

# 快速路互通交织区超车换道行为控制方法

马健霄, 怀 硕, 赵 顼, 李铭浩, 陈雨欣, 赵思雨

(南京林业大学 汽车与交通工程学院, 南京 210037)

**摘 要:** 本文聚焦快速路互通交织区的超车换道行为, 旨在分析超车换道车辆对换道空间的选择特征并探索超车换道行为的控制方法。通过实时的轨迹数据提取, 分析超车换道车辆不同阶段的间隙选择和换道点选择的差异性。依托机器学习的方法对换道持续时间和换道空间选择变化进行了预测, 并基于预测结果建立了超车换道行为速度优化控制模型, 利用元胞自动机仿真环境对模型控制效果进行了检验。结果表明: 控制模型下车辆选择“优”“良”等级换道间隙和最佳换道点位置的比例相比实际值最高可分别提升 18.86 和 6.89 个百分点。同时, 控制模型下交织区三条车道的运行速度可分别提升 6.91%、1.71% 和 3.85%, 且各车道的时空利用率也具有更好的均衡性。

**关键词:** 互通交织区; 超车换道行为; 换道间隙; 元胞自动机; 速度优化控制

**中图分类号:** U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)02-0431-12

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240783

## Behavior control method of overtaking lane-changing in expressway interchanging weaving area

MA Jian-xiao, HUAI Shuo, ZHAO Yi, LI Ming-hao, CHEN Yu-xin, ZHAO Si-yu

(College of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** This study focuses on the overtaking lane-changing behavior in urban expressway interchange weaving areas, aiming to analyze the lane-change space selection characteristics of overtaking vehicles and explore control methods for overtaking lane-change behavior. Utilizing real-time trajectory data, this study analyzes the differences in gap selection and lane-changing point selection across various stages of the overtaking process. Machine learning methods were used to predict lane-change duration and lane-change space selection changes. Based on the prediction results, a speed optimization control model for overtaking lane-change behavior was established. The control effect of the model was then tested using a cellular automata simulation environment. The results show that under the control model, the proportion of vehicles selecting "excellent" and "good" grade lane-change gaps and the optimal lane-change point position increased by up to 18.86 and 6.89 percentage points compared to actual values. Additionally, the operating speeds of the three lanes in the weaving area increased by 6.91%, 1.71%, and 3.85%, respectively, and the spatiotemporal utilization rates of the lanes also exhibited better balance.

收稿日期: 2024-07-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62303228); 教育部人文社会科学研究项目(23YJC630253).

作者简介: 马健霄(1966-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 交通安全技术, 车路协同技术. E-mail: majx@njfu.edu.cn

通信作者: 赵顼(1989-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 交通行为建模, 交通安全. E-mail: zhaoyi207@126.com

**Key words:** interchange weaving area; overtaking lane-change behavior; lane-change gap; cellular automata; speed optimization control

## 0 引言

城市快速路互通交织区作为连接城区各组团的交通动脉,承担大量城市交通流的汇集与分流任务。由于其独特的道路条件和交通流特性,快速路交织区交通流存在大量集中性换道行为,导致交织区交通拥堵频发,通行能力下降。此现象促使部分具有刚性换道需求的驾驶人产生超车换道行为(Overtaking lane-changing, OLC)<sup>[1]</sup>。超车换道车辆具有从主道换至辅道的换道需求,但在驶入交织区段前没有换道至与辅道相邻的主道车道,而是继续向前行驶,利用交织区下游空间进行换道。由于在此过程中换道车辆往往需要加速超越右侧行驶速度较低的车辆,因此,将此类换道行为定义为超车换道行为。根据相关研究,车辆换道导致的交通事故数量约占事故总数的 27%<sup>[2]</sup>,而快速路互通交织区的超车换道车辆占总刚性换道车辆的比例分别约为 13%、22%。

目前,有关交织区的研究对象以高速公路交织区和城市高架交织区为主,针对交织区几何特性<sup>[3]</sup>、交通安全特性<sup>[4]</sup>、交通流运行特性<sup>[5]</sup>等方面的分析研究已取得丰富成果,例如张卫华等<sup>[6]</sup>通过对混合交通流条件下的交织区通行能力、交通基本图的深入探究,分析了混合驾驶环境下的交织区交通流基本特性;Wang 等<sup>[7]</sup>对交织区进行分区段独立研究,提出了高速公路交织段碰撞的多级贝叶斯逻辑回归模型,分析了不同区段的碰撞风险差异;谢济铭<sup>[8]</sup>基于换道 TTC 模型分析了车辆在不同位置的换道行为差异,引入超参数优化机器学习方法构建了交织区换道风险识别与预警模型。

换道行为作为交织区安全相关研究的主要方向,其研究内容主要关注换道行为建模、换道行为特征分析等方面。例如彭博等<sup>[9]</sup>划分了交织区上下游各分区,考虑了车辆换道速度差、间距及换道安全风险建立了交织区元胞自动机多级换道决策模型;Zhao 等<sup>[10]</sup>利用深度神经网络回归模型对快速路互通交织区的换道行为进行建模,阐述了换道行为特征的统计分布;Li 等<sup>[11]</sup>通过构建快速路互通交织区元胞自动机仿真模型,以交织区交通负荷和超车换道车辆占比为自变量,分析量化了

超车换道行为对交织区运行状态的影响。

对于车辆换道的控制研究包括车辆轨迹规划及元胞自动机仿真<sup>[12]</sup>,例如 Zhou 等<sup>[13]</sup>利用因果推理构建了车辆换道过程中的速度控制框架;Yang 等<sup>[14]</sup>提出了一种动态换道轨迹规划模型,结合了防侧翻和碰撞算法,保证单车的安全换道;吕伟等<sup>[15]</sup>改进了 KKW (Kerner-Klenov-Wolf) 模型,考虑自由和强制换道规则,分析了集中性换道对高速公路运行的影响。随着智能网联技术的发展,车路协同环境为换道控制提供了新的思路<sup>[16]</sup>;黄玲等<sup>[17]</sup>考虑换道过程中的风险变化,提出了一种基于车-车通信的动态自主换道策略;Luo 等<sup>[18]</sup>引入车辆换道过程中的动态风险模型,建立了车联网环境下自主车辆换道行为的博弈策略模型;曲大义等<sup>[19]</sup>通过长短期记忆人工神经网络(LSTM)研究人工驾驶车辆在换道过程中与周边车辆的相互作用,构建了基于 LSTM 的无人驾驶车辆换道行为模型。

综上所述,城市快速路互通交织区的超车换道行为客观存在且对交织区车辆有序运行影响显著,但相关研究相对匮乏,针对超车换道行为的控制方法研究有待进一步发掘。本文将基于快速互通交织区实地采集数据,从换道空间角度对换道间隙选择、换道点位置选择特征进行分析,利用机器学习方法对换道持续时间和换道间隙变化进行预测,并结合所制订的最佳换道点位置选择方案,建立超车换道速度优化控制模型,进而提出互通交织区超车换道控制方法。最终,通过快速路互通交织区元胞自动机仿真模型对控制效果进行了检验。

