

智能网联环境下高速公路异质 交通流建模及仿真

程国柱, 陈永胜

(东北林业大学 土木与交通学院, 哈尔滨 150040)

摘要:为探究人工驾驶车辆(HDV)与智能网联车辆(CAV)混合行驶对交通流产生的影响,建立了高速公路异质交通流模型。采用增强型智能驾驶人模型(EIDM)描述 HDV 跟驰行为,并考虑前方多车的车头间距、速度差、加速度等因素,改进 EIDM 模型描述 CAV 跟驰行为;然后利用最小化由换道引起的所有制动(MOBIL)模型描述 HDV 换道行为,并引入博弈理论,考虑多车竞争与协作关系,构建 CAV 自主换道与协同换道模型;通过仿真实验评价所建模型合理性,并分析异质交通流运行特征。研究表明:与现有模型相比,本文所建模型在交通流稳定性及行车舒适性等方面具有显著优势;CAV 渗透率的提高有利于通行能力的提升,尤其 CAV 渗透率大于 0.4 时效果更为显著。

关键词:交通运输系统工程;智能交通系统;异质交通流;协同换道;博弈论

中图分类号:U495 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)11-3583-10

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240144

Modeling and simulation of freeway heterogeneous traffic flow in connected and autonomous vehicle environment

CHENG Guo-zhu, CHEN Yong-sheng

(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: To explore the impact of mixed driving for human-driven vehicles (HDV) and Connected and autonomous vehicles (CAV) on traffic flow, a freeway heterogeneous traffic flow model was established. The enhanced intelligent driver model (EIDM) was utilized to describe the car-following behavior of HDV, and the EIDM model was improved to describe the car-following behavior of CAV considering the headway, speed difference and acceleration of multi-vehicles. Then, the minimizing overall braking induced by lane changes (MOBIL) model was utilized to describe the lane-changing behavior of HDV, and the game theory is introduced to consider multi-vehicle competition and cooperation, autonomous and cooperative lane-changing models of CAV were established. Through simulation experiments, the rationality of the model was evaluated and the operation characteristics of heterogeneous traffic flow were analyzed. The research shows that compared with existing models, the model built in this paper

收稿日期:2024-02-04.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572023CT21);黑龙江省重点研发计划项目(JD22A014);国家自然科学基金面上项目(52378433).

作者简介:程国柱(1977-),男,教授,博士.研究方向:交通安全,智能交通系统.E-mail: guozhucheng@126.com

demonstrates significant advantages in traffic flow stability and driving comfort. The increase of CAV penetration rate is conducive to the improvement of traffic capacity, especially when the CAV penetration rate is greater than 0.4, the effect is more significant.

Key words: engineering of communications and transportation system; intelligent transportation system; heterogeneous traffic flow; cooperative lane-changing; game theory

0 引言

随着自动驾驶与车联网技术的深度融合, CAV 应时而出, 研究表明: CAV 在提升道路通行效率、减少交通事故等方面具有显著优势^[1]。随着 CAV 技术的推进和发展, 未来很长时间内道路上会呈现 HDV 和 CAV 混行异质交通流。由于 HDV 驾驶人和 CAV 感知、决策和控制层面的差异性使得交通环境复杂性极大地提高^[2], 这不仅会降低道路通行效率, 还会影响交通流稳定性及安全性, 因此, 有必要开展异质交通流建模及仿真研究, 深入分析 CAV 对交通流的影响及其运行特征。

跟驰模型方面, 加州大学 PATH 实验室提出自适应巡航控制 (Adaptive cruise control, CACC)/协同自适应巡航控制 (Cooperative adaptive cruise control, CACC) 模型, 并实车试验验证其可靠性^[3,4]。Talebpour 等^[5]的研究表明: ACC/CACC 车辆对通行效率具有积极的影响。Cui 等^[6]建立 HDV、CAV 及人驾网联车混行跟驰模型, 研究得知网联通信能够改善交通流稳定性。秦严严等^[7,8]、马庆禄等^[9]和李松等^[10]研究混行跟驰模型, 解析交通流基本图及稳定性条件, 并分析了 CAV 对通行能力及交通安全等的影响。换道模型方面, Yu 等^[11]和曲大义等^[12]考虑多车动态博弈行为, 建立了异质交通下的 CAV 和 HDV 换道决策模型。吴德华等^[13]研究 CAV 渗透率及队列数对交通流有序性的影响, 提出了保守型集聚和激进型集聚两种换道策略。潘义勇等^[14]综合考虑前后多车信息, 加权改进 IDM 模型和 MOBIL 模型, 建立了 CAV 同质交通流模型, 而孙曼曼等^[15]在此基础上, 引入博弈理论, 构建了 CAV 协同换道模型。多车道模型方面, Ye 等^[16]和 Zhuo 等^[17]建立多车道异质交通流元胞自动机模型, 分析了不同 CAV 渗透率下密度和流量的关系, 并提出了通行能力改善策略。郭静秋等^[18]将元胞自动机与强化学习相结合, 创建了一种多智能体双车道异质交通流模型。梁军等^[19]构建了融入公交车与 CAV 队列行驶的跟驰换道模

型。单肖年等^[20]组合应用 IDM 模型、CACC 模型和 MOBIL 模型, 建立了多车道异质交通流模型, 仿真分析其运行特征。

综上, 目前关于异质交通流方面的研究较为丰富, 但尚未形成统一的结论, 且异质交通下多车协同方面的研究较少。基于此, 本文以单向双车道(即双向四车道)高速公路为研究场景, 采用 EIDM 模型和 MOBIL 模型来描述 HDV 跟驰与换道行为, 并根据 CAV 网联通信及协同控制等特征, 考虑前后多车行驶状态, 改进 EIDM 模型和 MOBIL 模型来描述 CAV 跟驰与换道行为, 进而建立异质交通流模型, 评价并分析模型合理性及交通流运行特征, 为通行能力分析、交通规划与管理研究提供理论基础。

