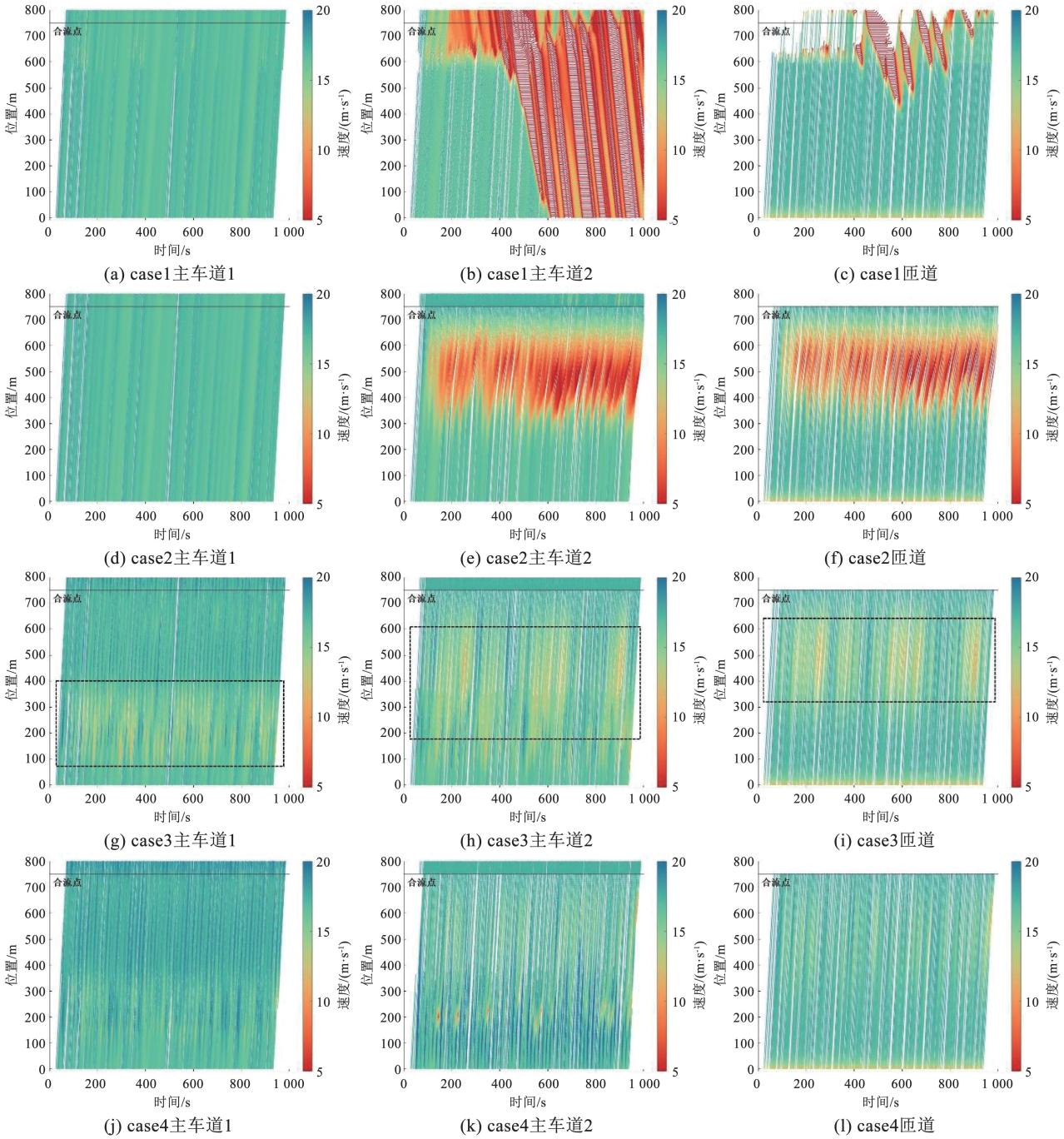


图 6　不同控制方案下各车道车辆时空轨迹

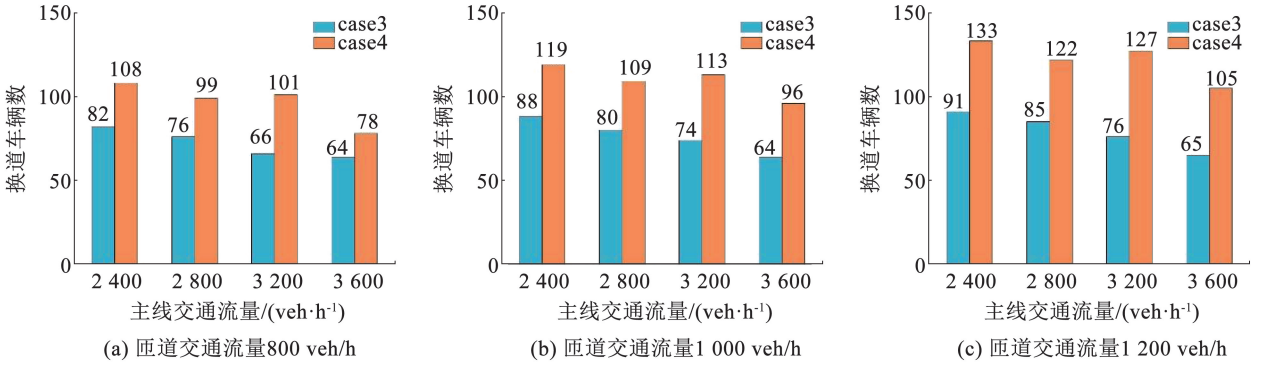
Fig. 6　Spatio-temporal trajectories of each lane vehicles under different control schemes

对于主车道 2 和匝道车辆,在高交通流量下,无控制措施时,如果对车辆不采取任何控制措施,车辆难以找到合流间隙,导致车辆停留在加速车道形成交通拥堵,如图 6(b)、6(c)所示。若仅控制车辆到达合流点的时间虽能缓解延误,但是由于交通流量高时主车道 2 的合流空间依旧有限,仍易导致拥堵,如图 6(e)、6(f)所示。case3 尝试通过提前换道控制增加合流空间,但因随机选车策略可能导致换道效率低下,引发不必要的减速波传播,如图 6(h)、6(i)黑色虚线框所示。

本文提出的控制策略(case4)在合流区上游有效实施换道控制,显著提升了合流效率,消除了拥堵现象,提高了车辆的行驶速度,如图 6(k)、6(l)所示。主车道 2 中车辆换道行为导致了部分轨迹在图中消失,系正常换道过程所致。

为了更有效的验证针对换道调整区所提出的换道策略的有效性,对比了 case3 和 case4 在不同交通流量情况下换道成功的车辆数,如图 7 所示。

由图 7 可知:在主车道和匝道流量相同的情况下,case3 和 case4 采用相同的换道比例,然而 case4 加入了换道决策优化模型后,其换道成功的车辆数总是高于 case3,且随着主车道交通流量的不断增大,在较高的交通流量下尽管所提出的换道决策优化模型最终换道的车辆数有所降低,但是相比于 case3,其换道车辆数的差值在不断升高。因此,进一步证明加入换道决策优化模型的控制方法优于其原始策略。