## 1 快速路互通交织区交通流数据采集

视频采集工作在天气晴朗的工作日 7:30~8:30 的早高峰时段进行,使用无人机对南京市城东快速路九华山-西安门隧道间长度为 120 m 的交织区段进行视频拍摄,其中主道为三车道,辅道为两车道。数据采集点实景图如图 1 所示。

视频采集完成后,车辆的轨迹数据由中佛罗里达大学 SST 实验室开发的自动道路冲突识别系统(Automated roadway conflicts identification



图1 快速路互通交织区实地拍摄图

Fig. 1 Field shooting of the expressway interchange weaving area

system, ARCIS)提取<sup>[20]</sup>。经图像识别处理后,初步获取了包括车辆长度、宽度以及车头、车尾、车辆中心的像素点坐标。随后利用单应性变换将像素点坐标变换得到车辆位置、速度以及加速度等基本信息。

经数据处理后,共采集城市快速路互通交织区的有效车辆8 110辆,其中主线常规刚性换道车辆为2 770辆,辅道常规刚性换道车辆为1 115辆、主线超车换道车辆为440辆。在快速路互通

交织区的主线刚性换道车辆中,超车换道车辆占比28%。

## 2 交织区超车换道行为特征分析

对于城市快速路互通交织区的换道行为,Li等<sup>[11]</sup>对交织区超车换道行为的换道点分布特征及其对交织区时空利用率、通行效率的影响进行了量化分析。为进一步探索超车换道行为对交织区运行状态的影响,本章从更微观的层面,针对超车换道过程中的换道间隙选择、换道点选择特征进行分析。

当车辆驶离车道中心线后,若不再有与换道方向相反的速度方向,则从原车道中心线移动至相邻车道中心线视作完整换道过程<sup>[21]</sup>。为细化超车换道行为对其他车辆的影响,对超车换道过程进行划分。如图2所示,将主道2换至主道1称为超车换道第一阶段(蓝色线条表示),将主道1换至辅道1称为超车换道第二阶段(红色线条表示),彩图参见电子版,以下同。

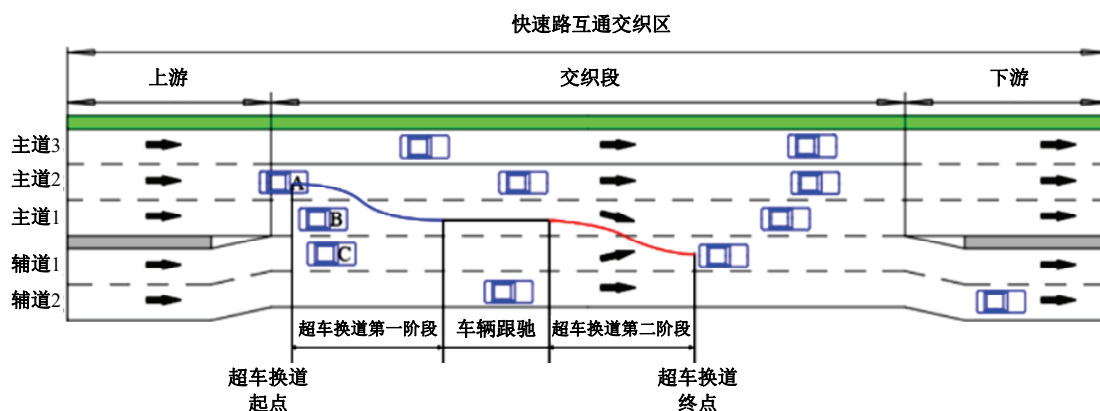


图2 快速路互通交织区及超车换道示意图

Fig. 2 Schematic diagram of weaving area and overtaking lane changing

### 2.1 换道间隙选择特征分析

车辆在换道起始点向目标车道行进,在目标车道前方以及后方均不少于2辆车的情况下,认为超车换道车辆存在图3所示的RF、R以及RB 3种换道间隙选择。研究对车辆在换道起始点时目标车道的4辆车进行标记,记录3种间隙的大小以及车辆最终的间隙选择结果,对比分析交织区超

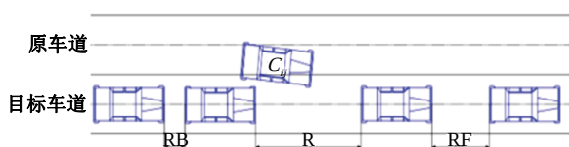


图3 车辆换道间隙选择示意图

Fig. 3 Selection of lane-changing gap of a vehicle

车换道行为不同阶段的换道间隙选择特征。

经统计,在超车换道第一阶段,26.58%的车辆不存在RB数值,2.53%的车辆不存在RF与R数值,31.65%的车辆不存在R与RB数值。其余车辆为RF、R、RB均存在。在超车换道第二阶段,14.12%的车辆不存在RB数值,31.76%的车辆不存在RF与R数值,8.24%的车辆不存在R与RB数值。其余车辆为RF、R、RB均存在。在RF、R以及RB 3种空间均存在的车辆中,50%的车辆 $R > RF$ 辆,占比70%的车辆 $R > RB$ ,43.33%的车辆R为3个数值中的最大值,23.33%的车辆R为3个数值中的最小值。整体数据统计情况如

表 1 所示。

为进一步分析车辆换道间隙选择的差异,本文对车辆换道间隙选择结果进行了分类。从换道间隙大小的角度出发,若车辆选择了 3 种间隙中的最大值,则认为是最优的换道间隙选择;从车辆换道位置角度出发,若车辆选择最前方的换道间隙,认为车辆在换道过程中超越右侧慢行车辆的目标最明确,认为是最优的换道间隙选择。

将上述两种判断方式进行结合,本文给出了车辆换道间隙选择评价指标,如表 2 所示。

图 4 为超车换道两阶段车辆对换道间隙选择结果评价的雷达图,从图中可以看出,基于当前的评价标准,车辆在超车换道第二阶段的换道间隙

表 1 超车换道间隙选择统计数据

|        | lane-changing vehicle |       |       |          |       |       |
|--------|-----------------------|-------|-------|----------|-------|-------|
|        | OLC 第一阶段              |       |       | OLC 第二阶段 |       |       |
|        | RF                    | R     | RB    | RF       | R     | RB    |
| 1/4 位数 | 22.08                 | 20    | 13.92 | 17.51    | 25.25 | 14.44 |
| 中位数    | 28.90                 | 28.84 | 16.42 | 29.70    | 38.38 | 22.32 |
| 3/4 位数 | 54.40                 | 72.28 | 28.45 | 71.03    | 54.61 | 48.02 |

表 2 车辆换道间隙选择评级表

| Rating table for vehicle lane-changing gap selection |    |   |    |
|------------------------------------------------------|----|---|----|
| 级别                                                   | RB | R | RF |
| 最大                                                   | 良  | 优 | 优  |
| 中等                                                   | 中  | 中 | 良  |
| 最小                                                   | 差  | 差 | 差  |