1 异质交通流跟驰模型

1.1 HDV 跟驰模型

IDM 模型^[21]结构简明易懂, 且与实际较为吻合, 被学者们广泛应用。但 IDM 模型在描述前方车辆紧急制动或强制换道切入等极端情况时, 可能出现不切实际的减速行为, 为此, Kesting 等^[22]在 IDM 模型基础上, 加入启发式恒定加速度 (Constant acceleration heuristic, CAH), 提出一种 EIDM 模型。本文选取 EIDM 模型来描述 HDV 跟驰行为, 具体如式(1)~式(3)所示:

$$a_{\text{IDM}} = a \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_f} \right)^\delta - \left(\frac{s_0 + Tv_n + \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{ab}}}{s_n} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$a_{\text{CAH}} = \begin{cases} \frac{v_n^2 \tilde{a}_{n-1}}{v_{n-1}^2 - 2s_n \tilde{a}_{n-1}}, & v_{n-1} \Delta v_n \leq -2s_n \tilde{a}_{n-1} \\ \tilde{a}_{n-1} - \frac{\Delta v_n^2 \Theta(\Delta v_n)}{2s_n}, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$a_n = \begin{cases} a_{\text{IDM}}, & a_{\text{IDM}} > a_{\text{CAH}} \\ (1-c)a_{\text{IDM}} + c \left[a_{\text{CAH}} + b \tanh \left(\frac{a_{\text{IDM}} - a_{\text{CAH}}}{b} \right) \right], & \text{其他} \end{cases}$$

(3)式中: a_{IDM} 为 IDM 模型加速度; a_{CAH} 为启发式

恒定加速度; $s_n, \Delta v_n$ 分别为第 n 辆车与前导车的实际间距和速度差; a, b 分别为最大加速度和舒适减速度; v_t 为期望速度; δ 为加速度指数; s_0 为静止安全间距; T 为安全车头时距; a_n, v_n 分别为第 n 辆车的加速度和速度; $v_{n-1}, a_{n-1}, \tilde{a}_{n-1}$ 分别为第 n 辆车前车的速度、加速度和有效加速度, $\tilde{a}_{n-1} = \min(a_{n-1}, a)$; c 为冷静系数。

1.2 CAV跟驰模型

相比于HDV, CAV能够监测与通信感知周边多车的行驶状态(位置、速度和加速度信息等), 因此, 为了使IDM模型能够适用于CAV, Guérliau等^[23]考虑目标车辆与多辆前导车的实际间距与速度差等, 确定前导车对目标车辆跟驰行为的影响程度, 构建权重因子表达式, 建立了考虑多车信息的IDM改进模型(以下简称“CIDM”), 具体如式(4)所示:

$$a_n = f_{\text{IDM}} \left(v_n, \sum_{j=1}^N w_j s_j, \sum_{j=1}^N w_j \Delta v_j \right), w_j = \rho_j T_j, \\ \rho_j = \sigma_j / \sum_{k=1}^N \sigma_k, \sigma_j = |\Delta v_{n,j}| / \sqrt{s_{n,j}} \quad (4)$$

式中: w_j 为目标车辆与其第 j 辆前导车的交互信息权重系数; ρ_j 为权重系数; T_j 为信息可靠度, 一般取1.0; N 为考虑车辆数, 一般取3辆; $s_j, \Delta v_j$ 分别为第 j 辆前导车与其前导车的实际间距和速度差; $s_{n,j}, \Delta v_{n,j}$ 分别为目标车辆与第 j 前导车的实际间距和速度差。

同样, 考虑到IDM模型的局限性, 本文结合EIDM模型, 进一步考虑多辆前导车的速度和加速度等信息, 改进CIDM模型(以下简称“CEIDM”), 来模拟CAV跟驰行为, 具体如下:

$$a_n = f_{\text{EIDM}} \left(v_n, \sum_{j=1}^N w_j s_j, \sum_{j=1}^N w_j \Delta v_j, \sum_{j=1}^N w_j v_j, \sum_{j=1}^N w_j a_j \right), \\ w_j = \rho_j T_j, \rho_j = \sigma_j / \sum_{k=1}^N \sigma_k, \sigma_j = |\Delta v_{n,j}| / \sqrt{s_{n,j}} \quad (5)$$

式中: v_j, a_j 分别为第 j 辆前导车的速度和加速度。

2 异质交通流换道模型

2.1 换道场景与假设

本文换道涉及场景如图1所示。换道车辆称为目标车辆, 记为TV; 换道前和换道后所在车道分别为原车道和目标车道; 目标车辆在原车道上的前导车称为原前车, 记为LV, 后随车称为原后

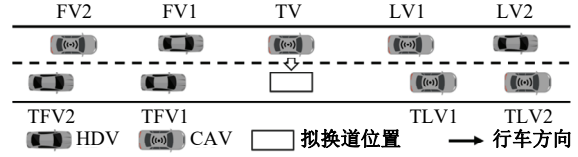


图1 换道场景

Fig. 1 Lane-changing scenario

车, 记为FV; 在目标车道上的前导车称为邻前车, 记为TLV, 后随车称为邻后车, 记为TFV。此外, 为了便于研究, 作出以下假设: ①不考虑车辆的横向速度和加速度; ②CAV通信范围为300 m, 当车间距大于通信范围或前、后某车为HDV时, 通信中断, 相关信息缺省; ③不考虑CAV的监测与通信延迟及误差。

