混合交通流环境下车辆编队与碳排放特性

张文会，叶梅茹，席 聪，宋子文

（东北林业大学 土木与交通学院，哈尔滨 150040）

摘 要：针对混合交通流中传统模型难以精准刻画车队动态演化与人工驾驶车辆（HDV）异质行为交互的问题，提出了一种融合离散运动规则与动态编队演化的混合交通流建模框架。首先，设计离散运动安全距离模型，通过元胞间距整数决策规则解决连续加速度建模的失真问题；其次，构建基于马尔可夫链的车队规模转移概率矩阵，动态表征车队分裂、合并与重组过程；最后，基于多场景仿真数据量化队内车间距、反应时间、换道行为及车队规模对CO_2排放的影响机制。结果表明：当智能网联车辆（CAV）渗透率＞0.6时，编队模式才能有效改善混合交通流的运行状态，并显著降低CO_2排放，降幅达18.2%～25.1%；优化队内车间距可提升减排效率，减排峰值高达42.5%；换道策略需适配交通密度，低密度下提升HDV换道概率可实现碳减排，而高密度时CAV换道概率需控制在0.4～0.6；3～5辆编队规模为减排效率最优区间。本文揭示了队列动态参数对碳排放的作用机制，为智能网联车队协同控制策略优化及低碳交通系统设计提供了理论支撑。

关键词：交通运输系统工程；混合交通流；车辆队列；离散运动规则；动态演化；碳排放

中图分类号：U491 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2026)02-0416-15

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240775

Vehicle formation and carbon emission characteristics in mixed traffic flow environment

ZHANG Wen-hui, YE Mei-ru, XI Cong, SONG Zi-wen

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

Abstract: To address the limitations of traditional models in accurately characterizing the dynamic evolution of vehicle platoons and interactions with heterogeneous behaviors of human-driven vehicles (HDV) in mixed traffic flows, this paper proposes a hybrid traffic flow modeling framework integrating discrete motion rules and dynamic platoon evolution. First, a discrete motion safety distance model is developed to resolve the distortion problem in continuous acceleration modeling by introducing integer decision rules based on cellular spacing. Second, a platoon size transition probability matrix is constructed using Markov chains to dynamically characterize the splitting, merging, and reorganization processes of platoons. Finally, multi-scenario simulation data are employed to quantify the impact mechanisms of intra-platoon spacing, reaction time, lane-changing behavior, and platoon size on CO_2 emissions. The results indicate

收稿日期：2024-07-13.

基金项目：国家自然科学基金项目(52572369).

作者简介：张文会(1978-)，男，教授，博士. 研究方向：交通运输规划与管理. E-mail: rayear@163.com

that: When the CAV penetration rate exceeds 0.6, platoon mode can effectively improve the operational state of mixed traffic flow, and significantly reduces CO_2 emissions, with a reduction range of 18.2% to 25.1%; Optimizing intra-platoon spacing achieves a peak emission reduction of 42.5%; Lane-changing strategies must adapt to traffic density—enhancing HDV lane-changing probability under low density can achieve carbon emission reductions, while restricting CAV lane-changing probability to 0.4～0.6 under high density; Platoon sizes of 3～5 vehicles demonstrate optimal emission reduction efficiency. This paper reveals the mechanism of queue dynamic parameters on carbon emissions, and provides theoretical support for the optimization of intelligent connected fleet cooperative control strategies and the design of low-carbon transportation systems.

Key words: engineering of communication and transportation system; mixed traffic flow; vehicle platoon; discrete movement rules; dynamic evolution; carbon emissions

0　引　言

智能网联环境下，人工驾驶车辆（Human-driven vehicles，HDV）与智能网联车辆（Connected automated vehicle，CAV）混行的交通流将长期存在。CAV通过协同控制可以实现编队行驶，这种有组织、有计划的车队模式可以提高通行效率、减少油耗排放。但在混合交通流中，车辆队列的动态演化机制及其对CO_2排放的影响尚不明确，车辆队列的减排潜力亟待挖掘，因此本文聚焦智能网联车队动态特性对CO_2排放的作用机制。

在元胞自动机建模方面，传统研究存在模型离散性与运动连续性的矛盾。连续运动安全距离模型被广泛用于改进NaSch模型[1]，该安全距离模型基于连续运动假设，无法适配元胞离散空间，会导致混合交通流仿真中车辆加速度失真。针对编队建模，考虑混合交通流的特征，将车辆的跟驰模式分为3类，建立固定间距的智能网联车队模型[2]；进一步考虑队列实际行为特性，建立车队规模固定的元胞自动机模型[3]，但这些模型均采用静态车队规模假设。有学者假设路段上的车辆是周期性分布的，对车辆的分布特征进行描述[4]，提出一个统一的局部队列模型，以描述车辆的连接特征[5]，在此基础上提出3种不同空间排列特征的编队策略[6]，但这些模型均无法反映交通流中车队规模的随机分裂与重组过程。

关于车辆编队的能耗与排放研究，学者们主要通过试验与仿真手段探索影响因素。在风洞试验方面，有学者对车队的尾随行驶情况展开研究，分析车速、车间距[7]、车队规模[8]等因素对车队空气阻力系数及节油效果的影响；另有实验研究了三车编队行驶时的空气动力相互作用[9]，但未考虑动态编队场景。在数值模拟方面，有学者验证了增加混行比例[10]、缩小车间距[11]对降低油耗排放的积极作用，也有学者针对行驶工况进行队列油耗协同优化[12]；还有研究将队内车间距与燃油消耗相结合[13]，以实现燃油高效车辆编队，但该研究仍沿用预设编队参数。

上述研究存在3方面局限：①连续运动安全距离模型与元胞离散特性存在本质冲突，导致混合交通流仿真精度不足；②固定编队模型和周期性分布假设无法表征实际交通中车队规模的随机演化；③排放评估研究大多基于预设编队参数，未能建立动态车队特征与碳排放的定量关联机制。这些缺陷严重制约了智能网联车队减排潜力的准确评估。

因此，本文提出了一种融合离散运动规则与动态编队演化的混合交通流建模框架，以实现混行场景的精细化模拟，并基于微观轨迹数据量化队列特征参数对CO_2排放的影响权重。相较于现有研究，离散运动安全距离模型将连续加速度计算转换为基于元胞间距的整数决策规则，可以消除连续运动假设引起的仿真偏差；建立的基于状态转移概率的车队规模动态预测模型，可以实时捕捉车队分裂、合并与重组的过程。研究成果可为智能网联车队控制策略优化提供理论支持，并为大规模CAV背景下的交通系统碳减排提供新的分析维度。

1　双车道混合交通流建模

1.1　车辆跟驰模型

当路段上同时存在HDV和CAV时，车辆之间的跟驰模式可以根据其特性与交互方式划分为传统人工车辆（Regular vehicle，RV）跟驰模式、自

适应巡航控制(Adaptive cruise control,ACC)跟驰模式和协同自适应巡航控制(Cooperative adaptive cruise control,CACC)跟驰模式3种类型[14]。本文定义ACC模式包含2种情况:①本车为CAV,前车为HDV;②本车为CAV,前方为达到最大规模的车队或不满足车队规模转移概率的车队。

1.1.1 离散运动安全距离模型

当前方车辆紧急制动时,后方车辆为了避免与其发生追尾,必须保持一个安全距离,这与车辆的制动性能和驾驶员的反应时间有关,安全距离的计算基于元胞自动机模型的离散化。

考虑到元胞自动机模型的离散性,紧急制动期间,前车从开始减速至停止,总行驶距离为:

$$S_{n+1}=\left[v_{n+1}(t)-b\right]+\left[v_{n+1}(t)-2b\right]+\cdots+\left[v_{n+1}(t)-\alpha_{n+1}b\right] \tag{1}$$

式中:$\alpha_{n+1}=\dfrac{v_{n+1}(t)}{b}$为前车$n+1$紧急制动至完全停止所用时间;$v_{n+1}(t)$为$t$时刻前车$n+1$的速度;$b$为车辆的制动减速度。

当前车开始紧急制动时,当前车辆经过一定反应时间后,也会开始紧急制动,直至停止,这段时间的总行驶距离为:

$$S_n=\tau_n v_n(t)+\left[v_n(t)-b\right]+\left[v_n(t)-2b\right]+\cdots+\left[v_n(t)-\alpha_n b\right] \tag{2}$$

式中:S_n为车辆n经过一定时间反应紧急制动至完全停止所行驶的距离;τ_n为车辆n的反应时间,根据车辆类型不同,可以分为τ^{HDV}和τ^{CAV};$\alpha_n=\dfrac{v_n(t)}{b}$为车辆$n$紧急制动至完全停止所用时间;$v_n(t)$为$t$时刻车辆$n$的速度。

安全距离是指前车突然制动时,后方车辆在该距离的保护下做出反应,确保停车时两车不会发生碰撞,如图1所示。安全距离的计算公式为:

$$d_{n,\mathrm{safe}}=S_n-S_{n+1}=\tau_n v_n(t)+v_n(t)\alpha_n-v_{n+1}(t)\alpha_{n+1}+\frac{\alpha_{n+1}(b+b\alpha_{n+1})-\alpha_n(b+b\alpha_n)}{2} \tag{3}$$