(a) 匝道交通流量800 veh/h (b) 匝道交通流量1 000 veh/h (c) 匝道交通流量1 200 veh/h

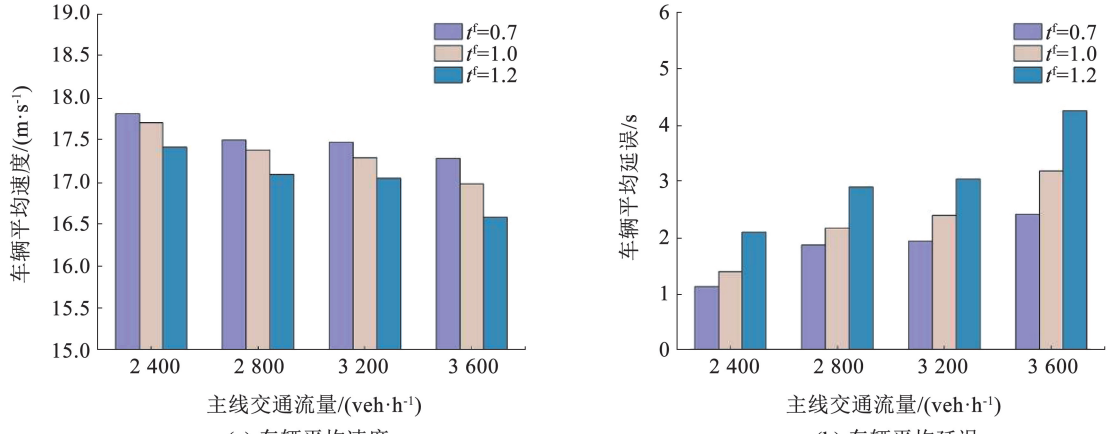
图 7 不同匝道流量下换道车辆数对比

Fig. 7 Comparison of lane changing vehicles under different ramp traffic volume

4.3 参数敏感性分析

4.3.1 车辆安全时距敏感性分析

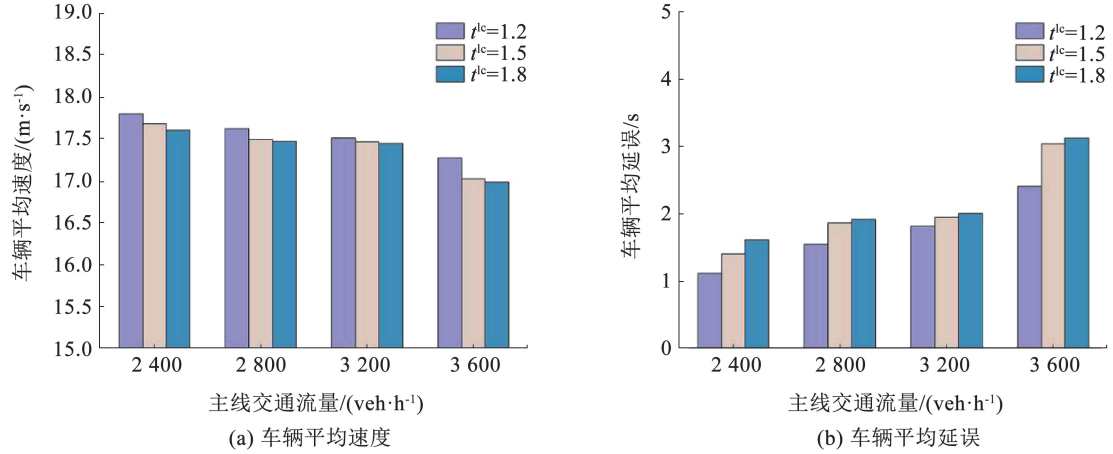
安全时距是车辆控制模型中的一个重要参数,本文将安全跟随时距分别设定为 0.7、1.0、1.2 s,将安全换道时距分别设定为 1.2、1.5、1.8 s,通过仿真分析控制策略的车辆跟随安全时距和车辆换道安全时距对车辆平均速度和平均延误的影响,结果如图 8、9 所示。



(a) 车辆平均速度 (b) 车辆平均延误

图 8 不同安全跟随时距下车辆平均速度和平均延误对比(t^{lc} = 1.2)

Fig. 8 Comparison of average vehicles speed and average delay under different safe fallowing time gap(t^{lc} = 1.2)