2.2 HDV换道模型

基于激励和安全准则的MOBIL换道模型, 其激励准则要综合考虑目标车辆、原后车和邻后车的加速度收益来表征换道收益, 当换道收益大于规定阈值时, 目标车辆产生换道动机; 安全准则要求涉及车辆的加速度不超过规定安全阈值^[24]。本文选取MOBIL模型来描述HDV换道行为, 具体如式(6)所示:

$$\begin{cases} u_{\text{TV}} = a'_{\text{TV}} - a_{\text{TV}} + \zeta(a'_{\text{FV}} - a_{\text{FV}} + a'_{\text{TFV}} - a_{\text{TFV}}) > \Delta a \\ a'_{\text{TV}}, a'_{\text{FV}}, a'_{\text{TFV}} > b_{\text{safe}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_{TV} 为换道收益; $a_{\text{TV}}, a'_{\text{TV}}$ 分别为目标车辆换道前和换道后的加速度; $a_{\text{FV}}, a'_{\text{FV}}$ 分别为目标车辆换道前和换道后原后车的加速度; $a_{\text{TFV}}, a'_{\text{TFV}}$ 分别为目标车辆换道前和换道后邻后车的加速度; ζ 为礼让系数; Δa 为加速度效益阈值; b_{safe} 为安全减速度。

2.3 CAV换道模型

CAV具备环境感知及协同决策控制能力, 能够采集周边车辆的行驶状态, 且CAV之间能够通信共享驾驶决策信息。考虑到自由换道行为主要与原前车和邻前车行驶状态及驾驶决策相关, 因此, 本文考虑目标车辆、原前车和邻前车之间的竞争和协作关系, 建立CAV换道模型。

2.3.1 原前车和邻前车均为HDV

当原前车和邻前车均为HDV时, 目标CAV无法与其通信协作, 因此, 建立自主换道模型。Nie等^[25]考虑目标车辆换道后对原车道和目标车道上游多辆后随车的影响, 改进MOBIL换道模型, 提出了适用于CAV的MOBIL改进模型(以

下简称“CMOBIL 模型”),本文以此来描述 CAV 自主换道行为,具体如式(7)所示:

$$\begin{cases} u_{TV} = a'_{TV} - a_{TV} + \zeta \left[\sum_{i=1}^N w_i (a'_{FV,i} - a_{FV,i}) + \sum_{j=1}^N w_j (a'_{TFV,j} - a_{TFV,j}) \right] > \Delta a \\ a'_{TV}, a'_{FV,i}, a'_{TFV,j} > b_{safe}, 1 \leq i \leq 3, 1 \leq j \leq 3 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $a_{FV,i}$ 、 $a'_{FV,i}$ 分别为目标车辆 TV 换道前和换道后,原车道第 i 辆后随车 FVi 的加速度; $a_{TFV,j}$ 、 $a'_{TFV,j}$ 分别为目标车辆换道前和换道后,目标车道第 j 辆后随车 TFVj 的加速度; w_i 和 w_j 分别为 TV 与 FVi 和 TFVj 行驶信息的交互权重系数,权重系数确定方法与 CIDM 模型一致。

2.3.2 原前车为 CAV、邻前车为 HDV

当原前车为 CAV、邻前车为 HDV 时,目标车辆无法与邻前车网联通信,只能监测其行驶状态,而与原前车能够网联通信,相互共享其行驶状态和期望驾驶决策信息,因此,目标车辆与原前车进行协同换道,换道情景如图 2 所示。

博弈论(Game theory, GT)是研究具有竞争与合作性质对象的数学方法,因此,采用博弈论建立 CAV 协同换道模型。参与博弈车辆的策略均为{换道,不换道},记为{1, 2}。博弈矩阵中存在 4 种策略组合,分别为目标车辆和原前车均换道;目标车辆换道、原前车不换道;目标车辆不换道、原前车换道;目标车辆和原前车均不换道,具体如表 1 所列。

根据 MOBIL 模型思想,博弈矩阵中以加速度收益来表征博弈收益值,计算各个策略组合收益值。

(1)策略组合 1:目标车辆和原前车均换道。当目标车辆和原前车满足式(7)时,两者均具备换

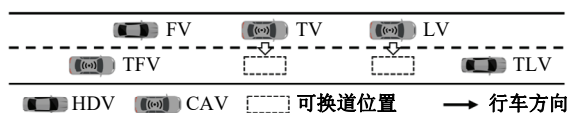


图 2 目标车辆和原前车协同换道情景

Fig. 2 Cooperative lane-changing between the TV and LV

表 1 目标车辆和原前车换道博弈收益矩阵

Table 1 Lane-changing game payoff matrix of TV and LV

		原前车	
		换道	不换道
目标车辆	换道	$u_{TV,11}, u_{LV,11}$	$u_{TV,12}, u_{LV,12}$
目标车辆	不换道	$u_{TV,21}, u_{LV,21}$	$u_{TV,22}, u_{LV,22}$

道条件,因此,两者收益值为换道收益,即 $u_{TV,11} = u_{TV}, u_{LV,11} = u_{LV}$;若目标车辆或原前车不满足式(7)时,不具备换道条件,两者收益值为 $u_{TV,11} = -\infty, u_{LV,11} = -\infty$ 。

(2)策略组合 2:目标车辆换道、原前车不换道。目标车辆满足式(7)时,收益值为换道收益, $u_{TV,12} = u_{TV}$,否则, $u_{TV,12} = -\infty$;而原前车收益值为当前策略下加速度变化值, $u_{LV,12} = a'_{LV} - a_{LV}$ 。

(3)策略组合 3:目标车辆不换道、原前车换道。原前车满足式(7)时,收益值为换道收益, $u_{LV,21} = u_{LV}$,否则, $u_{LV,21} = -\infty$;而目标车辆收益值为当前策略条件下的加速度变化值, $u_{TV,21} = a''_{TV} - a_{TV}$ (a''_{TV} 为目标车辆不换道,而博弈车辆换道条件下的加速度)。