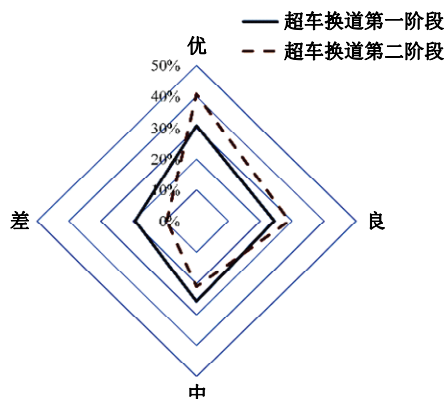


图 4 超车换道间隙选择评价图

Fig. 4 Overtaking lane-changing gap selection evaluation diagram

选择明显优于第一阶段。其中,换道第一阶段时选择评级为“优”或“良”的间隙仅占比 55.13%,在换道第二阶段时选择评级为“优”或“良”的间隙占比 69.77%。而超车换道第一阶段选择“差”等级间隙进行换道的车辆占比较高,超车换道行为在换道间隙的选择上仍有较大的优化空间。

## 2.2 换道点位置选择特征分析

在超车换道车辆选择换道间隙后,车辆还将在目标换道间隙中确定最合适的换道点位置。将车辆换道起始点作为对目标车道信息的统计点,对实际车辆行驶数据换道点位置选择以及换道间隙大小进行了统计。如图 5 所示,按照前车到后车的位置以 0~100% 划分换道点位置,车辆换道点位置选择信息统计见表 3。

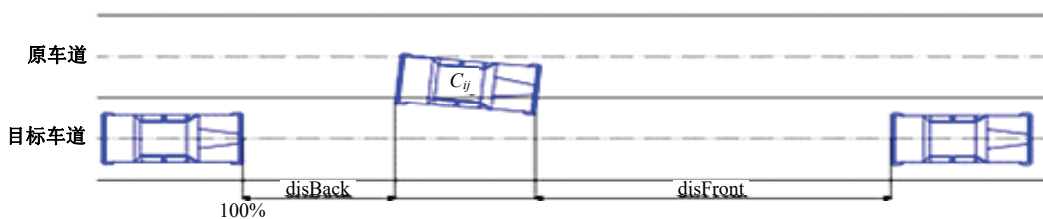


图 5 车辆换道点位置选择百分比示意图

Fig. 5 Percentage of lane change point location selection

表 3 车辆换道点选择(位置百分比)统计数据

| Statistical data of vehicle lane change point selection (percentage of location) |        |       |        |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|--------|
| 换道过程                                                                             | 1/4 位数 | 中位数   | 3/4 位数 |
| OLC 第一阶段                                                                         | 41.08  | 60.04 | 88.15  |
| OLC 第二阶段                                                                         | 41.66  | 51.88 | 66.09  |

对实际的城市快速路互通交织区超车换道车辆与目标车道前车车辆 TTC (Time to collision) 以及目标车道后方车辆与超车换道车辆 TTC 进

行计算,以碰撞风险率( $1/TTC$ )作为指标对不同换道间隙选择的碰撞风险进行分析,其分布图如图 6 所示。

由图 6 可见,超车换道点位置选择在 50% 点处,当前车辆与前后车的碰撞风险处于安全阈值内( $1/TTC < 0.2$ )的频率较高,即此处的碰撞风险率最低。出于安全考虑,认为超车换道车辆与目标车道前后车间隙中的换道点位置在为最佳换

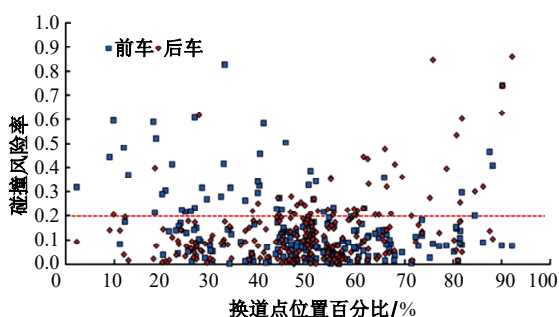


图6 超车换道点位置与碰撞风险分布图

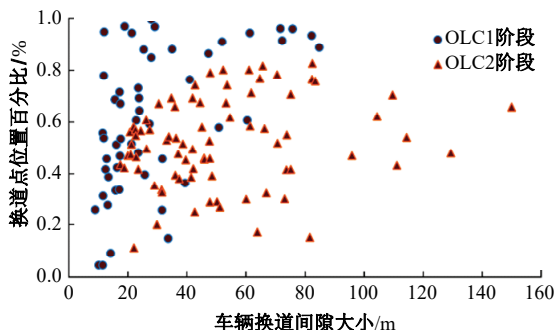
Fig. 6 Overtaking lane-changing point location selection and crash risk distribution

道点。图7为车辆所处交织区位置与车辆换道点位置百分比的关系散点图以及车辆换道间隙大小与车辆换道点位置百分比的关系散点图。

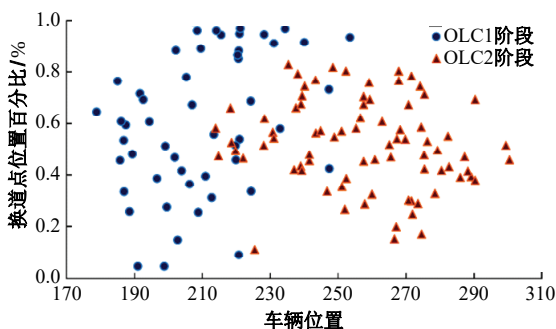
图7(a)可以看出,车辆在超车换道第一阶段时对换道间隙中的换道点选择相对离散,在超车换道第二阶段时相对集中,有超过50%的车辆换道点位置选择在40%~70%的空间内。

从图7(b)可以看出,车辆在超车换道第二阶段时选择的间隙大小整体明显大于第一阶段;第一次换道时的车辆换道点位置与换道间隙大小整体呈正比关系,而第二次换道两者无明显规律。

针对以上情况,对超车换道点的分布进行正



(a) 交织区所处位置-换道点位置选择百分比散点图



(b) 车辆换道间隙大小-换道点位置选择百分比散点图

图7 车辆换道点位置选择百分比散点图

Fig. 7 Scatterplot of lane change point location selection percentage

态统计检验,统计直方图如图8所示。结果显示,超车换道第一、第二阶段的车辆换道点选择数据经KS检验均符合正态分布( $0.052 > 0.05$ 、 $0.200 > 0.05$ )。在前文中已经提及,从车辆安全的角度出发,认为车辆与前后车的换道点控制在换道间隙中50%的位置为最佳点,同理可得最优情况下车辆换道点选择统计应在符合正态分布的情况下拥有更高的峰值以及更小的偏度。