式中:$d_{n,\mathrm{safe}}$为车辆n和前车$n+1$之间的安全距离。

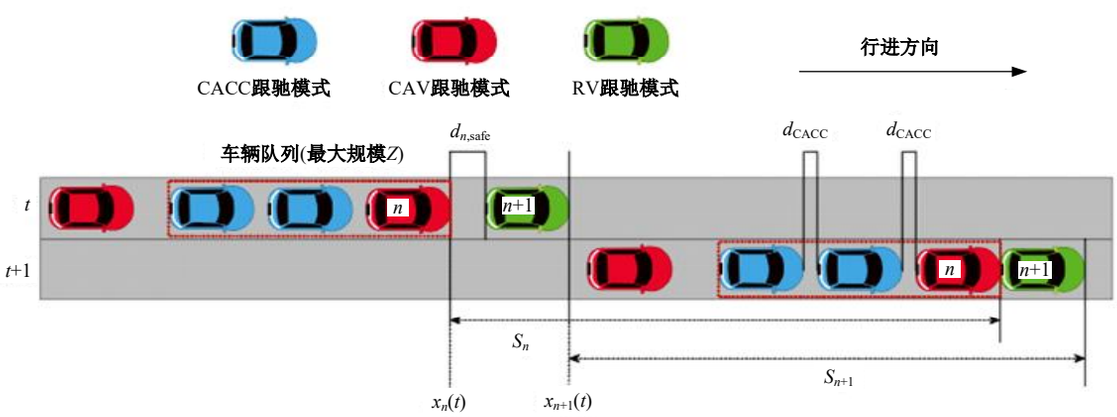


图1 安全距离示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the safety distance

根据安全距离,计算车辆避免与前车发生碰撞需要行驶的安全速度,可得:

$$v_{n,\mathrm{safe}}=\frac{b_n(1-2\tau_n)}{2}+b_n\sqrt{\frac{(2\tau_n-1)^2}{4}+\frac{2\left(d_n+\dfrac{v_{n+1}^2(t)}{2b_n}-\dfrac{v_{n+1}(t)}{2}\right)}{b_n}} \tag{4}$$

式中:$v_{n,\mathrm{safe}}$为车辆n避免与前车$n+1$发生碰撞的安全速度;$d_n=x_{n+1}(t)-x_n(t)-l_{n+1}$为车辆$n$与前车$n+1$之间的距离,其中$x_n$与$x_{n+1}$分别为车辆$n$与前车$n+1$的位置,$l_{n+1}$为前车$n+1$的车身长度。

1.1.2 元胞自动机更新规则

将元胞自动机更新规则与离散运动安全距离模型相结合,针对RV和ACC模式的特点,构建跟驰模型。

(1)加速

针对HDV和ACC跟驰模式,当车辆n与前车$n+1$之间的距离$d_n>d_{n,\mathrm{safe}}$时,车辆n可为追求更高的速度而加速。加速规则如式(5)所示:

$$v_n(t+1)=\min\left[v_n(t)+a,v_{\max},v_{n,\mathrm{safe}},d_n\right] \tag{5}$$

式中:$v_{\max}$为车辆的最大速度。

(2)减速

当车辆n与前车$n+1$之间的距离$d_n\leqslant d_{n,\mathrm{safe}}$

时，车辆会平稳地降低速度，以维持与前方车辆的安全距离。减速规则如式(6)所示：

$$v_n(t+1)=\min(v_{n,\text{safe}},d_n) \tag{6}$$

(3)随机慢化

考虑到人类驾驶员的不稳定因素，HDV将会产生随机慢化，具体表现为不规律地减速，因此引入随机化概率$P_{\text{slow}}=0.3$。由于CAV中不存在不稳定因素，因此ACC模式下的车辆没有随机化过程。随机慢化规则如式(7)所示：

$$x_n(t+1)=x_n(t)+v_n(t+1) \tag{7}$$

(4)位置更新

在下一个时间步长的速度被更新之后，车辆n的位置更新规则如式(8)所示：

$$v_n(t+1)=\max\left[v_n(t)-b,0\right] \tag{8}$$

1.2　车辆编队模型

1.2.1　基于马尔可夫链的车队规模转移概率计算

本文定义同方向、同车道上连续分布的CAV可以组成柔性车队，但需要通过判断车队规模和车队规模转移概率，以决策下一时刻当前车辆能否与前车组成新的车队。利用马尔可夫性计算车队规模转移概率，即通过当前的车队规模信息，预测下一时刻车队规模的变化概率。在混合交通流元胞自动机模型中，元胞代表离散的个体，车队规模和交通流状态的演化仅受当前状态的影响，车队规模转移矩阵可以准确模拟智能网联车队的动态演化过程。车队规模状态转移矩阵如式(9)所示：

$$\boldsymbol{P}=(p_{ij})=\begin{pmatrix}p_{11}&\cdots&p_{1Z}\\ \vdots&\ddots&\vdots\\ p_{Z1}&\cdots&p_{ZZ}\end{pmatrix} \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{P}$为车队规模状态转移矩阵；Z为智能网联车队最大车队规模；i为当前时刻的车队规模，j为下一时刻的车队规模；p_{ij}为车队规模i转移为车队规模j的概率。

将当前CAV或智能网联车队视为一个服务台，CAV或车队追击前方规模为i的车队的过程视为一个队长限制为$Z-i$的排队过程，可以利用M/M/1/N排队模型计算车队规模转移概率。本文定义车队形成后不再解散，即车队规模不能向更小转移，当$i>j$时，$p_{ij}=0$；且车队达到最大规模Z后，车队规模不再发生改变，即$p_{ZZ}=1$。p_{ij}的计算公式为：

$$p_{ij}=\frac{1-\rho}{1-\rho^{Z-i}}\cdot\rho^{j-i},\ i\leqslant j\leqslant Z \tag{10}$$

式中：$\rho=\lambda/\mu$为服务强度；λ为CAV的到达率；μ为车队的服务效率，即CAV以期望速度通过一个元胞的时间。

当前车队(CAV)的规模转移概率可由车队规模转移向量得到：

$$\boldsymbol{X}_{n,0}=\underbrace{(0\cdots1\cdots0)}_{Z-1\text{个}0,\text{第}Z_i\text{个元素为}1} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{X}_{n,t+1}=\boldsymbol{X}_{n,t}\times\boldsymbol{P} \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{n,0}$为初始状态向量；Z_i为当前车辆所在车队的规模；$\boldsymbol{X}_{n,t}$为t时刻车辆n的车队规模转移概率向量。

1.2.2　车队演化规则

结合前文得到的车队规模转移概率向量，建立元胞自动机条件下智能网联车队演化规则。

(1)车队形成规则

假设当前车队(或CAV)规模为Z_1，前方车队(或CAV)规模为Z_2，若随机数小于转移概率$P_{Z_1+Z_2,t}(Z_1+Z_2)$，同时新车队规模小于最大规模，则当前CAV(或车队头车)速度更新，追上前方车队组成新的车队。车队形成规则如式(13)所示：

$$\text{rand}()<\boldsymbol{X}_{Z_1+Z_2,t}(Z_1+Z_2)$$
$$v_n(t+1)=\min\begin{bmatrix}v_n(t)+a,v_{\max},\\ d_n+v_{n+1}(t)-d_{\text{CACC}}\end{bmatrix} \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{Z_1+Z_2,t}(Z_1+Z_2)$为$t$时刻前方车队头车$Z_1+Z_2(Z_1+Z_2<Z)$的车队规模转移概率向量；$d_{\text{CACC}}$为队内车间距，设为定值；rand()为随机数。

(2)车队运行规则

本文建立以车队头车为中心的车队运行规则，头车的运行遵循元胞自动机模型运行规则，队内其他车辆的速度更新与车队头车保持一致。当前车辆n(或车队头车)与前车$n+1$的间距$d_n=d_{\text{CACC}}$时，二者形成稳定车队，队内车辆的速度更新为与新车队头车保持一致。当前方车队规模为K_2时，车队运行规则如式(14)所示：

$$v_n(t+1)=v_{n+1}(t+1)=\cdots=v_{n+K_2}(t+1) \tag{14}$$

1.3　车辆换道模型

在多车道行驶中，车辆为了提升行驶效率，往往采取换道行为进行超车，避免过度受制于前车的行驶状态。当车辆自身所处车道条件无法满足期望速度时，若观察到目标车道有更好的驾驶环境并有望达到期望速度，则会产生换道动机。HDV的驾驶员会对周围环境进行综合判断，在满足安全条件的前提下以一定的换道概率执行换道行为；CAV通过传感器和通信系统收集周围车辆

的行驶状态参数进行安全换道。考虑到车辆队列协同换道的安全性,本文换道行为仅针对RV和ACC模式下的车辆。

换道动机为:

$$\begin{cases} d_n < \min\left[v_n(t)+a, v_{\max}\right] \\ d_{n,\text{other}} > d_n \end{cases} \tag{15}$$

式中:$d_{n,\text{other}}$为车辆n与拟换入相邻车道的紧邻前车的车间距离。

HDV安全条件为:

$$d_{n,\text{back}} > 1 + v_{\max} - \min\left[v_n(t)+a, v_{\max}\right] \tag{16}$$