(4)策略组合 4:目标车辆和原前车均不换道,两者收益值为保持原车道行驶条件下的加速度变化值, $u_{TV,22} = a'''_{TV} - a_{TV}, u_{LV,22} = a'''_{LV} - a_{LV}$ (a'''_{TV} 和 a'''_{LV} 为博弈两车均不换道条件下的 TV 和 LV 加速度)。

2.3.3 原前车为 HDV、邻前车为 CAV

当原前车为 HDV、邻前车为 CAV 时,目标车辆与邻前车通信共享行驶状态和期望驾驶决策信息,进行协同换道,换道情景如图 3 所示。

博弈矩阵中存在 4 种策略组合,分别为目标车辆和邻前车均换道;目标车辆换道、邻前车不换道;目标车辆不换道、邻前车换道;目标车辆和邻前车均不换道,具体如表 2 所列。以加速度收益表征博弈收益值,计算各个策略组合收益值。

(1)策略组合 1:目标车辆和邻前车均换道。当目标车辆和邻前车满足式(7)时,两者均具备换道条件,因此,两者收益值为换道收益,即

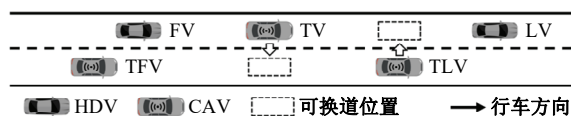


图 3 目标车辆和邻前车协同换道情景

Fig. 3 Cooperative lane-changing between the TV and TLV

表 2 目标车辆和邻前车换道博弈收益矩阵

Table 2 Lane-changing game payoff matrix of TV and TLV

		邻前车	
		换道	不换道
目标车辆	换道	$u_{TV,11}, u_{TLV,11}$	$u_{TV,12}, u_{TLV,12}$
目标车辆	不换道	$u_{TV,21}, u_{TLV,21}$	$u_{TV,22}, u_{TLV,22}$

$u_{TV,11}=u_{TV}, u_{TLV,11}=u_{TLV}$;若目标车辆或邻前车不满足式(7)时,两者收益值为 $u_{TV,11}=-\infty, u_{TLV,11}=-\infty$ 。

(2)策略组合 2:目标车辆换道、邻前车不换道。目标车辆满足式(7)时,具备换道条件,收益值为换道收益, $u_{TV,12}=u_{TV}$;否则, $u_{TV,12}=-\infty$;而邻前车收益值为当前策略条件下的加速度变化值, $u_{TLV,12}=a'_{TLV}-a_{TLV}$ 。

(3)策略组合 3:目标车辆不换道、邻前车换道。邻前车满足式(7)时,收益值为换道收益, $u_{TLV,21}=u_{TLV}$, 否则, $u_{TLV,21}=-\infty$, 而目标车辆收益值为当前策略条件下的加速度变化值,即 $u_{TV,21}=a''_{TV}-a_{TV}$ 。

(4)策略组合 4:目标车辆和邻前车均不换道,两者收益值为保持原车道行驶条件下加速度变化值, $u_{TV,22}=a'''_{TV}-a_{TV}, u_{TLV,22}=a'''_{TLV}-a_{TLV}$ 。

2.3.4 原前车和邻前车均为 CAV

当原前车和邻前车均为 CAV 时,目标 CAV 与原前车和邻前车通信交互行驶状态和期望驾驶决策信息,三者进行协同换道,换道情景如图 4 所示。博弈矩阵中存在 8 种策略组合,如表 3 所列。

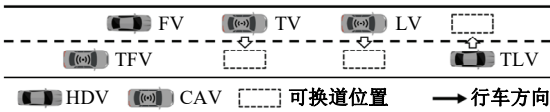


图 4 目标车辆、原前车和邻前车协同换道情景

Fig. 4 Cooperative lane-changing between the TV, LV and TLV

表 3 目标车辆、原前车和邻前车换道博弈收益矩阵

Table 3 Lane-changing game payoff matrix of TV, LV and TLV

		原前车							
		换道				不换道			
目标车辆	换道	$u_{TV,111}, u_{LV,111}, u_{TLV,111}$	$u_{TV,121}, u_{LV,121}, u_{TLV,121}$	$u_{TV,112}, u_{LV,112}, u_{TLV,112}$	$u_{TV,122}, u_{LV,122}, u_{TLV,122}$				
目标车辆	不换道	$u_{TV,211}, u_{LV,211}, u_{TLV,211}$	$u_{TV,221}, u_{LV,221}, u_{TLV,221}$	$u_{TV,212}, u_{LV,212}, u_{TLV,212}$	$u_{TV,222}, u_{LV,222}, u_{TLV,222}$				
		邻前车换道				邻前车不换道			

各策略组合收益值参考 2.3.2 节和 2.3.3 节,若采取换道策略,具备换道可行性条件时,收益值为换道收益,若不满足换道可行性条件时,收益值为无穷小;若采取不换道策略时,收益值为保持原车道条件下的加速度变化值。

综上,协同换道模型中涉及双车博弈行为和三车博弈行为,且均为完全信息下的非合作博弈行为。纳什均衡指每一位博弈参与者在此策略组合条件下改变自己的策略(其他参与者策略不变)都不会提高自身的收益,因此,本文求解纳什均衡作为协同换道模型最优策略。

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真实验

利用 Matlab 建立单向双车道高速公路异质

交通流仿真模型,道路长度为 1 500 m,其中两侧 250 m 为模型预热路段,中间 1 000 m 为重点研究路段;车辆按初始密度随机生成于道路当中,从道路尾端驶出后,再从始端重新驶入道路;仿真时长为 0.1 s,仿真总时长为 1 800 s,前 600 s 预热模型,记录后 1 200 s 的仿真运行数据,每组实验运行 3 次,结果取均值。换道持续时间服从正态分布 $N\sim(4.19, 0.8)$ 的随机小数^[26]。为了避免模型预热后形成固定的交通流,考虑小客车和大货车两种车型,同一车型长宽一致,动力性能一致。其中,大货车混入率为 0.1,行驶在外侧车道,不进行换道。为了对比评价交通流模型的合理可行性,仿真实验中引入现有模型,并设置 3 种跟驰与换道组合模型,如表 4 所列,本文所建交通流模型为组合模型 3。此外,为了简化研究工作,参考现

