智能网联客货混合交通流特性及集聚换道策略

吴德华，陈荣峰

（福州大学 土木工程学院，福州 350108）

摘 要：为研究车联网环境下客货混合交通流特性和适用于该环境的换道策略，引入相对熵以量化客货混合车流的有序性，并在此基础上提出条件集聚换道策略。通过元胞自动机仿真研究条件集聚换道策略对混合车流通行能力、有序性等的影响。结果表明：相比于无集聚换道策略，集聚换道策略在不同智能网联自动驾驶汽车（CAV）渗透率、客货比例的混合车流中可将道路最大通行能力提高5.5%～10.5%，且能显著降低车流相对熵，增大协同自适应巡航控制（CACC）队列车辆数，从而提升车流有序性；条件集聚换道策略的CACC最小队列规模为4～5辆时，对道路通行能力的提升效果最为显著。

关键词：智能交通；智能网联车；换道策略；混合交通流；数值仿真；相对熵

中图分类号：U495 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2025)08-2588-09

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231205

Characteristics of passenger-cargo mixed traffic flow in intelligent network and agglomeration lane-change strategy

WU De-hua，CHEN Rong-feng

（*College of Civil Engineering*，*Fuzhou University*，*Fuzhou* 350108，*China*）

Abstract：To study the characteristics of passenger-cargo mixed traffic flow in vehicle-connected environment and the lane change strategy suitable for the mixed traffic flow environment，the relative entropy is introduced to quantify the order of passenger-cargo mixed traffic flow，and on this basis，conditional agglomeration lane change strategy is proposed. The effect of conditional lane change strategy on the capacity and order of mixed traffic flow was studied by cellular automata simulation. The results show that compared with non-agglomeration lane change strategy，CDA（Conditional aggregation）lane change strategy can improve the maximum road capacity by 5.5%～10.5% in mixed traffic flow with different CAV（Connected and autonomous vehicle）penetration rate and passenger-cargo ratio. It can significantly reduce the relative entropy of traffic flow，increase the number of vehicles in CACC（Cooperative adaptive cruise control）queue and improve the orderliness of traffic flow. When the CACC minimum queue size of the conditional lane change strategy is 4～5 vehicles，the road capacity can be improved the most.

Key words：intelligent transportation；connected and autonomous vehicle；lane change strategy；heterogeneous traffic flow；numerical simulation；relative entropy

收稿日期：2023-11-06.

基金项目：福建省交通运输科技项目（202233）.

作者简介：吴德华（1978-），男，副教授，博士.研究方向：智能交通.E-mail：610706517@qq.com

0　引　言

随着信息技术及汽车行业的不断发展，智能网联自动驾驶汽车（Connected and autonomous vehicle，CAV）成为当前研究的热点。CAV有自适应巡航控制（Adaptive cruise control，ACC）和协同自适应巡航控制（Cooperative adaptive cruise control，CACC）两种跟驰状态。CAV的普及是一个长期的过程，未来道路上人工驾驶车辆（Human-driving vehicle，HV）、ACC车辆及CACC车辆将长期共存。在客货混合的高速公路上，这种异质交通流的车流特性将变得十分复杂。CAV能够快速精准地识别交通环境并以低延迟响应，而恰当的车辆换道策略能让CAV更好地集聚形成CACC队列并以CACC模式行驶，从而提升车辆通行效率。

在大部分情况下，CAV渗透率的增加能够显著提升道路通行能力[1,2]。同一CAV渗透率下，以CACC模式行驶的CAV能更大程度地提升通行效率[3,4]。Zheng等[5]针对CAV的特性提出了一种合作车道变更策略，并通过数值仿真证明所提策略在不同换道区间长度下均能提升通行效率；严永俊等[6]和杜思雨等[7]基于博弈论提出了适用于混合车流的换道策略，并通过仿真证明了所提策略的安全性；梁军等[8]提出了适用于城市交叉路口的异质流集聚控制模型，该模型能够有效集聚形成CAV车队，减少交叉口延误和停车次数；梁军等[9]构建了考虑公交及CAV队列特性的跟驰换道模型，仿真结果表明CAV队列能够有效提升异质车流通行效率；曹丹妮等[10]提出了增强CAV队列抗干扰能力的排列整合算法，通过仿真证明该算法在各交通需求下均能增强高速事故区前CAV车队的抗干扰能力，缩短行程时间；Zhou等[11]和梁军等[12]提出了促进CAV聚集的换道策略，通过仿真证明所提策略均能在一定程度上促进CAV集聚，扩大CACC队列规模，提高道路通行能力。

综上，已有许多学者对CAV混行的异质交通流和CACC队列进行了相关研究，并在促进CAV集聚的换道策略方面取得了一定成果。但是，目前针对包含货车、CAV及HV的混合交通流特性研究较少，且现有CAV集聚换道研究也较少涉及CACC队列分裂、CACC队列聚集程度量化等方面，相关策略研究尚未形成较完整的体系。因此，本文引入相对熵对CAV集聚程度进行量化，并提出适用于CAV客货混合交通流环境的CAV集聚换道策略。该换道策略能够促使路段上的CAV集聚形成一定规模的CACC队列，使更多CAV以CACC模式行驶，从而提高道路的通行能力及车流有序性。