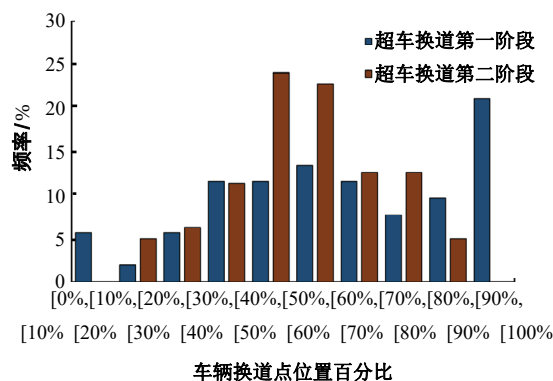


图8 车辆换道点位置选择统计直方图

Fig. 8 Statistical histogram of vehicle lane-changing point selection

### 3 基于机器学习的超车换道行为控制方法

通过对车辆超车换道过程中的空间选择情况进行分析,换道间隙及换道点位置选择都存在一定的优化空间,采用机器学习的方法对超车换道空间选择进行预测。对车辆换道持续时间内可能出现的车辆换道间隙大小进行预测,根据表2约定对预测结果进行评级,按照“优-良-中-差”的优先顺序对换道间隙选择进行引导,以间隙50%位置作为最佳换道点对车辆的速度进行诱导控制,使其能够在最优空间内选择最优位置进行超车换道。

#### 3.1 基于随机森林的换道时间预测

对于超车换道持续时间,本研究分别采用随机森林与XGBoost两种回归预测的方法,以表4为输入量,车辆换道持续时间为输出量,并以平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)及均方根误差(Root mean square error, RMSE)作为预测性能评价指标对两种预测方法进行比较。

通过比对,发现随机森林模型(MAE=28.55, RMSE=42.92)的预测效果相比XGBoost模型(MAE=28.41, RMSE=44.71)更

表 4 车辆属性设置名称对照表(部分)  
Table 4 Vehicle parameter settings name comparison table(part)

| 参 数           | 含 义        |
|---------------|------------|
| $m$           | 车辆纵向位置     |
| $n$           | 车辆横向位置     |
| disFront      | 与前方车辆距离    |
| disRightFront | 与右前方车辆纵向距离 |
| disRightBack  | 与右后方车辆纵向距离 |
| vFront        | 前方车辆速度     |
| vRightFront   | 右前方车辆速度    |
| vRightBack    | 右后方车辆速度    |
| $v$           | 车辆当前速度     |
| $a$           | 车辆加速度      |
| disBack       | 与后方车辆距离    |
| disLeftFront  | 与左前方车辆纵向距离 |
| disLeftBack   | 与左后方车辆纵向距离 |
| vBack         | 后方车辆速度     |
| vLeftFront    | 左前方车辆速度    |
| vLeftBack     | 左后方车辆速度    |

优,因此,选用随机森林对车辆超车换道持续时间进行预测,其参数设置如表 5 所示。

为验证随机森林对车辆换道持续时间预测的准确性,利用本文第 2 节中实际采集数据与预测数据进行对比,结果如图 9 所示。从折线图中可

表 5 随机森林参数设置表  
Table 5 Random forest parameter setting table

| 参 数               | 取 值      |
|-------------------|----------|
| n_estimators      | 200      |
| max_depth         | 10       |
| min_samples_split | 2        |
| min_samples_leaf  | 1        |
| max_features      | log2     |
| random_state      | 1        |
| class_weight      | balanced |

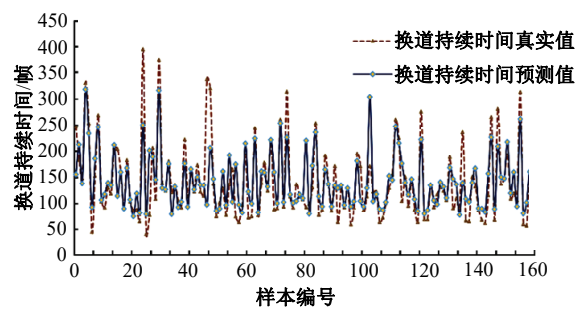


图 9 部分车辆换道持续时间随机森林预测结果  
Fig. 9 Results of random forest prediction of vehicle lane-changing duration

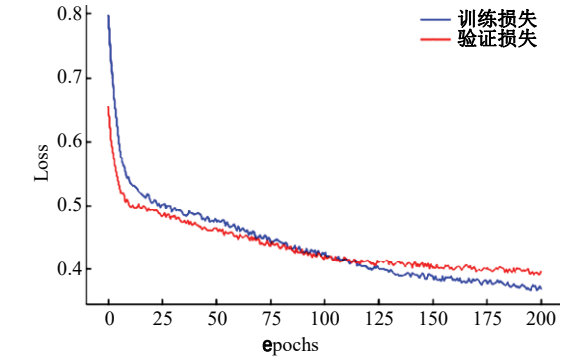
以看出,预测值相较于真实值其整体范围更加集中,波动幅度更小,其整体平均误差为 9.85%,认为采用随机森林预测模型能够对本研究的换道持续时间进行较为有效的预测。

3.2 基于深度神经网络的超车换道间隙预测

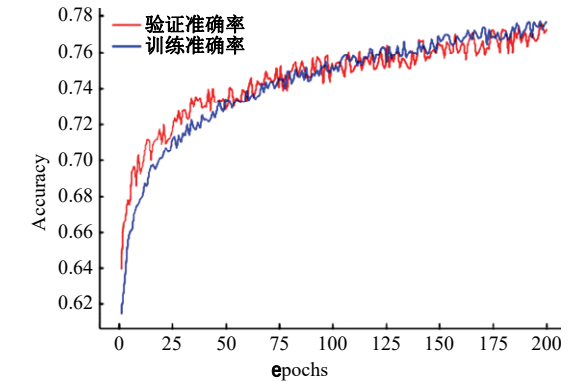
深度神经网络(Deep neural network, DNN)作为一种复杂的非线性网络系统,具有强大的预测能力,主要由输入层、隐含层和输出层 3 个部分构成。本研究参考了大量现有成果,认为选择 2 层隐含层对于超车换道间隙的预测已经足够,且隐含层神经元数设定为 2 的幂时,模型的优化效果通常更为良好。为了提高模型的泛化能力和鲁棒性,本研究采用 ReLU 函数作为隐含层的激活函数,并在隐含层中引入 Dropout 层。同时,考虑到提升模型的学习效率以及降低模型过拟合的风险,研究对初始学习率、bath\_size、dropout 比例等参数进行相应了调整。

图 10 展示了深度神经网络 epochs 变化情况的 Loss 曲线与 Accuracy 曲线,其中蓝色实线代表训练过程,红色实线代表验证过程。

从图 10 中可以看出,在 epochs=40 时, Loss



(a)训练过程Loss变化曲线



(b)训练过程Accuracy变化曲线

图 10 深度神经网络预测模型训练与验证过程  
Fig. 10 Deep neural network prediction model training and verification process

曲线中训练集与验证集差值最大,且此时验证集 Loss 值低于训练集。经过此阶段后,验证集 Loss 曲线的斜率开始低于训练集,且在 epochs=100 处验证集的 Loss 值低于训练集,表明模型开始过拟合;从 Accuracy 曲线可以看出两条曲线振荡幅度较大,在 epochs=60 处两条曲线相交,此时出现验证集的 Accuracy 低于训练集的现象。因此,最终选定 epochs=40 用于模型。结合以上分析,本文构建深度神经网络模型选取的参数见表 6。