式中:$d_{n,\text{back}}$为车辆n与拟换入相邻车道的紧邻后车的车间距离。

CAV安全条件为:

$$d_{n,\text{back}} > 1 + \min\left[v_{n+1}(t)+a, v_{\max}\right] - \min\left[v_n(t)+a, v_{\max}\right] \tag{17}$$

实际上,并非所有满足换道条件的车辆都会换道,因此设置换道概率P_{change}。由于CAV具备对交通环境的全面感知和精确判断能力,且不受人类驾驶员自身生理状态、心理变化或情绪干扰等因素的影响,相较于HDV更有可能换道。据此,设置HDV的换道概率$P_{\text{change}}=0.2$,CAV的换道概率$P_{\text{change}}=0.5$。

2 混入智能网联车队的交通流仿真

2.1 仿真环境设置

以一段2 km的双车道高速公路为例,采用开放式边界条件。元胞的长度设定为1 m,模拟时间步长设置为1 s,仿真运行4 000步(4 000 s),前2 000 s用于消除瞬态效应,记录后2 000 s的稳态数据。依据实测数据,根据车辆到达率生成车辆。拟定双车道车辆到达率为0.772 9,即60 s内双车道车辆到达数量服从均值为46.374的泊松分布[15]。

本文车辆参数设置仅针对普通乘用车,HDV和CAV的车身长度设置为5 m,依据实际高速公路限速规则设置最大行驶速度为33 m/s,约为120 km/h。队内车间距d_{CACC}设为固定值,在本文中取3 m,最大车队规模Z设置为6辆。车辆动力学特性中,普通乘用车在干燥路面的典型加速度为2~4 m/s^2,本文取中间值3 m/s^2,以平衡动力性能与燃油经济性;以干燥路面附着系数$\phi=0.5$计算得到制动减速度为4.9 m/s^2,取整为5 m/s^2。人类驾驶员面对从简单到复杂的刺激,所需的反应时间为0.2~1.5 s,本文设置HDV反应时间为1.4 s,以覆盖多数情况;CAV反应时间设置为0.5 s,包含传感器处理延迟(0.3 s)和V2V通信延迟(0.2 s)。具体参数设置如表1所示。

表1 仿真参数值

Table 1 Parameter value in simulation

参数	符号	数值
车身长度/m	l_{n+1}	5
最大速度/(m·s^{-1})	$v_{\max}$	33
队内车间距/m	d_{CACC}	3
最大车队规模/辆	Z	6
期望加速度/(m·s^{-2})	a	3
制动减速度/(m·s^{-2})	b	5
HDV反应时间/s	τ^{HDV}	1.4
CAV反应时间/s	τ^{CAV}	0.5

2.2 仿真结果分析

2.2.1 基本图分析

为了合理描述CAV渗透率对交通流特征的影响,对不同CAV渗透率场景进行多次仿真实验,并基于仿真数据绘制速度-密度关系图(如图2所示)和流量-密度关系图(如图3所示),彩图参见电子版,以下同。

随着密度的逐步提升,车辆的平均速度呈现出明显下降趋势。当密度<10辆/km时,混合交通流的平均速度保持高度稳定状态,此时交通流的运行状况良好,在这一密度范围内CAV渗透率对速度和流量的影响不显著。随着密度的增加,CAV的效应愈发显著,在相同密度下,CAV渗透率越高,车辆的平均速度也相应提升。

密度-流量图在不同CAV渗透率下呈现出与交通格林希尔兹模型相符的特征,即随着车流密度的逐步攀升,交通流量起初呈现明显的增长态势,而当车流密度达到某一特定阈值时,交通流量

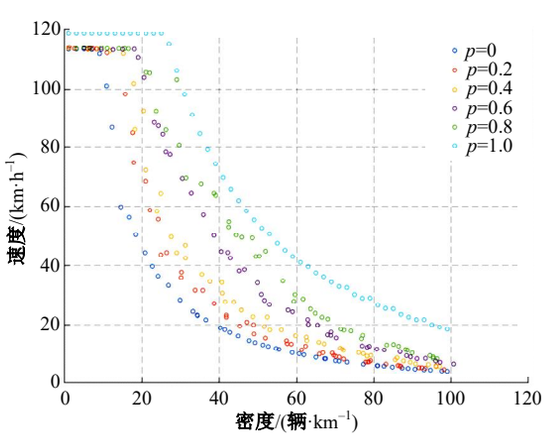


图2 速度-密度基本图

Fig. 2 Velocity-density fundamental diagram

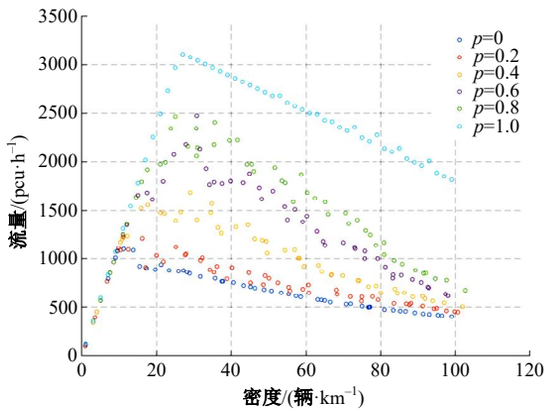


图 3　流量-密度基本图

Fig. 3　Flow-density fundamental diagram

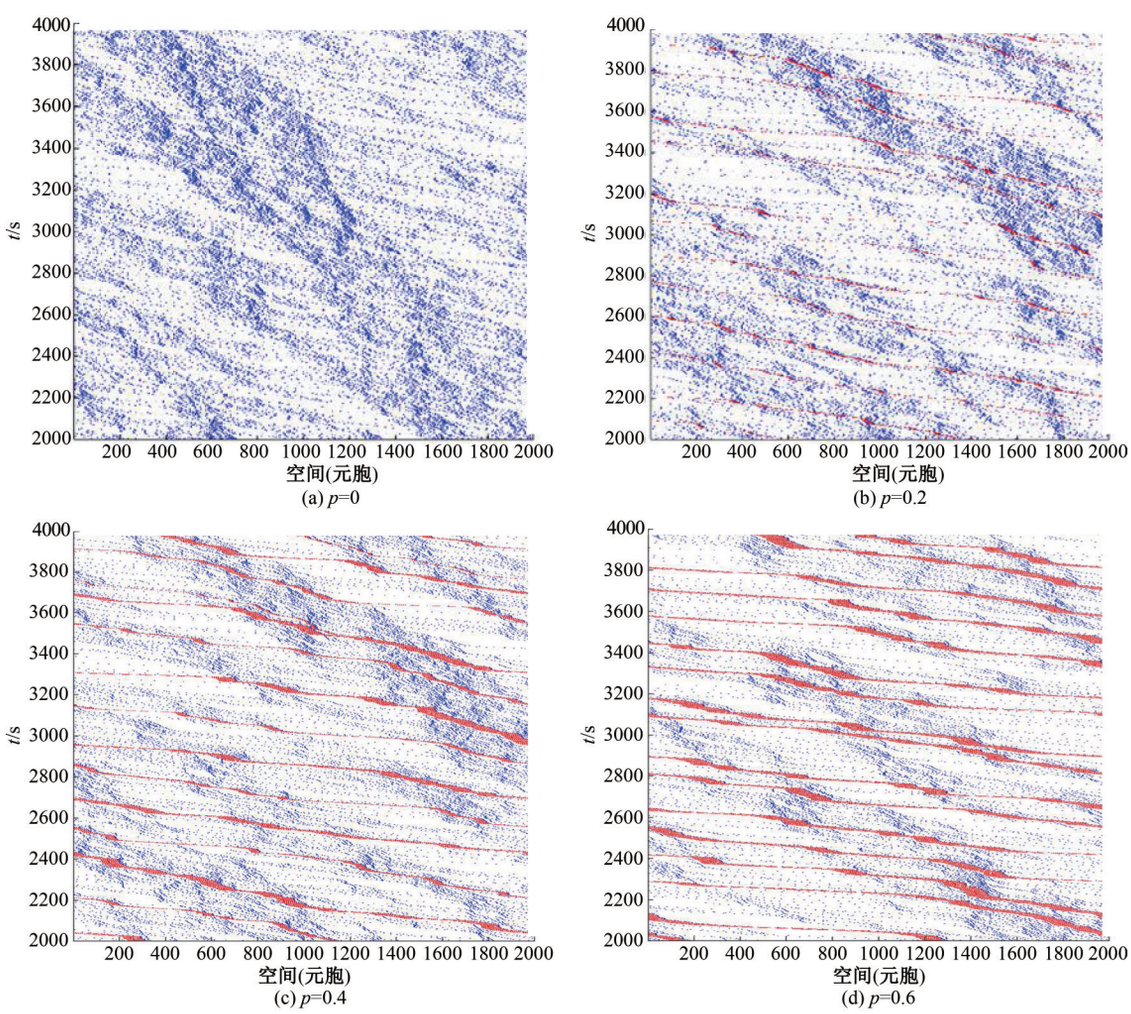
则开始逐渐回落。这一趋势反映了交通流从自由流状态向拥堵流状态的转变过程。当交通流处于车流密度较小的自由流区域时，不同CAV渗透率下的交通流量差异并不显著。这是因为在自由流状态下，车辆之间的相互作用较小，交通流的运行状态主要受到道路条件、车辆性能等基本因素影响，此时CAV对道路通行能力的影响相对较小。当交通流进入车流密度较大的拥堵流区域时，不同CAV渗透率下的交通流量开始出现明显差异。随着CAV渗透率的增加，对应的交通流量也呈现出增大的趋势。这是由于CAV能够更好地协同行驶，减少拥堵和碰撞的风险，从而提升交通流的效率。因此，在高密度拥堵状态下，CAV的引入对提升道路通行能力具有显著且积极的效果。