表 4 组合模型跟驰与换道类型

Table 4 Types of car-following and lane-changing in combination models

组合模型	跟驰模型		换道模型	
	HDV	CAV	HDV	CAV
现有模型 ^[20]	IDM 模型	IDM 模型+CACC 模型	STCA 模型	MOBIL 模型
组合模型 1	IDM 模型 ^[23]	CIDM 模型 ^[25]	MOBIL 模型 ^[26]	CMOBIL 模型 ^[27]
组合模型 2	EIDM 模型 ^[24]	CEIDM 模型	MOBIL 模型	CMOBIL 模型
组合模型 3	EIDM 模型	CEIDM 模型	MOBIL 模型	CMOBIL 自主换道模型+GT 协同换道模型

有研究^[14,15,20-22],仿真参数设置如表 5 所示。

3.2 异质交通流模型合理性评价

为了验证本文所建异质交通流模型的合理性,给出车道速度离散度和制动车辆平均减速度 2 个评价指标。车道速度离散度用于描述同一车道上行驶的车辆速度与平均速度的偏移程度;该值越小,说明该车道上行驶的车辆之间速度离散程度越小,交通流稳定性越好。制动车辆平均减速度用于描述交通流中车辆制动减速情况;该值越小,表示交通流稳定性及行车舒适性越好。评价指标计算公式如下:

$$SD = \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2 / (N - 1) \quad (8)$$

$$b_{total} = \sum_{t=1}^{T_s} \sum_{n=1}^{N_b} b_n, \bar{b} = b_{total} / N_b \quad (9)$$

式中:SD 为车道速度离散度, $m^2 \cdot s^{-2}$; v_i 为统计车道上第 i 辆车的速度, $m \cdot s^{-1}$; $\bar{v}$ 为该车道车辆的平均速度, $m \cdot s^{-1}$; N 为该车道上的车辆总数,辆; b_{total} 为制动车辆减速度总和, $m \cdot s^{-2}$; T_s 为仿真总时长, s; N_b 为制动车次,辆; b_n 为第 n 个制动车辆减速度, $m \cdot s^{-2}$; $\bar{b}$ 为制动车辆平均减速度, $m \cdot s^{-2}$ 。

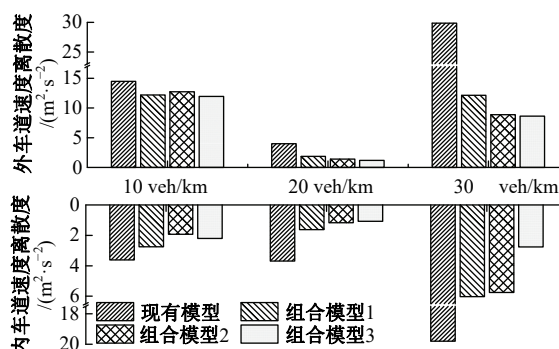
仿真实验中,交通流初始密度分别设为 10、20、30 veh·km⁻¹, CAV 渗透率分别设为 0.4 和 0.8,采集并计算上述评价指标,具体如图 5~图 7 所示。

由图 5 可知,相比于现有模型,3 种组合模型下车道速度离散度较小,其主要原因为现有模型中 CAV 跟驰与换道时仅考虑单个紧邻车辆的行驶状态,未能考虑周边多车的行驶状态,因此,交通流稳定性相对较弱。组合模型之间相比较可知,多数条件下组合模型 3 车道速度离散度最小,

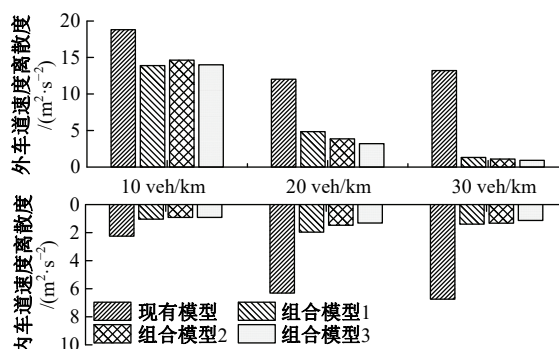
表 5 仿真模型参数

Table 5 Simulation model parameters

参数	小客车		大货车	
	HDV	CAV	HDV	CAV
T/s	1.5	1.1,0.6	2.0	1.1,0.6
长,宽/m,m	5,1.8	5,1.8	10,2.0	10,2.0
$v_l/(km \cdot h^{-1})$	120	120	85	85
s_0/m	2	2	4	4
$a/(m \cdot s^{-2})$	1.4	1.4	0.7	0.7
$b/(m \cdot s^{-2})$	2	2	2	2
δ	4	4	4	4
$\Delta a/(m \cdot s^{-2})$	0.3	0.3	0.3	0.3
ζ	0.10	0.10	0.10	0.10
$b_{safe}/(m \cdot s^{-2})$	-3	-3	-3	-3