表 6 深度神经网络预测模型参数选择

Table 6 Deep neural network prediction model parameter selection

| 参 数        | 取值    |
|------------|-------|
| 隐藏层数       | 2     |
| 隐藏层神经元个数   | 64    |
| 隐藏层激活函数    | ReLU  |
| 初始学习率      | 0.001 |
| epochs     | 40    |
| batch_size | 64    |
| Dropout    | 0.25  |
| 损失函数       | MSE   |

### 3.3 超车换道行为速度优化控制模型

结合随机森林所预测的换道持续时间  $\Delta t_c$ , 将基于 DNN 预测结果的  $(t_c + \Delta t_c)$  时刻超车换道车辆目标位置记为  $x_{i,j}^{\text{target}}(t_c + \Delta t_c)$ , 以此构建理想状态下的车辆诱导速度公式:

$$v_{i,j}^{\text{guide}}(t_c) = \frac{x_{i,j}^{\text{target}}(t_c + \Delta t_c) - x_{i,j}(t_c)}{\Delta t_c} \quad (1)$$

式中:  $v_{i,j}(t_c)$  为车辆开始换道时刻的速度;  $x_{i,j}(t_c)$  为此时车辆所在位置。

若当前车道前方存在车辆, 且其行驶状况会对超车换道车辆的换道空间选择产生干扰, 则车辆诱导速度变化为  $v_{i,j}^{\text{guide}}(t_c) = v_{i,j+1}(t)$ , 若临近交织区末端  $x_{\text{end}}$ , 则会停车以等待换道, 以此建立了式(2)所示的车辆产生换道意愿后无法进行换道的车辆速度递减规则。

$$v_{i,j}^{\text{limit}}(t) = \frac{-v_{i,j}(t_c)x_{i,j}^2(t) + 2v_{i,j}(t_c)x_{\text{end}}x_{i,j}(t)}{(x_{\text{end}} - x_{i,j}(t_c))^2} + \frac{v_{i,j}(t_c)x_{i,j}^2(t_c) - 2x_{i,j}(t_c)x_{\text{end}}v_{i,j}(t_c)}{(x_{\text{end}} - x_{i,j}(t_c))^2} \quad (2)$$

此时, 车辆诱导速度为上述约束情况下的最

小值, 即:

$$v_{i,j}^{\text{guide}}(t_c) = \min \left\{ \frac{x_{i,j}^{\text{target}}(t_c + \Delta t_c) - x_{i,j}(t_c)}{\Delta t_c}, v_{i,j+1}(t), v_{i,j}^{\text{limit}}(t) \right\} \quad (3)$$

若预测结果最佳换道点位置需要车辆减速行驶, 则车辆在同时考虑到减速慢行以及后车行驶状态的情况下取最大值作为诱导车速, 且为防止车辆减速至静止状态, 设置最低速度阈值为  $v_{\text{base}}$  (后文取  $v_{\text{base}} = 1 \text{ cell/fps}$ ), 得到此情形下的车辆诱导速度为:

$$v_{i,j}^{\text{guide}}(t_c) = \max \left\{ \frac{x_{i,j}^{\text{target}}(t_c + \Delta t_c) - x_{i,j}(t_c)}{\Delta t_c}, v_{\text{base}}, v_{i,j}^{\text{limit}}(t) \right\} \quad (4)$$

结合以上各类换道情况, 最终构建的超车换道车辆速度优化控制模型如下:

$$v_{i,j}^{\text{guide}}(t_c) = \left\{ \min \left\{ \frac{x_{i,j}^{\text{target}}(t_c + \Delta t_c) - x_{i,j}(t_c)}{\Delta t_c}, v_{i,j+1}(t), v_{i,j}^{\text{limit}}(t) \right\}, \frac{x_{i,j}^{\text{target}}(t_c + \Delta t_c) - x_{i,j}(t_c)}{\Delta t_c}, \max \left\{ v_{\text{base}}, \frac{x_{i,j}^{\text{target}}(t_c + \Delta t_c) - x_{i,j}(t_c)}{\Delta t_c}, v_{i,j}^{\text{limit}}(t) \right\} \right\} \quad (5)$$

## 4 超车换道行为控制效果验证

### 4.1 快速路互通交织区仿真环境构建

依据所建立的交织区超车换道行为速度优化控制模型, 本文在 Li 等<sup>[11]</sup>的研究成果基础上, 利用快速路互通交织区元胞自动机仿真模型对其控制效果进行验证, 该交织区仿真模型的有效性已在其研究中证实, 仿真模型的基本参数设置如表 7 所示。

关于元胞自动机模型中车辆跟驰及换道规则的定义如下:

表 7 仿真基本参数设置

Table 7 Parameter settings for simulation

| 变量                                 | 参数设置  | 对应实际值   |
|------------------------------------|-------|---------|
| 元胞空间长度/cell                        | 3 000 | 150 m   |
| 车道宽度/cell                          | 9     | 3.5 m   |
| 车道数/条                              | 5     | 5 条     |
| 车辆最大速度/(cell × fps <sup>-1</sup> ) | 12    | 60 km/h |
| 车身长度/cell                          | 90    | 4.5 m   |
| 仿真步长/fps                           | 9 000 | 5 min   |

#### 4.1.1 跟驰行为规则

以 NS 模型为基础进行车辆跟驰行为建模, 车辆位置按照  $x_{i,j}(t+1)=x_{i,j}(t)+v_{i,j}(t)$  规则更新, 以  $v_{\max}$  作为车辆最大速度, 车辆速度取值范围为  $[0, v_{\max}]$ , 同时在 NS 模型中引入随机慢化规则。结合互通交织区的车辆运行速度统计特征, 在跟驰规则建模中引入速度调整系数  $\rho$ , 以优化车辆运行中的加减速规则,  $p_1$  与  $p_2$  分别代表车辆加速、减速概率, 如式(6)(7)所示:

$$p_1 = \begin{cases} 1, & v_{i,j}(t) < \rho \times v_{\max} \\ \frac{1}{1 + \exp(a \times v_{i,j}(t) - b)}, & v_{i,j}(t) \geq \rho \times v_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

$$p_2 = \begin{cases} 0, & v_{i,j}(t) < \rho \times v_{\max} \\ 1 - \frac{1}{1 + \exp(a \times v_{i,j}(t) - b)}, & v_{i,j}(t) \geq \rho \times v_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\rho = v_{\text{average}}/v_{\max}$ ,  $v_{\text{average}}$  为统计数据中不同车道的平均行车速度。车辆加速规则为  $v_{i,j}(t+1) = \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}]$ , 车辆减速规则为  $v_{i,j}(t+1) = \min[v_{i,j}(t) - 1, v_{\max}]$ 。

#### 4.1.2 刚性换道规则

结合互通交织区换道点分布统计特征, 建立换道点选择的高斯曲线拟合方程如下:

$$y = y_0 + \frac{A}{\omega \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \times \exp\left[-2\left(\frac{x - x_c}{\omega}\right)^2\right] \quad (8)$$

式中:  $y_0$  为偏移量;  $x$  为换道频率位置, 即车辆在交织区位置;  $x_c$  为峰中心位置;  $\omega$  为高斯峰的半高宽;  $A$  为峰面积。