2.2.2　时空图分析

通过数值仿真实验可得不同CAV渗透率下的时空演化斑点图，能够直观展示交通流随时间和空间变化的动态过程。在斑点图中，横轴代表车辆的空间位置，纵轴代表时间，白色代表未被占用的元胞（即道路上的空闲空间），蓝色代表HDV，红色代表CAV。

（1）低密度（20辆/km）状态下不同CAV渗透率的时空图（如图4所示）

在时空图中，阴影区域直观反映了车辆拥堵的地点，图4(a)中存在大片阴影区域，表明全HDV交通流即使在车流密度较低的情况下，也会频发拥堵，并产生走走停停的现象。随着CAV渗



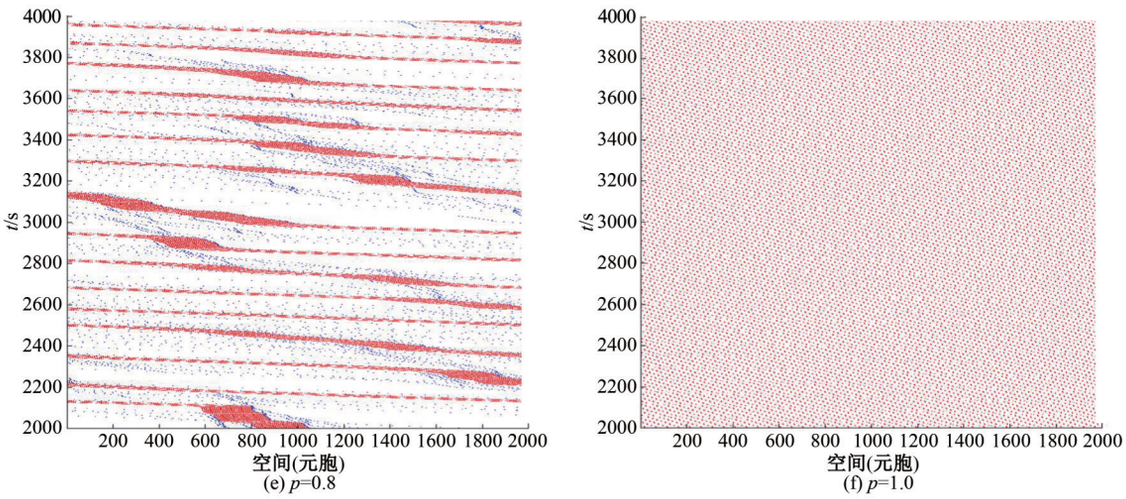


图4 低密度状态不同CAV渗透率下的时空图

Fig. 4 Space-time diagram of different CAV permeability in low density states

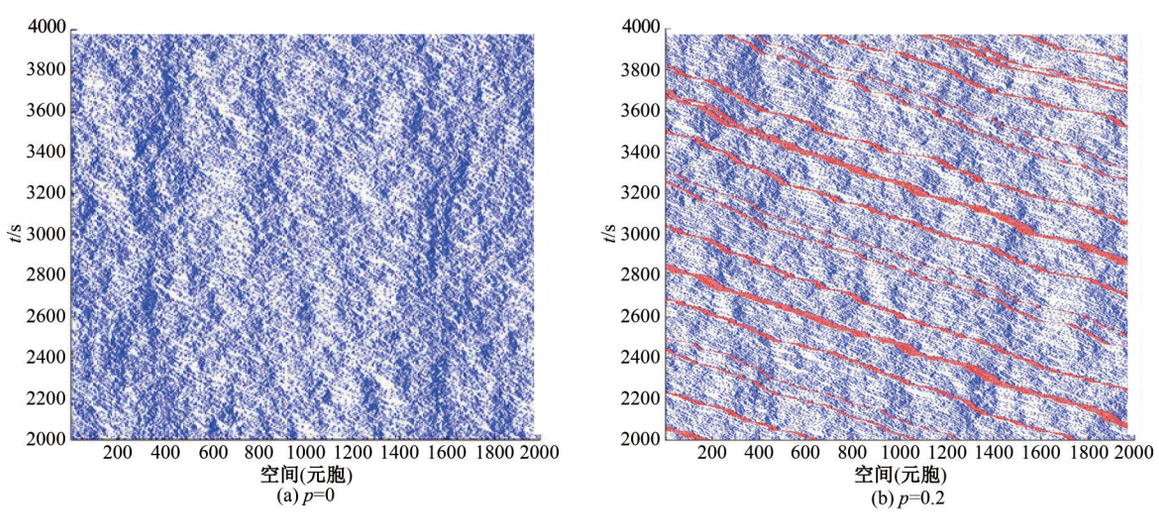
透率的逐步提升,车辆拥堵和走走停停现象逐渐得到缓解。相较于图4(a)~(c)中出现的较宽拥堵带,图4(d)中的拥堵现象更为分散,这表明CAV的引入有效抑制了拥堵向上游扩散的趋势。图4(d)、(e)中阴影区域显著减少,这表明随着CAV的大幅提升,车辆结队行驶的现象愈发普遍。结队行驶的CAV车间距较小,使得车道中形成了大量连续的未被车辆占用的空间,从而极大地提升了车道的通行效率。当p=1.0时,车道上全部为CAV,交通流始终保持畅通无阻的自由流状态,彻底消除了拥堵和走走停停现象。

(2)高密度(70辆/km)状态下不同CAV渗透率的时空图(如图5所示)

在高密度状态下,时空图普遍存在大片连续的阴影区域,说明交通流发生了显著拥堵。在这种状态下,一旦拥堵形成,由于其高密度特性,拥堵现象往往短时间内很难消散,而且会对后方车流产生显著的连锁反应。观察时空图阴影区域分布可知,无论是HDV还是CAV组成的车队,一旦形成拥堵,均会很快向上游传播,形成较宽的拥堵带。图5(a)~(e)中,虽然CAV渗透率逐渐增加,但车道上还存在大量HDV,受HDV随机慢化和换道行为的影响,交通流中仍会存在明显拥堵,交通流的运行状况无法得到显著改善。图5(f)为高密度下的全CAV交通流,相较于图4(f)低密度下的全CAV交通流,车道中未被车辆占用的元胞大量减少,说明在高密度下,所有CAV以较小的车间距结队行驶。

2.2.3 速度波动图分析

在密度为60辆/km时,对不同CAV渗透率的交通流进行数值仿真,得到速度波动图,如图6所示。其中不同颜色代表车辆的不同速度,由蓝色变为黄色的过程为速度增大的过程。该图展示了车辆速度在时间和空间上的变化,即交通振荡,可以反映出交通流稳定性的变化情况。