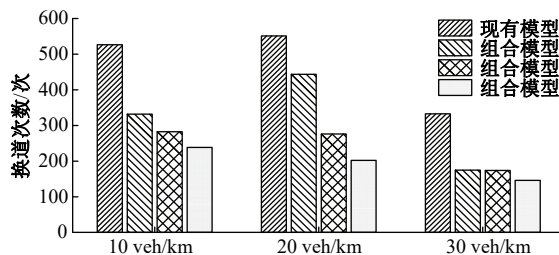
(a) CAV渗透率为0.4



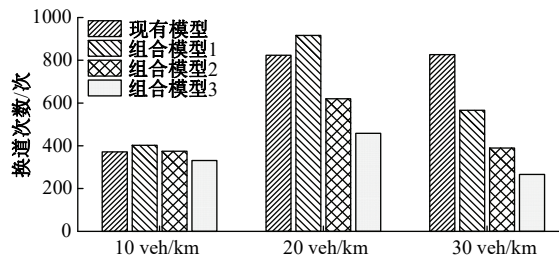
(b) CAV渗透率为0.8

图 5 车道速度离散度

Fig. 5 Lane speed dispersion



(a) CAV渗透率为0.4



(b) CAV渗透率为0.8

图 6 换道次数

Fig. 6 Number of lane-changing

组合模型 2 次之,组合模型 1 相对较高,这表明组合模型 2 和 3 中引用 EIDM 模型,相比于组合模型 1,交通流稳定性有所提高,与此同时,组合模型 3 进一步融入多车协同换道模型,CAV 换道决策时考虑与原前车和邻前车之间的整体收益,避免仅考虑自身收益而对整体不利的换道行为,因此,组

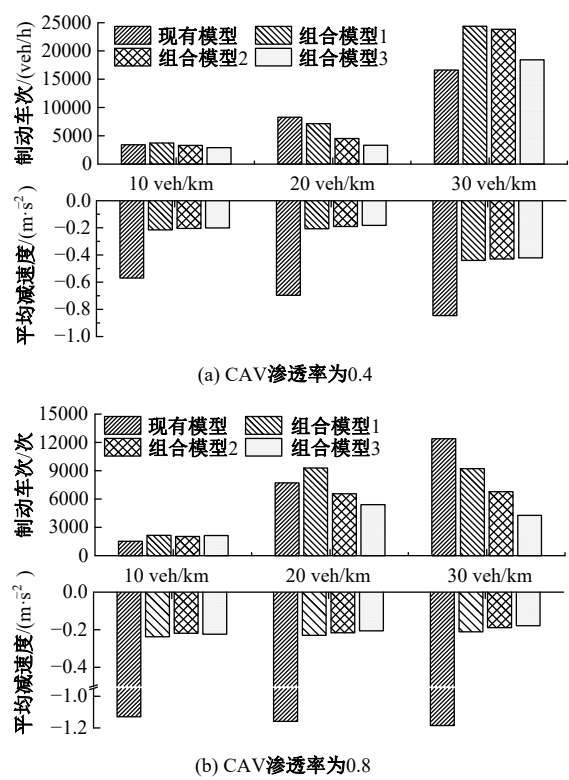


图 7 制动车辆数及平均减速度
Fig. 7 Number of braking vehicles and average deceleration

合模型 3 交通流稳定性更好。

由图 6 和图 7 可知,多数条件下组合模型 3 换道次数、制动车次及制动车辆平均减速度均最低,组合模型 2 次之,组合模型 1 和现有模型相对较高,同理说明组合模型 3 下换道次数减少,由此引起的制动车次减少,而且制动车辆平均减速度相对降低,进一步验证本文所建的交通流模型稳定性更好,且行车舒适性更高。

3.3 异质交通流运行特征分析

为了进一步分析异质交通流基本图特征,设置 CAV 渗透率(P)为 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0,交通流初始密度范围为 8~200 $\text{pcu}\cdot\text{km}^{-1}$,进行仿真试验,交通流基本图如图 8 和表 6 所示。

由图 8 和表 6 可知,交通流基本图趋势为随密度增长,速度逐渐降低,流量先增加后减少,交通流由自由流状态转为拥堵流状态;随着 CAV 渗透率 P 的提高,通行能力逐渐增强,尤其是在 CAV 渗透率达到 0.4 以上时,增幅明显;相比于 HDV 同质交通流, $P = 0.2$ 时通行能力提升 5.35%, $P = 0.4$ 时通行能力提升约 14.12%, $P = 0.6$ 时通行能力提升约 27.15%, $P = 0.8$ 时通行能力提升约 51.84%, $P = 1.0$ 时通行能力提升约

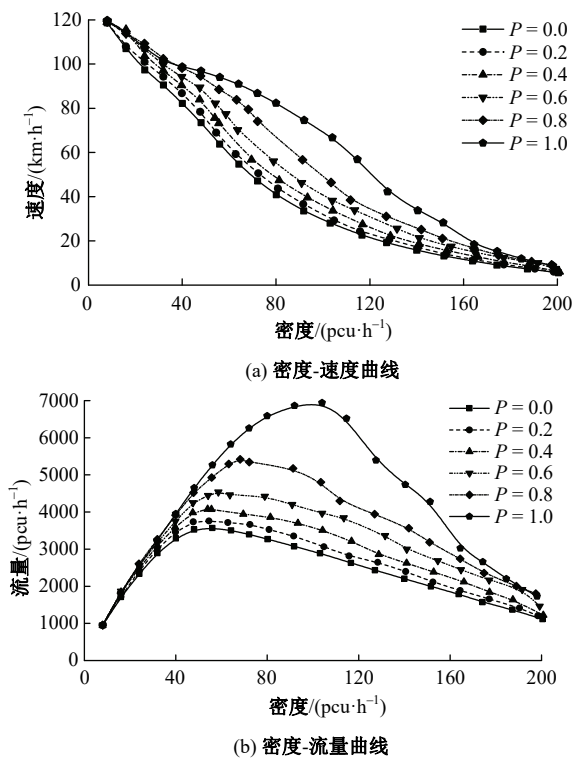


图 8 异质交通流基本图
Fig. 8 Fundamental diagram of heterogeneous traffic flow

表 6 交通流特征数据

CAV 渗透率	临界密度/ ($\text{pcu}\cdot\text{km}^{-1}$)	临界速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	通行能力/ ($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$)	通行能力提升率/%
0.0	56	63.79	3 569	—
0.2	54	69.02	3 760	5.35
0.4	56	73.25	4 073	14.12
0.6	59	77.41	4 538	27.15
0.8	68	79.47	5 419	51.84
1.0	104	66.75	6 941	94.48