建立换道概率高斯分布模型  $C(x)$  如公式如下:

$$C(x) = a_1 + a_2 \times \exp\left[-\left(\frac{x - a_3}{a_4}\right)^2\right] \quad (9)$$

式中:  $a_1$  为函数纵向偏移量;  $a_2$  为峰值极限值;  $a_3$  为横向偏移量;  $a_4$  为分布曲线形状参数。

#### 4.1.3 自由换道规则

在换道车辆与目标车道前后车均满足安全距离要求条件下, 将当前时刻前车与目标车道前车的速度差  $v_x$  作为换道概率大小的决策条件。当速度差  $v_x = 0$  时, 目标车辆的换道概率为  $p_3$ , 本研究取  $p_3 = 0.05$ ; 当速度差  $v_x = v_{\max}$  时, 目标车辆的换道概率为  $p_4$ , 本研究取  $p_4 = 0.8$ , 构建基于 Logistic 曲线的自由换道概率模型, 如式(10)所示:

$$p_{i,j}^L(t) = p_{i,j}^R(t) = \frac{1}{1 + \exp(-a \times v_x(t) + b)} \quad (10)$$

式中:  $b = \ln(1/(p_3 - 1))$ ,  $a = (b - \ln(1/(p_4 - 1)))/v_{\max}$ ,  $v_x(t) = v_{i+n,j+1}(t) - v_{i,j+1}(t)$ 。

#### 4.2 超车换道控制效果对比分析

将超车换道行为速度优化控制模型作为控制因素添加到所构建的互通交织区仿真环境中, 通过对比不同车道不同区域的车辆平均速度以及不同车道平均时空占有率以验证所提控制模型的有效性。

##### 4.2.1 车辆换道间隙选择对比

在采用 3.3 节的控制模型后, 城市快速路互通交织区超车换道车辆在仿真中对超车换道间隙的选择评价与实际空间选择评价的雷达图对比结果如图 11 所示。

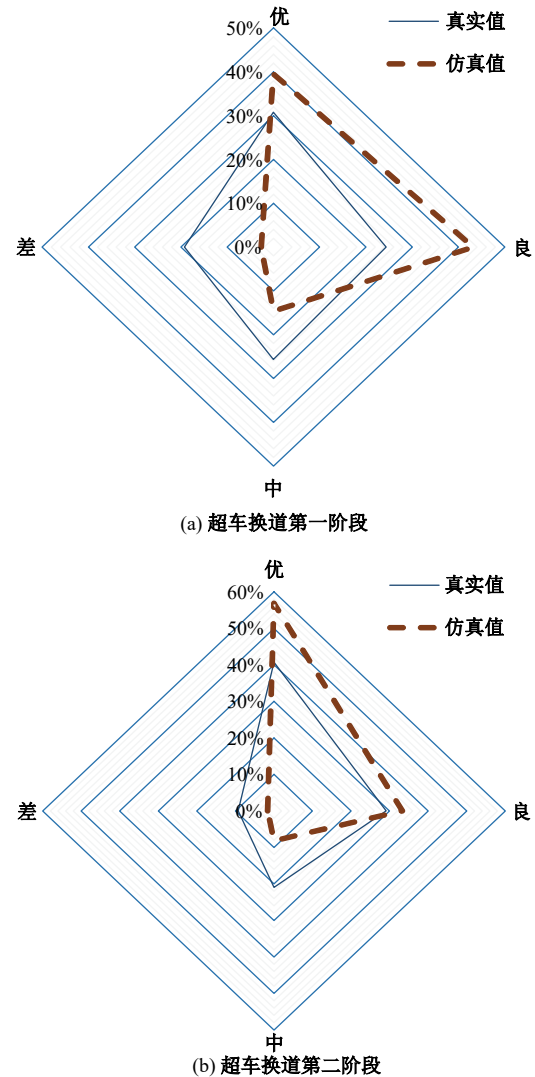


图 11 车辆超车换道间隙选择对比  
Fig. 11 Comparison of gap selection for overtaking lane changing vehicles

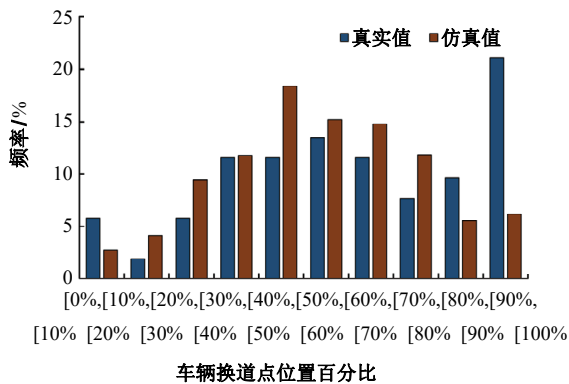
由图11可见,模型在间隙选择方面表现出明显的提升。在超车换道第一阶段,“优”“良”等级的换道间隙选择,仿真结果相较于真实值分别高出约8.74和18.86个百分点;在超车换道第二阶段,模型在“优”“良”等级间隙选择方面的仿真结果较真实值分别高出了约16.19和4.19个百分点。

总的来说,模型对于交织区交通流运行状况具有较好的适应性,且在换道间隙选择方面表现出较高的预测准确性,为超车换道提供了引导,使车辆能够选择相对更优的空间进行换道。

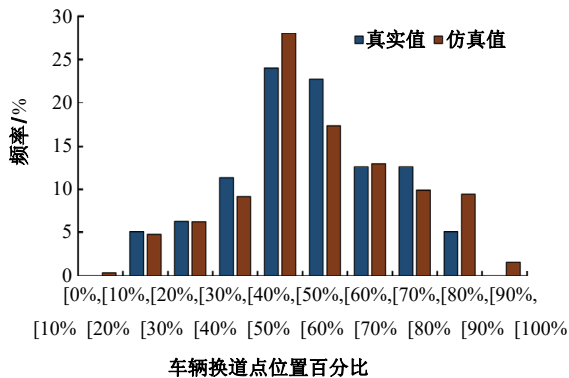
#### 4.2.2 车辆换道点位置控制分布对比

针对超车换道车辆对目标间隙中的换道点位置进行对比分析,超车换道两阶段的真实值与仿真值对比情况如图12所示。

由图12可见,在超车换道的第一阶段,所建立车辆超车换道模型的间隙选择在[40%, 50%]范围内的分布明显高于真实值。在此范围内,模型值占总数的18.43%,而真实值仅为11.54%。



(a) 超车换道第一阶段



(b) 超车换道第二阶段

图12 超车换道点位置选择控制分布对比

Fig. 12 Comparison of gap control distribution of overtaking lane changing point selection

这表明在模型控制下,换道车辆更倾向于选择介于40%~50%的位置作为最佳换道点。这种分布趋势符合正态分布的特性,即更多的数据集中在均值附近。

在超车换道的第二阶段,该控制模型下的间隙选择分布仍然保持了一定的集中趋势。尤其是在[40%, 50%]范围内,该控制模型下的换道点占比为28.07%,比真实值的24.05%更高。