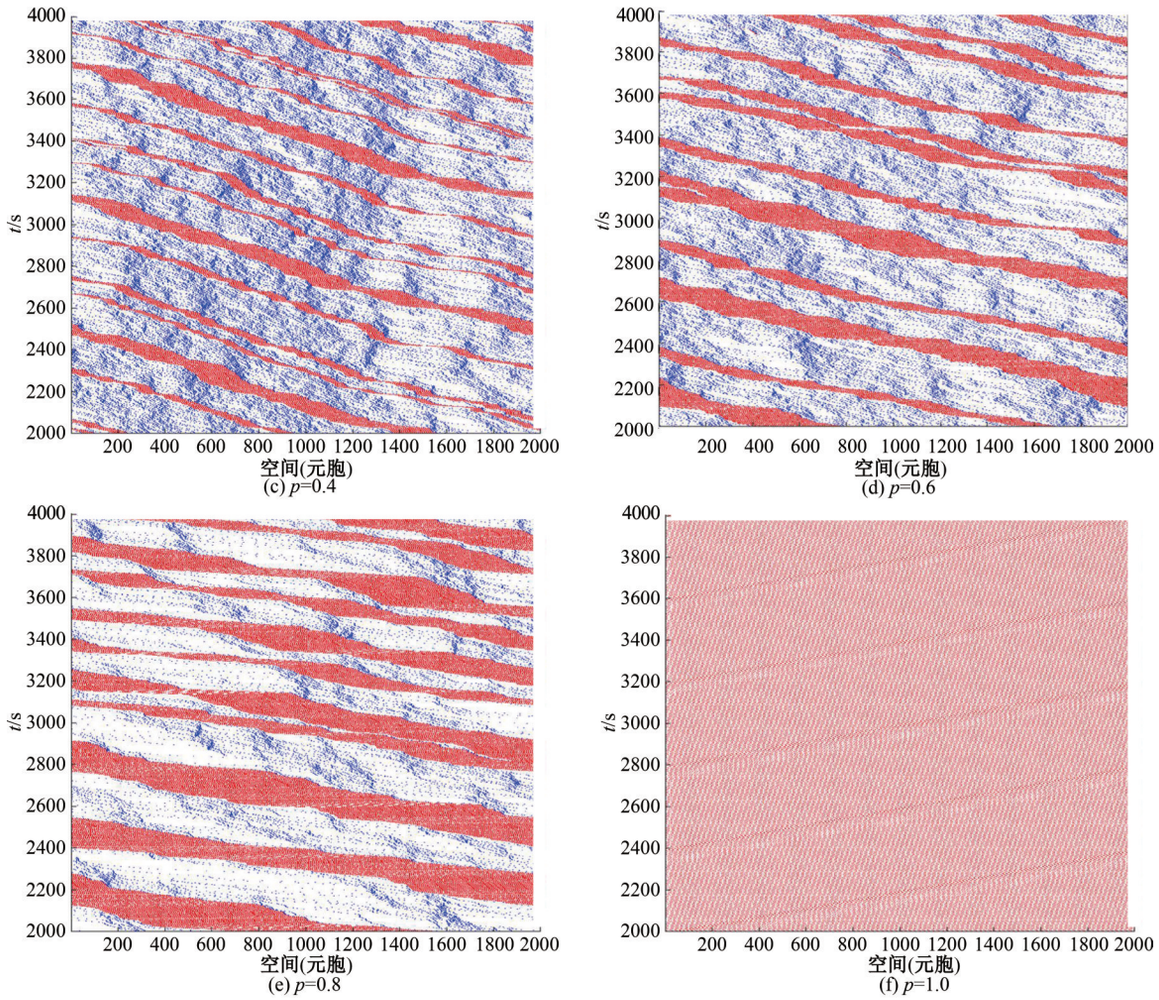
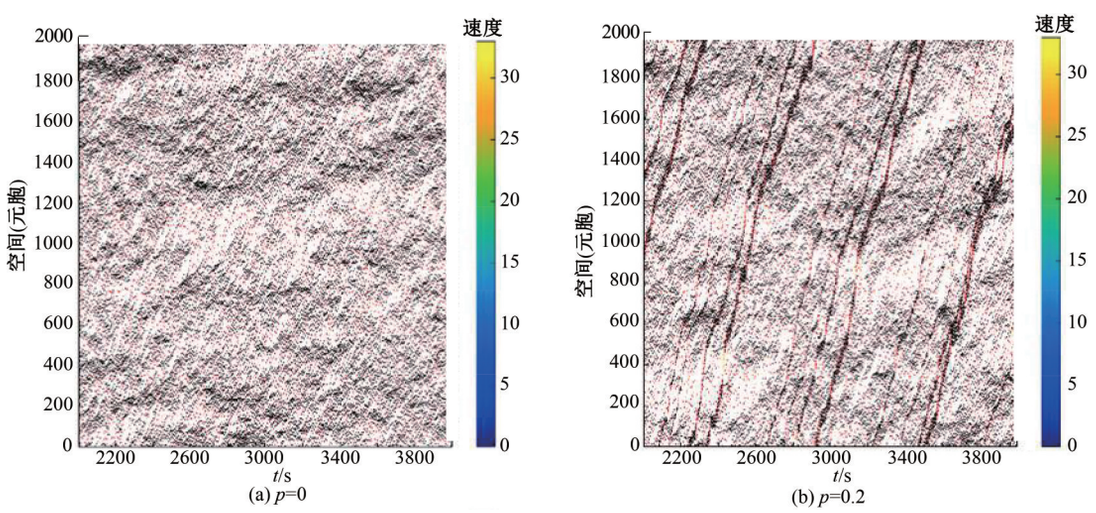


图 5　高密度状态不同 CAV 渗透率下的时空图

Fig. 5　Space-time diagram of different CAV permeability in high density states

图 6(a)～(c)均对应 CAV 渗透率较低的状态，此时图中深色阴影区域分布广泛，说明车速出现急剧的波动与变化，车辆呈现时走时停状态，在这种状态下车辆频繁加减速会导致更大的油耗和尾气排放。图 6(b)、(c)呈现明显的阴影带，此时 CAV 车队出现了速度波动，由于头车受到的扰动会向车队中的跟驰车辆快速传播，导致整个车队的速度呈现明显振荡。由图 6(d)、(e)可知，随着 CAV 渗透率的大幅提升，车速也显著上升，且图中出现了较宽的阴影带，这是由于车队数量的增



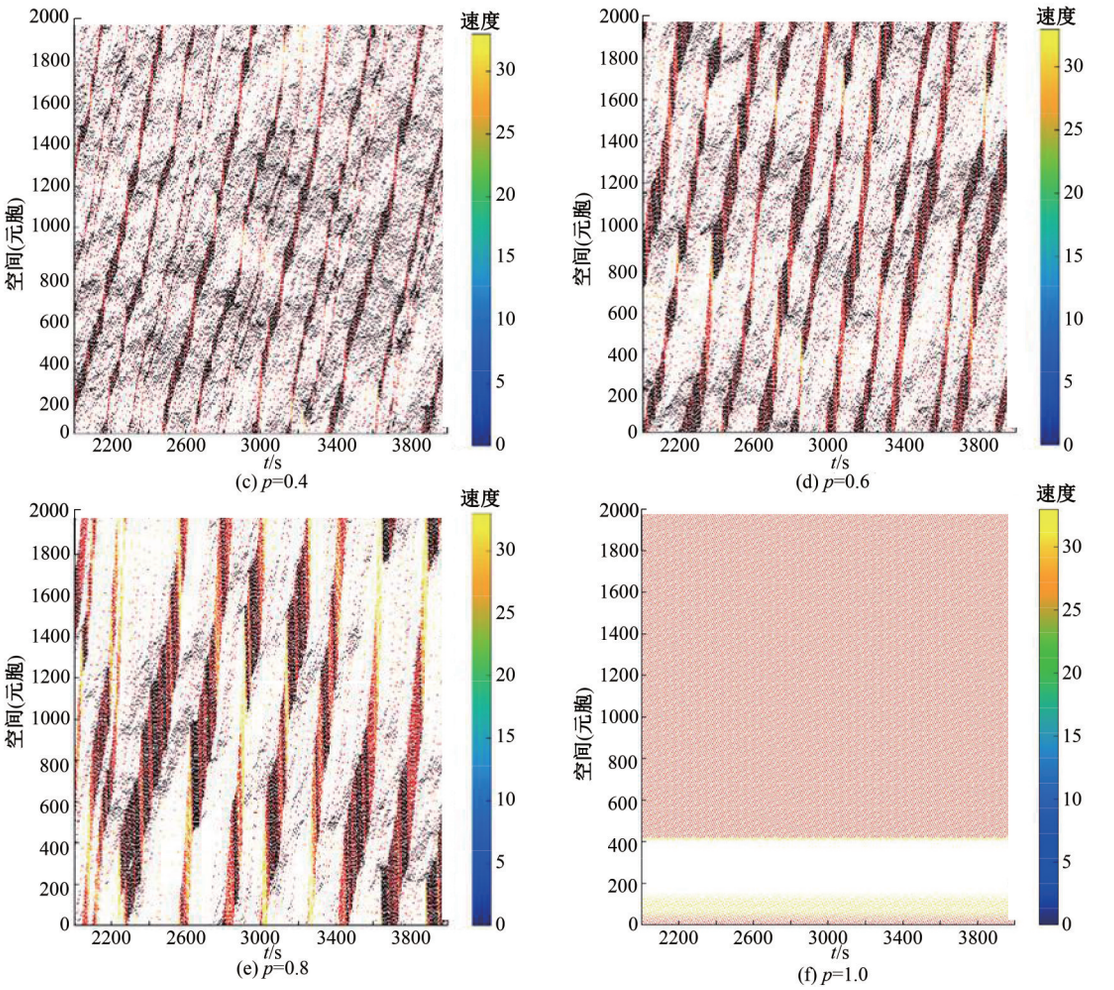


图6 不同CAV渗透率下的速度波动图

Fig. 6 Velocity fluctuation diagram under different CAV permeability

多,导致车队速度的振荡增强;图6(e)中的阴影带普遍较短,说明在高CAV渗透率下,交通拥堵会很快消散,车队能够较快恢复高速行驶。图6(f)为全CAV交通流状态,此时所有车辆的速度基本保持一致,交通流达到稳定状态。

3 碳排放测算与敏感性分析

3.1 碳排放模型

本文采用基于车辆瞬时速度和加速度的微观排放(VT-Micro)模型[16]计算车辆CO_2排放。该模型结构简单,与实际数据吻合度较高,适用于交通流仿真的车辆CO_2排放评估。模型公式为:

$$\ln \mathrm{MOE}_e=\begin{cases}\sum_{i=0}^{3}\sum_{j=0}^{3}K_{i,j}^{e}v_n^i a_n^j, & a_n\geqslant 0\\ \sum_{i=0}^{3}\sum_{j=0}^{3}K'^{e}_{i,j}v_n^i a_n^j, & a_n<0\end{cases} \tag{18}$$

式中:MOE_e为瞬时能耗;a_n为车辆n的瞬时加速度;$K_{i,j}^{e}$为$a_n\geqslant 0$时的回归系数;$K'^{e}_{i,j}$为$a_n<0$时的回归系数。

计算CO_2排放的相关系数,如表2所示。

T时段内车辆n的CO_2总排放量记为E_{CO_2},具体计算公式为:

$$E_{CO_2}=\frac{\sum_{t=0}^{T}\mathrm{Exp}(\ln \mathrm{MOE}_e)}{L_n}\times 1\,000 \tag{19}$$