94.48%。上述现象表明:随着 CAV 渗透率的提升,对通行能力产生了积极的影响,能够改善交通运行状况,这与文献[1,2]结果一致。为了进一步论证这一现象,选取 HDV 同质交通流的临界密度为 56 $\text{pcu}\cdot\text{km}^{-1}$,绘制不同 CAV 渗透率下的内、外侧车道时空轨迹图,如图 9 所示。

由图 8 可知,在相同密度条件下,随着 CAV 渗透率的提高,内、外侧车道的平均速度逐步加快,同样论证了 CAV 对交通运行状况产生正向影响。此外,由于大货车分布在外侧车道,导致外侧车道车流密度小于内侧车道,平均速度也偏低,而且随 CAV 渗透率的提高而差异变得更为明显。究其原因,CAV 车头时距较 HDV 小,而且 CAV 感知前后多车的行驶状态,能够较准确地判断内、

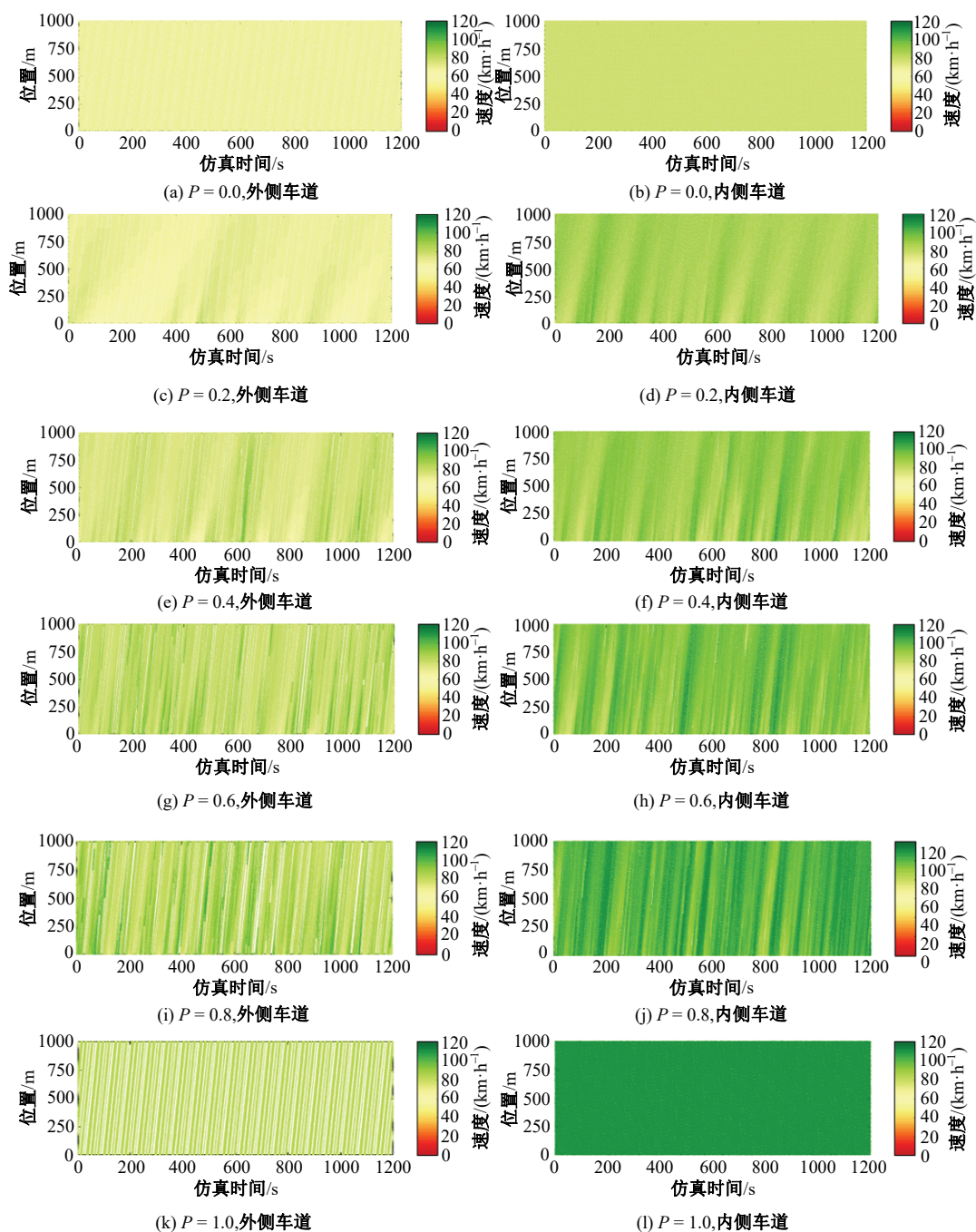


图9 车道时空轨迹图

Fig. 9 Lane space-time trajectory graph

外侧车道行驶环境优劣,并进行协同换道行驶。

4 结 论

(1)相比于现有交通流模型及现有跟驰与换道组合模型1和2,本文所建组合模型3(人工驾驶车辆EIDM跟驰模型+MOBIL换道模型和智能网联车辆CEIDM跟驰模型+CEIDM自主换道模型+GT协同换道模型)在交通流稳定性及行车舒适性等方面具有显著优势。

(2)由交通流运行特征分析可知,随着CAV渗透率的提高,高速公路通行能力逐步提升,因此,CAV对异质交通流具有显著的正向影响,能够改善交通运行状况。

(3)由车流时空轨迹分析可知,在相同密度条件下,随着CAV渗透率的提高,内、外侧车道车辆速度逐步提升,同样论证了CAV对交通运行状况具有正向影响。

参考文献:

- [1] Shladover S E, Nowakowski C, Lu X Y, et al. Co-operative adaptive cruise control: definitions and operating concepts[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2489(1): 145-152.
- [2] 贺正冰. 微观交通模型: 智能网联化转型与通用驾驶人模型框架[J]. 交通运输工程与信息学报, 2022, 20(2): 1-13.
He Zheng-bing. Microscopic traffic models: transformation in connected environment and generalized driver model[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2022, 20(2): 1-13.
- [3] Shladover S E, Su D Y, Lu X Y. Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2324(1): 63-70.
- [4] Milanes V, Shladover S E. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 48(1): 285-300.
- [5] Talebpour A, Mahmassani H S. Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 71(1): 143-163.
- [6] Cui S, Cao F, Yu B, et al. Modeling heterogeneous traffic mixing regular, connected, and connected-autonomous vehicles under connected environment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 99: 1-19.
- [7] 秦严严, 唐鸿辉, 杨金滢, 等. 混有网联车队的道路通行能力分析[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(1): 79-87.
Qin Yan-yan, Tang Hong-hui, Yang Jin-ying, et al. Analysis on road capacity of connected vehicle platoon on mixed traffic flow[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(1): 79-87.
- [8] 秦严严, 胡兴华, 李淑庆, 等. 智能网联环境下混合交通流稳定性解析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(3): 152-157.
Qin Yan-yan, Hu Xing-hua, Li Shu-qing, et al. Stability analysis of mixed traffic flow in connected and autonomous environment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(3): 152-157.
- [9] 马庆禄, 傅宝宇, 曾皓威. 智能网联环境下异质交通流基本图和稳定性分析[J]. 交通信息与安全, 2021, 39(5): 76-84.
Ma Qing-lu, Fu Bao-yu, Zeng Hao-wei. Fundamental diagram and stability analysis of heterogeneous traffic flow in a connected and autonomous environment [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021, 39(5): 76-84.
- [10] 李松, 张开碧, 李永福, 等. 理想诱导环境下的网联车与网联自动驾驶车混合交通流建模研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2023, 21(3): 31-58.
Li Song, Zhang Kai-bi, Li Yong-fu, et al. Modeling a mixed traffic flow of connected vehicles and connected autonomous vehicles in an ideal induction environment[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2023, 21(3): 31-58.
- [11] Yu Y, Liu S, Jin P J, et al. Multi-player dynamic game-based automatic lane-changing decision model under mixed autonomous vehicle and human-driven vehicle environment[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(4): 1-19.
- [12] 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.
- [13] 吴德华, 彭锐, 陈荣峰. 异质流网联车的不同换道集聚策略[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(2): 348-356.
Wu De-hua, Peng Rui, Chen Rong-feng. Hybrid characteristics of heterogeneous traffic flow under different aggregating lane-change strategies in intelligent network[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(2): 348-356.
- [14] 潘义勇, 王松. 网联自动驾驶环境下改进的加权 MOBIL 自主性换道决策模型[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2021, 40(5): 46-52.
Pan Yi-yong, Wang Song. Improved weighted MOBIL decision model for autonomous lane change in networked autopilot environment[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(5): 46-52.

- [15] 孙曼曼, 陈珍萍, 李海峰, 等. 基于博弈论的网联自动驾驶车辆协同换道研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(1): 161-166.
Sun Man-man, Chen Zhen-ping, Li Hai-feng, et al. Research on cooperative lane change of networked autonomous vehicles based on game theory[J]. Computer Simulation, 2023, 40(1): 161-166.
- [16] Ye L, Yamamoto T. Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 490(1): 269-277.
- [17] Zhou Y J, Zhu H B, Guo M M, et al. Impact of CACC vehicles cooperative driving strategy on mixed four-lane highway traffic flow[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 540(1): 1-25.
- [18] 郭静秋, 方守恩, 曲小波, 等. 基于强化协作博弈方法的双车道混合交通流特性[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2019, 47(7): 976-983.
Guo Jing-qiu, Fang Shou-en, Qu Xiao-bo, et al. Characteristics of mixed traffic flow in two-lane scenario based on cooperative gaming method[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(7): 976-983.
- [19] 梁军, 耿浩然, 陈龙, 等. 融入公交车与自动驾驶车队的异质交通流模型[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(5): 1090-1099.
Liang Jun, Geng Hao-ran, Chen Long, et al. Integrated heterogeneous traffic flow model of bus and autonomous vehicle platoon[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(5): 1090-1099.
- [20] 单肖年, 万长薪, 李志斌, 等. 智能网联环境下多车道异质交通流建模与仿真[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 74-84.
Shan Xiao-nian, Wan Chang-xin, Li Zhi-bin, et al. Modeling and simulation of multi-lane heterogeneous traffic flow in intelligent and connected vehicle environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(6): 74-84.
- [21] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Physical Review E, 2000, 62(2): 1805-1824.
- [22] Kesting A, Treiber M, Helbing D. Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2010, 368(1928): 4585-4605.
- [23] Guériau M, Billot R, Faouzin E E, et al. How to assess the benefits of connected vehicles? A simulation framework for the design of cooperative traffic management strategies[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 67(1): 266-279.
- [24] Kesting A, Treiber M, Helbing D. General lane-changing model MOBIL for car-following model[J]. Transportation Research Record, 2007, 1999(1): 86-94.
- [25] Nie J, Zhang J, Ding W, et al. Decentralized cooperative lane-changing decision-making for connected autonomous vehicles[J]. IEEE Access, 2017, 4(1): 9413-9420.
- [26] Gurupackiam S, Jones S L. Empirical study of lane changing in urban streets under varying traffic conditions[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2011, 16: 259-269.