以上研究表明,即使在不同阶段,控制模型下换道车辆更偏向于选择介于40%~50%的间隙作为优先换道位置。

此外,通过综合两组数据,可以观察到模型控制下的车辆超车换道间隙选择分布更接近正态分布的形态,这表明模型的控制效果具有较高的稳定性和一致性。

#### 4.2.3 车道车辆速度影响分析

图13为城市快速交织区3条不同车道不同区域的车辆行驶实际平均速度(以蓝色实线表示)以及采用控制模型后的仿真下不同区域的车辆平均速度(以红色虚线表示,浅蓝色区域为仿真数据)情况。

对比图13中的数据可以发现,采用控制模型后车辆整体速度波动情况明显减小。具体表现为3条车道的实际平均速度方差分别为32.12、31.79和14.31,而在仿真中,3条车道车辆平均速度方差分别为1.40、5.81和4.24。同时,车辆整体平均速度也具有一定程度的提升。3条车道的实际平均速度分别为31.06、32.35和39.23 km/h,而采用本文所提的控制模型后,仿真中3条车道车辆平均速度分别提升了6.91%、1.71%和3.85%,分别达到33.21、32.90和40.74 km/h。结果表明:本文提出的车辆超车换道控制模型对改善交通流状态具有积极的影响,在有效改善区域内车速变化的同时,对交织区运行效率也具有一定的提升作用。

#### 4.2.4 不同车道时空利用率影响分析

时空利用率定义为车流占据道路的时间比率,用于反映超车换道行为对交织区各车道时空使用的影响情况,其计算公式为:

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_j(i)}{y} \quad (11)$$

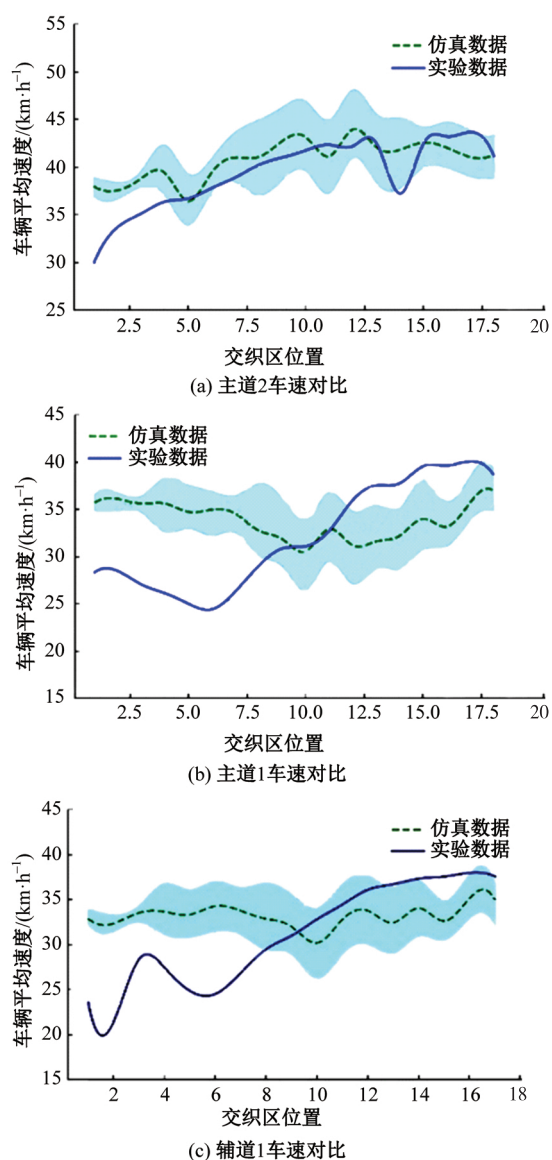


图 13 不同车道平均车速对比

Fig. 13 Comparison of average speed in different lanes

式中:  $j$  为车道不同位置编号;  $a_j$  为该车道对应位置时空占用率;  $n$  为通过  $j$  位置的车辆数;  $x_j(i)$  为第  $i$  辆车在该位置占用时长;  $y$  为统计时段总长度。

图 14 为控制模型下不同车道的时空利用率变化情况,可以观察到 3 条车道的时空利用率整体分布趋势相同,前段的时空利用率明显高于后段。3 条车道在控制方法下的时空利用率则更加均衡,从方差的角度来看,则主道 1 的时空利用率相对变化程度较大,相对其他两条车道优化情况更好。

结果表明,本文的超车换道控制模型对于交织区车道时空利用率分布不均具有一定的调节作

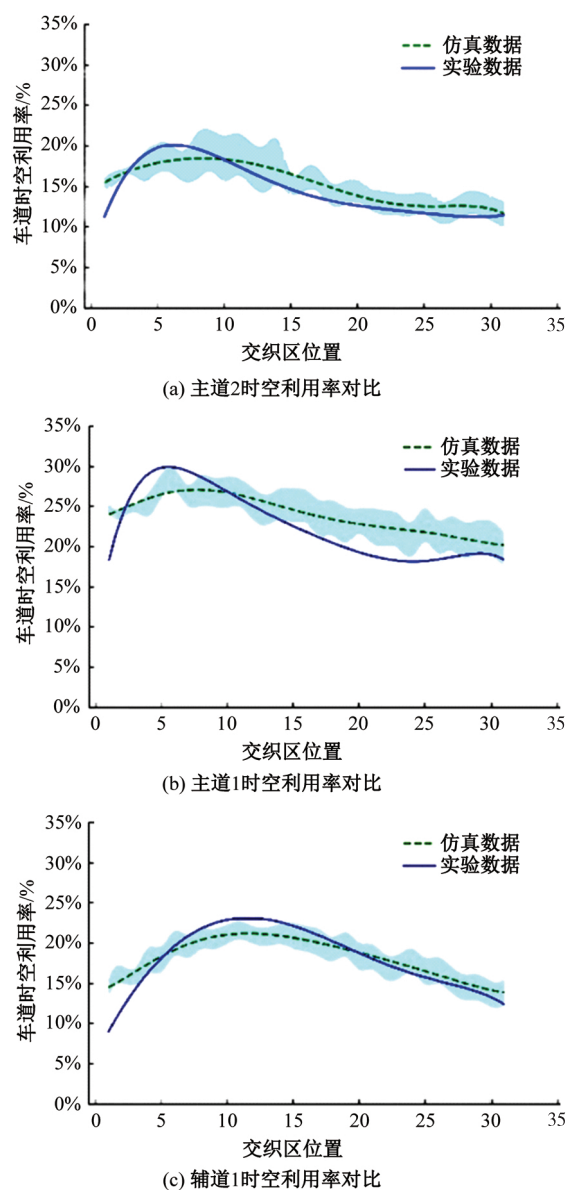


图 14 不同车道时空利用率对比

Fig. 14 Comparison of spatiotemporal utilization rate of different lanes

用,且对于主道 1 的调节效果更为明显。

## 5 结 论

(1) 在超车换道过程中,不同阶段车辆的换道间隙选择和换道点位置选择存在差异,特别是第一阶段的选择优秀换道间隙的概率较低,选择评级为“优”或“良”的空间仅占 55.13%,而在换道第二阶段时选择评级为“优”或“良”的空间占比为 69.77%,且第一阶段换道点位置选择相对离散,对于换道空间选择并不理想。