式中:E_{CO_2}为T时段内车辆n的CO_2总排放量;L_n为T时段内车辆n行驶的距离。

3.2 模型验证

本文采用SUMO软件对碳排放模型的精度进行验证。城市交通仿真(Simulation of urban mobility,SUMO)是一款开源的微观交通仿真平台,被广泛应用于交通流模拟、排放评估及智能交通系统研究。SUMO内置的排放模型已通过车载排放监测系统(Portable emission measurement system,PEMS)实测数据验证,CO_2排放量测算误差

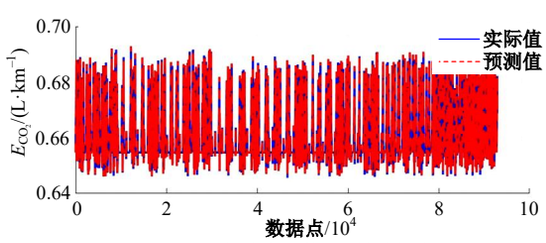
表 2　CO_2排放的相关系数 $K^e_{i,j}(K'^e_{i,j})$

Table 2　Correlation coefficient $K^e_{i,j}(K'^e_{i,j})$ of CO_2 emission　　mL·s^{-1}

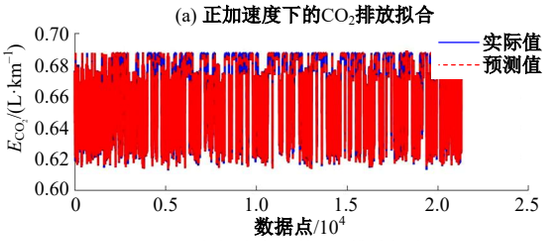
$K^e_{i,j}(K'^e_{i,j})$		$j=0$	$j=1$	$j=2$	$j=3$
$a\geqslant 0$	$i=0$	6.916	0.217	2.345×10^4	-3.639×10^4
	$i=1$	0.027 54	0.968×10^2	-0.175×10^2	8.35×10^5
	$i=2$	-2.070×10^4	$-1.013\,8\times10^4$	1.966×10^5	-1.02×10^6
	$i=3$	9.80×10^7	3.66×10^7	-1.08×10^7	8.50×10^9
$a<0$	$i=0$	6.915	−0.032	-9.17×10^3	-2.886×10^4
	$i=1$	0.028 4	8.53×10^3	1.15×10^3	-3.06×10^6
	$i=2$	-2.266×10^4	-6.594×10^5	-1.289×10^5	-2.68×10^7
	$i=3$	1.11×10^6	3.20×10^7	7.56×10^8	2.95×10^9

在±7%以内。为评估VT-Micro模型预测CO_2排放的准确性，本文在SUMO仿真平台构建测试场景，并进行CO_2排放的对比验证，结果如图7所示。

验证结果显示，VT-Micro模型对车辆正加速度工况的CO_2排放预测误差较低，其平均绝对误差（Mean absolute error，MAE）为0.000 363 9，均方根误差（Root mean square error，RMSE）为0.000 654 44；对负加速度工况的预测误差略高于正加速度工况，MAE为0.000 647 4，RMSE为0.001 102 6。结果表明，VT-Micro模型在不同工况下的CO_2排放预测中均表现出较高精度，尤其在正加速度工况下表现优异，验证了该模型在混合交通流CO_2排放评估中的适用性。



(a) 正加速度下的CO_2排放拟合



(b) 负加速度下的CO_2排放拟合

图 7　不同工况下的 CO_2 排放拟合

Fig. 7　CO_2 emission fitting across different operating condition

3.3　碳排放测算

为了探究智能网联车队对车辆CO_2排放的影响，本文通过数值仿真实验，在车流密度为60辆/km的场景下，对比分析编队行驶模式与离散行驶模式下的CO_2排放差异。由表3可知，随着

表 3　离散模式和编队模式下的 CO_2 排放

Table 3　CO_2 emission in discrete mode and platoon mode

CAV渗透率	CO_2排放总量/(L·km^{-1})		下降比例/%
	离散模式	编队模式	
0.2	0.360 2	0.329 8	8.4
0.4	0.324 5	0.285 6	12.0
0.6	0.267 6	0.218 8	18.2
0.8	0.190 3	0.142 5	25.1

CAV渗透率的增加，离散模式和编队模式下的CO_2排放均逐渐降低。对比同一渗透率下2种模式的CO_2排放，编队模式下CO_2排放降低比离散模式更显著，且随着CAV渗透率的增加，编队模式下的CO_2排放降低率更加明显。CAV渗透率从0.2增加到0.8，编队模式下的CO_2排放较离散模式降低8.4%～25.1%。

为了进一步分析不同车队控制策略对车辆CO_2排放的影响，选取队内车间距（d_{CACC}）、换道概率（P_{change}）、反应时间（τ^{HDV}和τ^{CAV}）、智能网联车队规模（Z）等作为关键参数，进行敏感性分析。

（1）队内车间距

敏感性分析中，分别设定d_{CACC}的值为3、10和20 m，研究不同CAV渗透率下d_{CACC}对CO_2排放的影响。

图8(a)、(b)显示，CO_2排放量随着车流密度的增加而增加，且图8(a)的CO_2排放量整体高于图8(b)。图8(a)对应CAV渗透率较低的情况，此时d_{CACC}的变化对CO_2排放的影响较小，d_{CACC}为3 m时相较于20 m时CO_2排放降低了6.8%。图8(b)对应CAV渗透率较高的情况，此时d_{CACC}值的变化对CO_2排放产生显著影响，d_{CACC}为3 m时CO_2排放相较于20 m时降低了45.2%。这是由于交通流中存在大量智能网联车队，受d_{CACC}影响的车辆较多，d_{CACC}的变化会影响道路通行能力和交通流稳定性。特别是在高密度下，不同d_{CACC}

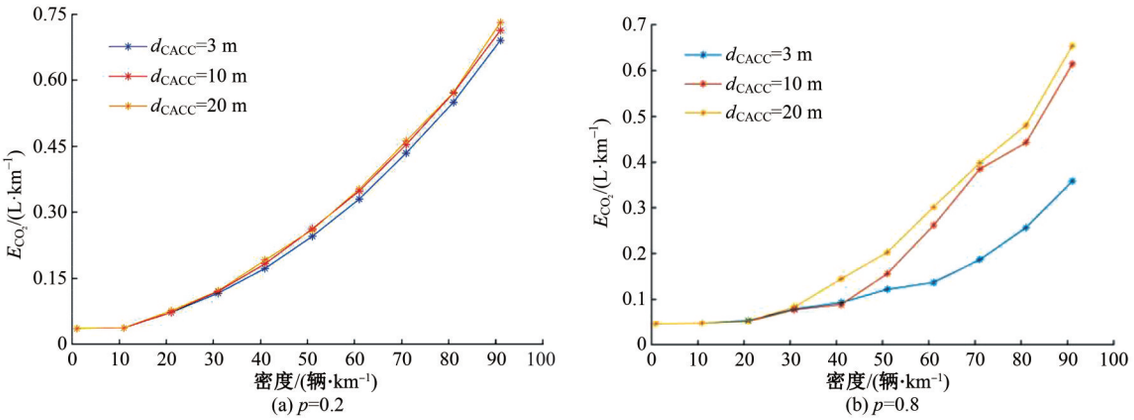


图8 不同队内车间距下的CO_2排放

Fig. 8 CO_2 emissions under different intra-platoon spacing

值下的CO_2排放呈现较大差异:较小的d_{CACC}值意味着车队中的CAV以较小的车间距结队行驶,HDV的通行空间更大,减少了交通拥堵和车速波动,提高了道路的通行能力,此时CO_2排放整体水平较低;当d_{CACC}较大时,交通流不稳定性增强,CO_2排放随着密度增大快速上升。

(2) HDV和CAV的换道行为

为分析HDV和CAV的换道行为对CO_2排放的影响,以$P_{change}=0$时的CO_2排放量为基准,计算不同换道概率下CO_2排放量相比基准值的降低百分比。首先,固定CAV换道概率$P_{change}=0.5$,以HDV换道概率$P_{change}=0$的CO_2排放量为基准,分析不同HDV换道概率对CO_2排放的影响,结果如表4所示。其次,固定HDV换道概率$P_{change}=0.2$,以CAV换道概率$P_{change}=0$的CO_2排放量为基准,分析不同CAV换道概率对CO_2排放的影响,结果如表5所示。

表4 HDV换道概率对CO_2排放影响对比分析

Table 4 Comparative analysis of the impact of HDV lane-changing probability on CO_2 emissions

密度/(辆·km^{-1})	CO_2排放降低百分比/%					
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
10	0.02	0.03	0.07	0.07	0.23	0.43
20	0.05	0.15	0.48	0.34	0.67	0.81
30	−1.40	−3.66	−2.54	−1.53	−2.82	−4.94
40	−0.20	0.10	−0.58	−0.41	−0.70	−1.83
50	0.02	0.37	0.50	0.42	0.32	−0.43
60	0.05	−0.01	0.10	−0.20	−0.15	−0.32
70	−0.03	−0.55	−0.80	−0.46	−1.18	−0.80
80	−0.06	−0.15	−0.38	−0.17	−0.58	−0.27