(a) 车辆平均速度　　(b) 车辆平均延误

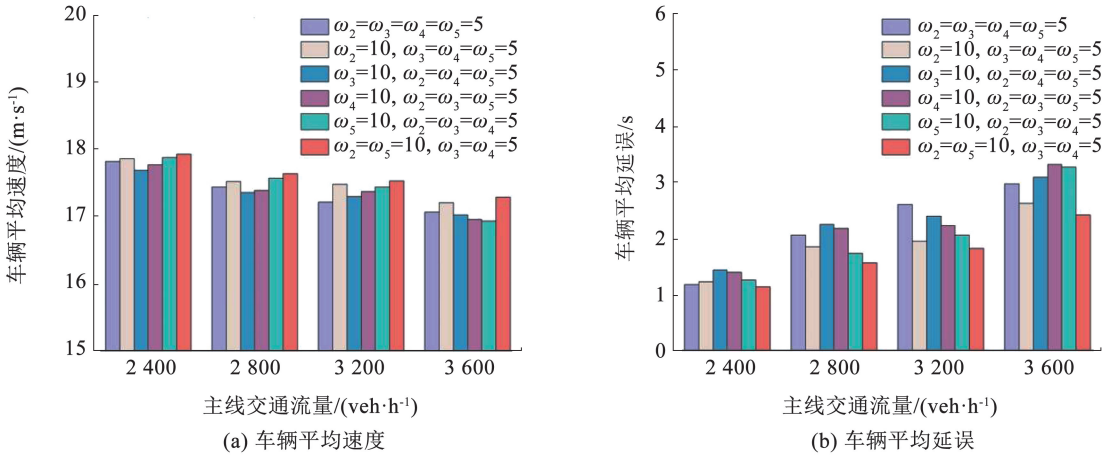
图 9　不同安全换道时距下车辆平均速度和平均延误对比(t^f = 0.7)

Fig. 9　Comparison of average vehicles speed and average delay under different safe lane changing time gap(t^f = 0.7)

由图 8、9 可知：在匝道流量为 1 000 veh/h，主车道流量不同时，随着跟随时距和换道时距增大，车辆平均速度和平均延误均升高；随着主车道交通流量的增大，平均速度和平均延误的差距越明显；增大跟随时距的数值比增大换道时距的数值，对车辆平均速度和平均延误的影响更大。因此，在满足安全的跟随和换道时距范围内，安全时距取值越小，通行效率越高。

4.3.2　不同权重敏感性分析

为了验证三阶段协同换道控制算法中目标函数的权重设置对结果的影响，本文设置了 6 种不同比例的权重，通过仿真分析目标函数的不同权重对车辆平均速度的影响，结果如图 10 所示。



(a) 车辆平均速度　　(b) 车辆平均延误

图 10　不同权重下车辆平均速度和平均延误对比

Fig. 10　Comparison of average vehicles speed and average delay under different weights

由图 10 可知：在匝道流量为 1 000 veh/h 时，控制其他参数不变，分别增大ω_2、ω_3、ω_4、ω_5的权重，增大ω_2和ω_5的权重获得更高的平均速度和更低的平均延误；相比于比权重比例平均分配时，增大ω_3和ω_4的权重使平均速度和平均延误降低，说明控制效果变差；同时增大ω_2和ω_5，比增大ω_3和ω_4的权重控制更稳定。因此，预测时距与期望时距差值的权值和预测车速与巡航车速差值的权值对控制策略有较大影响。

5　结　论

针对双车道快速路合流区通行效率低，易发生交通拥堵的问题，在合流区上游的换道调整区提出了一种主线提前换道分流控制策略，包括以提高换道成功率、车辆通行效率和平均速度为目标的换道决策优化模型和基于模型预测控制的三阶段协同换道控制算法。主要研究结论如下：

1）数值模拟验证分析表明相比于无控制自然合流、仅 FIFO 控制的合流、随机选取换道车辆 +

FIFO 控制的合流,提出的策略在车辆平均速度和平均延误时间等方面均有不同程度的改善。在车流量达到饱和的前提下,交通需求水平越高,该策略的优势越明显。其次统计出 case3 和 case4 下换道调整区内车辆换道成功的数量,提高了换道成功率,减小了因换道失败而造成的交通延误。

2)对高交通需求条件下的车辆时空轨迹进行可视化,结果显示出主线提前换道分流控制策略效果最优,有效缓解了合流区的拥堵问题,在高交通需求条件下的情况下仍可以维持较高的行驶速度,且速度变化相对平稳,体现了其驾驶舒适性。