(2) 本文建立的快速路互通交织区超车换道行为速度优化控制模型在换道间隙和换道点位置

选择上具有良好的优化效果。在换道间隙选择方面,控制模型下的车辆的换道间隙选择在两个阶段均有显著提升。其中,对于第一阶段的最优换道间隙选择的提升最为明显,约18.86个百分点。在换道点位置选择上,控制模型下的换道点位置分布在40%~50%位置的概率在第一阶段和第二阶段分别为18.43%、28.07%,均高于实际值的11.54%、24.05%。

(3)所建立的超车换道控制模型对交织区整体运行情况也具有一定的调控作用。由仿真结果可知,采用控制模型的3条车道平均速度分别提升了6.91%、1.71%和3.85%,且平均速度方差由原先的32.12、31.79和14.31降低为1.40、5.81和4.24,在提升交织区运行效率的同时具有更好的稳定性。同时,控制模型对交织区车道的时空利用率也具有一定的调节作用,特别是对主道1的优化效果更为明显。以上表明,模型能够优化各车道的时空资源分配效率,实现更均衡的交通流动性。

#### 参考文献:

- [1] Moridpour S, Sarvi M, Rose G. Lane changing models: a critical review[J]. *Transportation Letters*, 2010, 2(3): 157-173.
- [2] 耿新力. 城区不确定环境下无人驾驶车辆行为决策方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学信息科学技术学院, 2017.  
Geng Xin-li. Research on behavior decision-making approaches for autonomous vehicle in urban uncertainty environments[D]. Hefei: School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, 2017.
- [3] 张航, 段和柱, 储泽宇. 城市快速路互通立交交织区长度可靠性设计[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2023, 42(3): 98-104.  
Zhang Hang, Duan He-zhu, Chu Ze-yu. Reliability design of weaving segment length of urban expressway interchange[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2023, 42(3): 98-104.
- [4] 陈亮, 何志超, 李巧茹, 等. 多车道城市快速路交织区拥堵形成机制[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(6): 73-78.  
Chen Liang, He Zhi-chao, Li Qiao-ru, et al. Study on congestion mechanism in multi-lane weaving section of urban expressway[J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(6): 73-78.
- [5] 李岩, 陈姜会, 曾明哲, 等. 考虑天气影响的高速公路交织区交通运行状态识别[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(6): 111-119.  
Li Yan, Chen Jiang-hui, Zeng Ming-zhe, et al. Identification of traffic operation status in freeway weaving segments considering weather effects[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2023, 23(6): 111-119.
- [6] 张卫华, 刘嘉茗, 解立鹏, 等. 混合网联环境快速路交织区交通流特性分析[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2023, 53(1): 156-164.  
Zhang Wei-hua, Liu Jia-ming, Xie Li-peng, et al. Analysis on the characteristics of traffic flow in expressway weaving area under mixed connected and autonomous environment[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2023, 53(1): 156-164.
- [7] Wang L, Abdel-Aty M, Shi Q, et al. Real-time crash prediction for expressway weaving segments[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 61: 1-10.
- [8] 谢济铭, 夏玉兰, 钱正富, 等. 考虑智能网联邻车车辆信息的交织区换道风险预警[J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23(2): 287-300.  
Xie Ji-ming, Xia Yu-lan, Qian Zheng-fu, et al. Lane-change risk warning in interweaving area considering information from intelligent connected near-neighbor vehicles[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(2): 287-300.
- [9] 彭博, 王玉婷, 谢济铭, 等. 城市干线短交织区元胞自动机多级换道决策模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(4): 41-48.  
Peng Bo, Wang Yu-ting, Xie Ji-ming, et al. Multi-stage lane changing decision model of urban trunk road's short weaving area based on cellular automata[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(4): 41-48.
- [10] Zhao C W, Zhao Y, Wang Z Q, et al. Choice of lane-changing point in an urban intertunnel weaving section based on random forest and support vector machine[J]. *Promet-Traffic & Transportation*, 2023, 35(2): 161-174.
- [11] Li M H, Zhao Y, Ma J X, et al. A study on the impact of overtaking lane-changing behavior in express-

- way interchange weaving areas[J]. *Promet-Traffic & Transportation*, 2024, 36(5): 973-987.
- [12] 李珣, 马文哲, 赵征凡, 等. 车路协同下基于行车指引的改进STCA双车道换道模型[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2020, 50(6): 1134-1142.
- Li Xun, Ma Wen-zhe, Zhao Zheng-fan, et al. Improved STCA lane changing model for two-lane road based on driving guidance under CVIS[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(6): 1134-1142.
- [13] Zhou Z, Zhao Y, Li M H, et al. A causal inference-based speed control framework for discretionary lane-changing processes[J]. *Journal of Transportation Engineering Part A—Systems*, 2023, 49(8): 1-26.
- [14] Yang D, Zheng S, Wen C, et al. A dynamic lane-changing trajectory planning model for automated vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 95: 228-247.
- [15] 吕伟, 黄广琛, 汪京辉. 基于元胞自动机的高速公路瓶颈交通演化仿真[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(3): 293-302.
- Lv Wei, Huang Guang-chen, Wang Jing-hui. Simulation of highway traffic bottleneck via cellular automata[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(3): 293-302.
- [16] 张毅, 姚丹亚, 李力, 等. 智能车路协同系统关键技术与应用[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(5): 40-51.
- Zhang Yi, Yao Dan-ya, Li Li, et al. Technologies and applications for intelligent vehicle-infrastructure cooperation systems[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(5): 40-51.
- [17] 黄玲, 郭亨聪, 张荣辉, 等. 人机混驾环境下基于LSTM的无人驾驶车辆换道行为模型[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(7): 156-166.
- Huang Ling, Guo Heng-cong, Zhang Rong-hui, et al. LSTM-based lane changing behavior model for unmanned vehicle under environment of heterogeneous human-driven and autonomous vehicles[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(7): 156-166.
- [18] Luo Y, Xiang Y, Cao K, et al. A dynamic automated lane change maneuver based on vehicle-to-vehicle communication[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 62: 87-102.
- [19] 曲大义, 黑凯先, 郭海兵, 等. 车联网环境下车辆换道博弈行为及模型[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2022, 52(1): 101-109.
- Qu Da-yi, Hei Kai-xian, Guo Hai-bing, et al. Game behavior and model of lane-changing on the internet of vehicles environment[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52(1): 101-109.
- [20] Wu Y, Abdel-Aty M, Zheng O, et al. Automated safety diagnosis based on unmanned aerial vehicle video and deep learning algorithm[J]. *Transportation Research Record*, 2020, 2674(8): 350-359.
- [21] 王祺, 谢娜, 侯德藻, 等. 自适应巡航及协同式巡航对交通流的影响分析[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(6): 188-197.
- Wang Qi, Xie Na, Hou De-zao, et al. Effects of adaptive cruise control and cooperative adaptive cruise control on traffic flow[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(6): 188-197.