由表4可知,低密度环境下(密度≤20辆/km),提高HDV换道概率可有效降低CO_2排放,表明低交通流量时换道行为通过优化车辆轨迹减少拥堵,从而降低排放。中高密度环境下(密度为30~60辆/km),换道概率>0.5的CO_2排放降低百分比显著下降,表明中高密度交通中频繁的换道行为加剧了车辆冲突,导致CO_2排放增加。高密度环境下(密度≥70辆/km),HDV换道概率变化对CO_2排放的影响趋于平缓(多数CO_2排放降低百分比接近0%),说明交通饱和状态下换道空间受限,多数车辆不具备安全换道条件,策略调整的减排潜力有限。

表5 CAV换道概率对CO_2排放影响对比分析

Table 5 Comparative analysis of the impact of CAV lane-changing probability on CO_2 emissions

密度/(辆·km^{-1})	CO_2排放降低百分比/%					
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
10	0.02	0.07	−0.07	0.01	0.01	0.03
20	−4.24	−1.34	−2.36	−3.07	−11.82	−1.76
30	−4.15	−5.30	−4.99	−5.07	−7.66	−4.54
40	−5.67	−2.79	−1.81	−4.79	−4.90	−2.25
50	−2.29	−1.57	−2.50	−3.15	−3.95	−3.46
60	−2.38	−1.98	−2.35	−2.71	−2.33	−2.32
70	0.05	−0.15	0.09	0.28	0.51	0.76
80	0.62	0.06	0.84	1.34	1.67	1.45

由表5可知，CAV换道行为与CO_2排放具有显著相关性。低密度环境下（密度≤20辆/km），CAV换道概率对CO_2排放的影响微弱，但在密度为20辆/km、换道概率P_{change}=0.5时出现极端负值（−11.82%），这可能是由于头车频繁换道引发编队频繁解列与重组，导致加速度波动和能耗剧增。其他概率下CO_2排放降低百分比均为负值，印证低密度环境下CAV换道需谨慎。中高密度环境下（密度为30～60辆/km），所有换道概率下CO_2排放降低百分比均为负值，显示中高密度环境下CAV换道行为加剧了交通流扰动，可能与编队稳定性下降、头车换道引发跟随车辆制动连锁反应有关。高密度环境下（密度≥70辆/km），当换道概率＞0.4时CO_2排放显著降低，表明在交通高度饱和时，CAV编队通过头车主动换道可突破局部瓶颈，优化全局交通分配，从而降低排放。

（3）HDV和CAV的反应时间

在密度为60辆/km环境下，分析τ^{HDV}在1.0～2.0 s变化、τ^{CAV}在0.4～0.8 s变化时的CO_2排放，以研究τ^{HDV}和τ^{CAV}对CO_2排放的交叉影响。

由图9可知，不同CAV渗透率下，τ^{HDV}和τ^{CAV}对CO_2排放的影响程度有显著差异。如图9(a)～

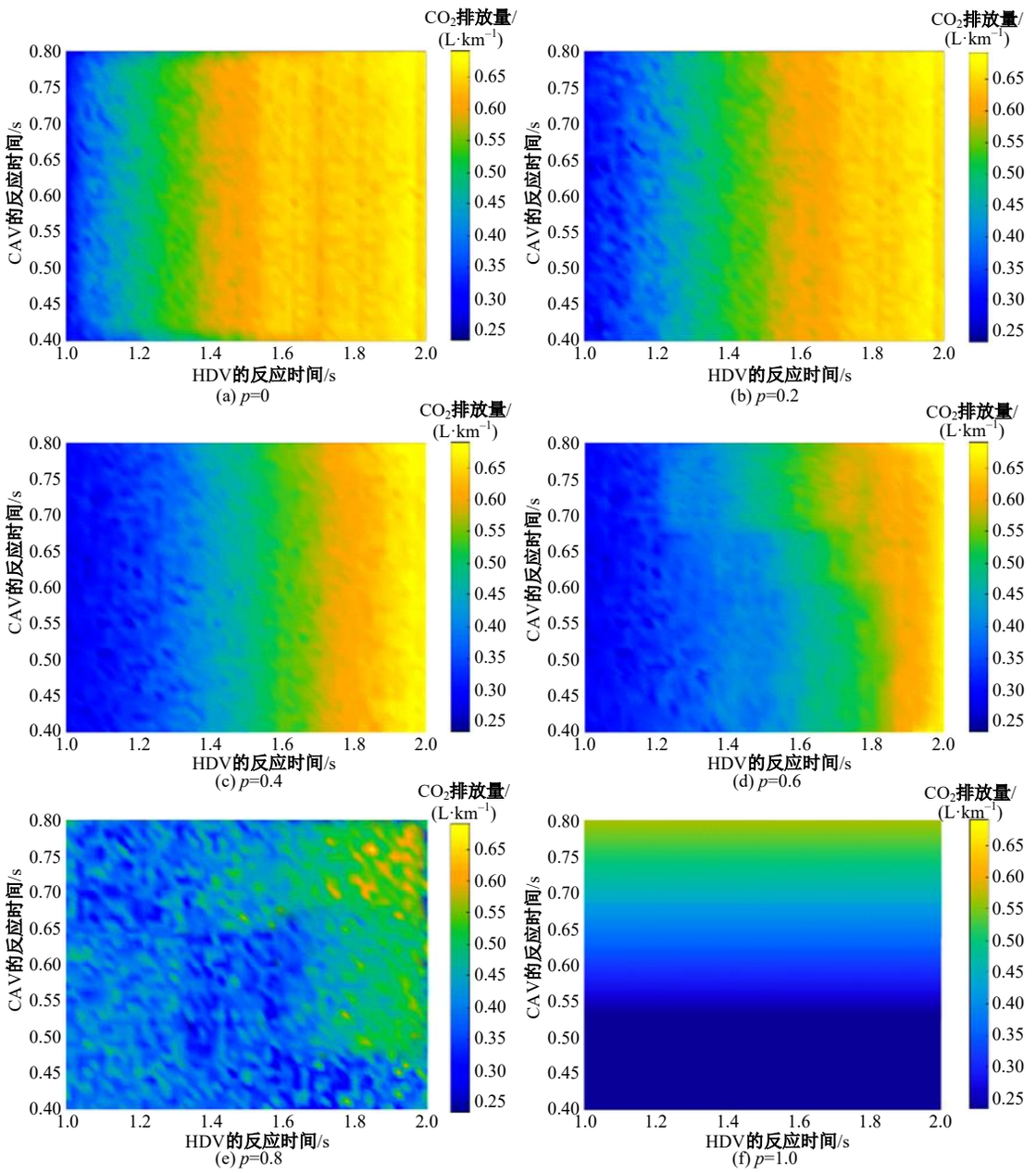


图9　不同反应时间下的CO_2排放

Fig. 9　CO_2 emission under different reaction times

(c)所示,全HDV交通流和低CAV渗透率下的混合交通流,车辆的CO_2排放较高,此时CO_2排放随着τ^{HDV}的延长而增加,而τ^{CAV}对CO_2排放的影响较小。如图9(a)~(e)所示,无论CAV渗透率如何,CO_2排放均随着τ^{HDV}的增大而显著增加。由于交通流运行过程中HDV的随机减速会不断传递给其他车辆,即使CAV渗透率很高,τ^{HDV}仍对CO_2排放有显著影响。

如图9(d)、(e)所示,τ^{CAV}对CO_2排放的影响随着CAV渗透率的增大而逐渐显著。τ^{CAV}增大将导致车辆所需的安全距离增大,使更多的车辆在下一步长减速,平均速度将随着τ^{CAV}的增加而减小。图9(f)显示,当CAV渗透率为1.0时,交通流由多个车队组成,并保持高速行驶。此时,CO_2排放总体较低,且随着τ^{CAV}的增加而增加。

(4) 反应时间和队内车间距

在密度为60辆/km、渗透率为0.6时,τ^{HDV}和τ^{CAV}在1.0~2.0 s变化,d_{CACC}在3~30 m变化,分析不同反应时间和队内车间距对CO_2排放的交叉影响。

由图10(a)可知,当τ^{HDV}从0.5 s增至2.0s时,CO_2排放显著上升,当τ^{HDV}超过1.5 s后,CO_2排放增速加快。高排放场景下($\tau^{HDV}\geqslant 1.5$ s,$d_{CACC}\geqslant 10$ m),CO_2排放峰值达1.5 L/km,反映紧凑编队与敏捷HDV行为的叠加效应易引发频繁跟驰与换道冲突,加剧CO_2排放。低排放场景下($\tau^{HDV}\leqslant 1.5$, $d_{CACC}\leqslant 10$ m),CO_2排放低至0.35 L/km,表明慢反应HDV与宽松CAV编队的组合可通过平滑交通波动显著降低排放。τ^{HDV}对CO_2排放的影响效应更强,随着τ^{HDV}的增大,CO_2排放也增大。图10(b)的整体趋势和图10(a)相同,当d_{CACC}=3~10 m时,CO_2排放上升速度较快,且τ^{CAV}与d_{CACC}交互作用下的CO_2排放整体高于τ^{HDV}与d_{CACC}交互作用下的CO_2排放。