3)主线提前换道分流控制策略对于解决高交通需求条件下的交通拥堵问题效果明显。在未来的智慧公路中具有广阔的应用前景,同时对于智能网联汽车编队的换道控制具有参考价值。未来将基于通信延时的时变随机特性,设计考虑队列车辆信息交互延迟的控制算法,通过精细化建模与分析,以期提出更加鲁棒的控制策略。同时加入车辆的横向控制,优化车辆运行轨迹,以提高车辆的驾驶舒适性。

参考文献

[1] Guo Jingqiu, Cheng Senlin, Liu Yangzexi. Merging and diverging impact on mixed traffic of regular and autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(3): 1639. DOI: 10.1109/TITS.2020.2974291

[2] 郭延永, 刘佩, 袁泉, 等. 网联自动驾驶车辆道路交通安全研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(5): 19
Guo Yanyong, Liu Pei, Yuan Quan, et al. Review on research of road traffic safety of connected and automatedvehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(5): 19. DOI: 10.19818/j.cnki.1671.2023.05.002

[3] Rios-Torres J, Malikopoulos A A. A survey on the coordination of connected and automated vehicles at intersections and merging at highway on-ramps [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(5): 1066. DOI: 10.1109/TITS.2016.2600504

[4] Dey K C, Rayamajhi A, Chowdhury M, et al. Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network-performance evaluation [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 68: 168. DOI: 10.1016/j.trc.2016.03.008

[5] 丁飞, 张楠, 李升波, 等. 智能网联车路云协同系统架构与关键技术研究综述[J]. 自动化学报, 2022, 48(12): 2863
Ding Fei, Zhang Nan, Li Shengbo, et al. A survey of architecture and key technologies of intelligent connected vehicle-road-cloud cooperationsystem[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(12): 2863. DOI: 10.16383/j.aas.c211108

[6] Xu Huile, Feng Shuo, Zhang Yi, et al. A grouping-based cooperative driving strategy for CAVs merging problems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 6125. DOI: 10.1109/TVT.2019.2910987

[7] 高志军, 王江锋, 陈磊, 等. 基于智能网联车辆编队的高速公路协同合流控制方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 335
Gao Zhijun, Wang Jiangfeng, Chen Lei, et al. Cooperative merging control on freeway based on platooning of connected and automated vehicles[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(2): 335

[8] Karbalaieali S, Osman O A, Ishak S. A dynamic adaptive algorithm for merging into platoons in connected automated environments[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(10): 4111. DOI: 10.1109/TITS.2019.2938728

[9] 朱少杰, 王文格. 快速路匝道入口智能网联车协同合并控制研究[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(9): 2755
Zhu Shaojie, Wang Wenge. Cooperative merging control of connected and automated vehicles at freeway on-ramp entrance[J]. Application Research of Computers, 2023, 40(9): 2755. DOI: 10.19734/j.issn.1001-3695.2023.01.0024

[10] Tang Zhixian, Zhu Hong, Zhang Xin, et al. A novel hierarchical cooperative merging control model of connected and automated vehicles featuring flexible merging positions in system optimization [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 138: 103650. DOI:10.1016/j.trc.2022.103650

[11] Yang Lan, Zhan Jiahao, Shang Wenlong, et al. Multi-lane coordinated control strategy of connected and automated vehicles for on-ramp merging area based on cooperative game [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(11): 13448. DOI: 10.1109/TITS.2023.3275055

[12] Gao Zhibo, Wy Zhizhou, Hao Wei, et al. Optimal trajectory planning of connected and automated vehicles at on-ramp merging area[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 12675. DOI: 10.1109/TITS.2021.3116666

[13] Karbalaieali S, Osman O A, Ishak S. Adynamic adaptive algorithm for merging into platoons in connected automated environments[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(10): 4111. DOI: 10.1109/TITS.2019.2938728

[14] Yang Lan, Zhan Jiahao, Shang Wenlong, et al. Multi-lane coordinated control strategy of connected and automated vehicles for on-ramp merging area based on cooperative game [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(11): 13448. DOI: 10.1109/TITS.2023.3275055

[15] Gao Zhibo, Wu Zhizhou, Hao Wei, et al. Optimal trajectory planning of connected and automated vehicles at on-ramp merging area[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 12675. DOI: 10.1109/TITS.2021.3116666

[16] Hu Xiangwang, Sun Jian. Trajectory optimization of connected and autonomous vehicles at a multilane freeway mergingarea [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 101: 111. DOI: 10.1016/j.trc.2019.02.016

[17] Ding Heng, Di Yunran, Zheng Xiaoyan, et al. Automated cooperative control of multilane freeway merging areas in connected and autonomous vehicle environments [J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2021, 9 (1): 437. DOI: 10.1080/21680566.2021.1887774

[18] 何廷全, 宋浪, 俞山川. 高速公路主线提前换道与入口匝道协同控制研究[J]. 公路, 2023, 68(3): 288

He Yanquan, Song Lang, Yu Shanchuan. Research on the coordinated control of early lane change and entrance ramp on the main line of highways[J]. Highway, 2023, 68(3): 288

[19]王正武，潘军良，陈涛，等. 单向三车道高速公路合流区智能网联车辆协同汇入控制[J]. 交通运输工程学报，2023，23(6)：270
Wang Zhengwu, Pan Junliang, Chen Tao, et al. Cooperative merging control of connected and automated vehicles in merging area for one-way three-lane free highway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 270. DOI: 10.19818/j.cnki.1671－1637.2023.06.018

[20]Liu Jinqiang, Zhao Wanzhong, Xu Can. An efficient on-ramp merging strategy for connected and automated vehicles in multi-lane traffic[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(6): 5056. DOI: 10.1109/TITS.2020.3046643

[21]刘志强，韩静文，倪捷. 智能网联环境下的多车协同换道策略研究[J]. 汽车工程，2020，42(3)：299
Liu Zhiqiang, Han Jingwen, Ni Jie. Study on multi-vehicle coordinated lane change strategy under network conditions[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(3): 299. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.03.004

[22]莫阳. 城市快速路匝道及变速车道控制参数研究[J]. 公路交通科技，2016，33(5)：111
Mo Yang. Study on parameters for ramps and speed-change lane of urban expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(5): 111

[23]Zhang Hanyu, Du Lili, Shen Jinglai, et al. Hybrid MPC system for platoon based cooperative lane change control using machine learning aided distributed optimization[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2022, 159: 104. DOI: 10.1016/j.trb.2021.10.006

[24]Phan T T, Le L B, Ngoduy D. A cooperative space distribution method for autonomous vehicles at a lane-drop bottleneck on multi-lane freeways[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(4): 3710. DOI: 10.1109/TITS.2020.3040431

[25]赵祥模，赵玉钰，景首才，等. 面向自动驾驶测试的危险变道场景泛化生成[J]. 自动化学报，2023，49(10)：2211
Zhao Xiangmo, Zhao Yuyu, Jing Shoucai, et al. Generalization generation of hazardous lane-changing scenarios for automated vehicle testing[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(10): 2211. DOI: 10.16383/j.aas.c220772

[26]Thorman S, Schirrer A, Jakubek S. Safe and efficient cooperative platooning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(2): 1368. DOI: 10.1109/TITS.2020.3024950

[27]Chen N, Van Arem B, Wang M. Hierarchical optimal maneuver planning and trajectory control at on-ramps with multiple mainstream lanes[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(10): 18889. DOI: 10.1109/TITS.2022.3167727

[28]Rios-Torres J, Malikopoulos A A. Automated and cooperative vehicle merging at highway on-ramps[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(4): 780. DOI: 10.1109/TITS.2016.2587582

[29]Zhou Y, Ahn S, Chitturi M, et al. Rolling horizon stochastic optimal control strategy for ACC and CACC under uncertainty[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 83: 61. DOI: 10.1016/j.trc.2017.07.011

[30]王秋玲，赵祥模，徐志刚，等. 特种 CAV 优先的集中式匝道合流协同控制方法[J]. 交通运输工程学报，2022，22(1)：263
Wang Qiuling, Zhao Xiangmo, Xu Zhigang, et al. Centralized ramp confluence cooperative control method with special connected and automated vehicle priority[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 263. DOI: 10.19818/j.cnki.1671－1637.2022.01.022