(5) 最大车队规模和CAV渗透率

在密度为60辆/km环境下,车队规模从2辆到10辆不等,CAV渗透率在0~1.0范围内变化,分析最大车队规模和CAV渗透率对CO_2排放的交叉影响。

由图11可知,当CAV渗透率较低时,不同车队规模下的车辆CO_2排放普遍较高;随着CAV渗透率的上升,CO_2排放有所下降。当CAV渗透率<0.5时,车队规模越大的车辆CO_2排放越低。

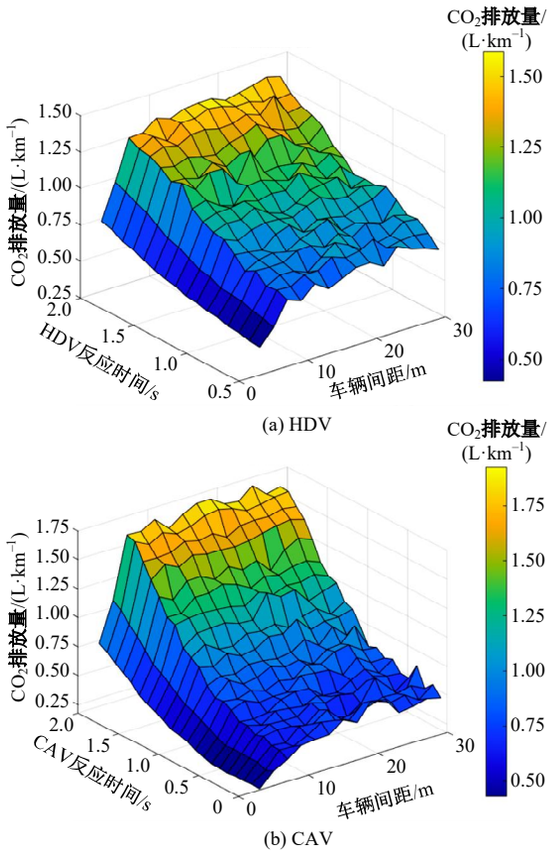


图10 不同反应时间与队内车间距下的CO_2排放

Fig. 10 CO_2 emissions under different reaction times and intra-platoon spacing

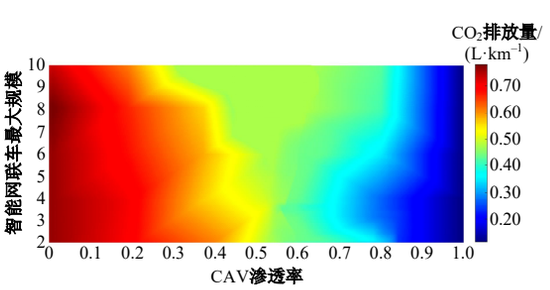


图11 不同车队规模和CAV渗透率下的CO_2排放

Fig. 11 CO_2 emission under different fleet sizes and CAV penetration rates

此后,智能网联车队规模越大,CO_2排放反而增大。高CAV渗透率环境下,CO_2排放较低的车队规模主要集中在3~5辆。因此,为了有效控制车辆CO_2排放,关键在于根据不同交通环境合理调整和优化车队规模。

4 结 论

(1)基于马尔可夫链构建了动态车队演化模型,突破了传统固定编队规模的限制,能够实时表征车队分裂、合并与重组的随机过程,解决了连续

运动安全距离模型与元胞离散空间不适配的问题。同时，提出的离散运动安全距离模型通过整数决策规则，有效消除了传统连续加速度建模的失真现象，更贴合车辆时空离散运行的实际特征。

(2)CAV渗透率提升对碳减排具有显著正向影响，但其效果依赖于编队策略的协同优化。当渗透率＞0.6时，编队模式较离散模式CO_2减排幅度达8.4%～25.1%；而在全CAV场景下，低密度交通流可完全消除拥堵，高密度下通过紧密编队仍能维持通行效率。

(3)缩短HDV反应时间有助于降低排放，但会加剧交通振荡；CAV反应时间优化需兼顾编队稳定性，设定为1.0～1.5 s时可在减排与安全间取得最优平衡。

(4) 换道策略应与交通密度适配，低密度下提高HDV换道概率可降低排放；但高密度时，CAV换道概率需控制在0.4～0.6，以避免编队频繁解列导致CO_2排放量的激增。

(5)当CAV渗透率处于不同水平时，车队规模对CO_2排放的影响有显著差异。当CAV渗透率＜0.5时，车队规模越大，交通流中的CO_2排放越低；在该渗透率下，通过组建更大规模的车队，可以有效减少CO_2排放。在高渗透率环境下，不宜通过设置大规模车队降低CO_2排放，此时车队规模应控制在3～5辆。在制定减排策略时，应充分考虑渗透率与车队规模之间的平衡，以实现最佳的减排效果。

参考文献：

[1] 邱小平，于丹，孙若晓，等. 基于安全距离的元胞自动机交通流模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2015，15(2)：54-60.
Qiu Xiao-ping，Yu Dan，Sun Ruo-xiao，et al. Cellular automata model based on safety distance[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2015，15(2)：54-60.

[2] 常玉林，张成祥，张鹏. 车联网环境下基于间隙优化的无信号交叉口车速控制方法[J]. 重庆理工大学学报:自然科学，2021，35(3)：10-17.
Chang Yu-lin，Zhang Cheng-xiang，Zhang Peng. A speed control method of non-signalized intersection based on gap optimization under connected vehicle environment[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)，2021，35(3)：10-17.

[3] 王曦，杨秀建，贾晓寒，等. 面向队列实际行为特性的混合交通流建模及分析[J]. 系统仿真学报，2024，36(4)：929-940.
Wang Xi，Yang Xiu-jian，Jia Xiao-han，et al. Modeling and analysis of hybrid traffic flow considering actual behavior of platoon[J]. Journal of System Simulation，2024，36(4)：929-940.

[4] Hu G，Lu W，Whalin R，et al. Analytical approximation for macroscopic fundamental diagram of urban corridor with mixed human and connected & autonomous traffic[J]. IET Intelligent Transport System，2021，15：261-272.

[5] Qin Y，Wang H. Analytical framework of string stability of connected and autonomous platoons with electronic throttle angle feedback[J]. Transportation A：Transport Science，2018，17(1)：59-80.

[6] Sharma A，Zheng Z D，Kim J，et al. Assessing traffic disturbance，efficiency，and safety of the mixed traffic flow of connected vehicles and traditional vehicles by considering human factors[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2021，124：No. 102934.

[7] 杨志发，孙勃，樊贤俊，等. 车路协同背景下高速公路货车车队的能耗仿真[J]. 吉林大学学报：工学版，2023，53(12)：3452-3457.
Yang Zhi-fa，Sun Bo，Fan Xian-jun，et al. Simulation on energy consumption of truck fleet on expressway under background of vehicle-infrastructure cooperative environment[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2023，53(12)：3452-3457.

[8] Liang K Y，Mårtensson J，Johansson K H. Heavy-duty vehicle platoon formation for fuel efficiency[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2016，17(4)：1051-1061.

[9] 杨秀建，李金雨. 基于非线性模型预测控制的车辆纵向队列协调控制[J]. 汽车工程，2020，42(2)：184-190.
Yang Xiu-jian，Li Jin-yu. Coordinated control of vehicular platooning based on nonlinear model predictive control[J]. Automotive Engineering，2020，42(2)：184-190.

[10] 秦严严，王昊，冉斌. CACC车辆跟驰建模及混合交通流分析[J]. 交通运输系统工程与信息，2018，18(2)：60-65.

Qin Yan-yan, Wang Hao, Ran Bin. Car-following modeling for CACC vehicles and mixed traffic flow analysis[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(2): 60-65.

[11] Veldhuizen R, Raemdonck G V, Krieke V D. Fuel economy improvement by means of two European tractor semi-trailer combinations in a platooning formation[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 188: 217-234.

[12] Zhai C J, Luo F, Liu Y G. Cooperative look-ahead control of vehicle platoon for maximizing fuel efficiency under system constraints[J]. IEEE Access, 2018, 99: 1-11.

[13] 徐明诚, 徐利伟, 殷国栋, 等. 燃油车和纯电车混杂智能网联队列系统的节能与稳定控制[J]. 汽车安全与节能学报, 2024, 15(1): 71-82.
Xu Ming-cheng, Xu Li-wei, Yin Guo-dong, et al. Stability control and energy-saving of an intelligent networked platoon system composed of fuel vehicles and pure electric vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2024, 15(1): 71-82.

[14] 蒋阳升, 王思琛, 高宽, 等. 混入智能网联车队的混合交通流元胞自动机模型[J]. 仿真学报, 2022, 34(5): 1025-1032.
Jiang Yang-sheng, Wang Si-chen, Gao Kuan, et al. Cellular automata model of mixed traffic flow composed of intelligent connected vehicles′ platoon[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(5): 1025-1032.

[15] 魏丽英, 吴润泽. 基于鱼群效应的智能网联车队形成与演化机理研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(2): 76-85.
Wei Li-ying, Wu Run-ze. Formation and evolution mechanism of connected and autonomous fleet based on fish streaming effect[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(2): 76-85.

[16] 惠飞, 吴丽宁, 景首才, 等. 基于轨迹数据的多工况典型驾驶行为能耗评估[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(5): 50-56.
Hui Fei, Wu Li-ning, Jing Shou-cai, et al. Energy consumption assessment of typical driving behavior under multiple driving conditions based on trajectory date[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(5): 50-56.