1　混合车流有序性的定量描述

1.1　CAV协同队列研究

本文CAV车辆类型界定如下：若CAV客车的前车为CAV客车且车间距离不超过车间通信范围，则该车为CACC客车，否则为ACC客车；CAV货车的判定方式同理。

假定道路上CAV比例为p，HV比例为$1-p$，客车比例为q，货车比例为$1-q$。在道路车辆排列服从随机分布的情况下，HV客车、HV货车、ACC客车、ACC货车、CACC客车、CACC货车出现的概率分别为$p_{\mathrm{hc}}=(1-p)q$、$p_{\mathrm{ht}}=(1-p)(1-q)$、$p_{\mathrm{ac}}=pq(1-pq)$、$p_{\mathrm{at}}=p(1-q)(pq+1-p)$、$p_{\mathrm{cc}}=p^2q^2$、$p_{\mathrm{ct}}=p^2(1-q)^2$。

定义CACC队列中第i辆车的车辆类型为$T(i)$，车队规模为S，则$P[T(i)=\mathrm{CAV}|S]$表示CACC队列规模为S时第i辆车为CAV的概率。当$S=0$时，$P[T(i)=\mathrm{CAV}|0]=0$。

当$S>1$，且车辆位置$i>1$时，CAV客车形成的CACC队列的$P_{\mathrm{c}}[T(i)=\mathrm{CAV}|S_1]$为：

$$P_{\mathrm{c}}[T(i)=\mathrm{CAV}|S_1]=P_{\mathrm{c}}[T(i-1)=\mathrm{CAV}|S_1]\times(pq),\quad S_1=2,3,\cdots \tag{1}$$

混合车流中CACC客车车队规模为S_1的概率为：

$$\begin{aligned}&P_{\mathrm{c}}[T(i)=\mathrm{CAV}|S_1]=\\&P_{\mathrm{c}}[T(i-1)=\mathrm{CAV}|S_1]\times(pq)=\\&P_{\mathrm{c}}[T(1)=\mathrm{CAV}|S_1]\times(pq)^{S_1-1}=\\&(1-pq)(pq)^{S_1-1}\end{aligned} \tag{2}$$

同理，可以推导出CACC货车车队规模为S_2的概率为：

$$P_{\mathrm{t}}[T(i)=\mathrm{CAV}|S_2]=[1-p(1-q)][p(1-q)]^{S_2-1} \tag{3}$$

设道路上有N辆车,其中N_1辆CAV客车,M_1辆CAV货车,n个CAV客车队列$(S_1^1,S_1^2,\cdots,S_1^n)$,$m$个CAV货车队列$(S_2^1,S_2^2,\cdots,S_2^m)$。

$$\sum_{i=1}^{n}S_1^i=N_1,S_1=\{S_1^1,S_1^2,\cdots,S_1^n\} \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{m}S_2^i=M_1,S_2=\{S_2^1,S_2^2,\cdots,S_2^m\} \tag{5}$$

则CACC客车数量为:

$$(S_1^2-1)+(S_1^2-1)+(S_1^3-1)+\cdots+(S_1^n-1) \tag{6}$$

CACC货车数量为:

$$(S_2^1-1)+(S_2^2-1)+(S_2^3-1)+\cdots+(S_2^m-1) \tag{7}$$

CACC客车出现的概率为:

$$\frac{(S_1^1-1)+(S_1^2-1)+(S_1^3-1)+\cdots+(S_1^n-1)}{N}=\frac{(S_1^1+S_1^2+S_1^3+\cdots+S_1^n)-n}{N}=\frac{N_1-n}{N}=\frac{Npq-n}{N},n\in[1,N_1] \tag{8}$$

CACC货车出现的概率为:

$$\frac{(S_2^1-1)+(S_2^2-1)+(S_2^3-1)+\cdots+(S_2^m-1)}{N}=\frac{(S_2^1+S_2^2+S_2^3+\cdots S_2^m)-m}{N}=\frac{M_1-m}{N}=\frac{N\left[p(1-q)\right]-m}{N},m\in[1,M_1] \tag{9}$$

CACC车辆出现的概率为:

$$\frac{Npq-n}{N}+\frac{N\left[p\cdot(1-q)\right]-m}{N}=\frac{Np-n-m}{N} \tag{10}$$

由式(10)可知:提高CAV比例(即渗透率)p或减少混合车流中客货车协同队列数m、n,均可提高CAV中CACC车辆的比例,更易组成CACC队列。同时由式(2)可得,在客货比例固定、CAV渗透率不变时,CACC队列规模与其形成的概率呈负相关,即在混合车流服从随机分布的情况下,CACC队列规模越大,则越难形成。

1.2 车流有序性定量描述

不同类型车辆的排列方式会对混合车流的交通流特性产生不同的影响。以客车比例为0.5、CAV渗透率为0.5的车流为例,车道上CAV客车、CAV货车、HV客车、HV货车可能存在混合态、随机态、分离态3种排列方式[13],如图1所示。其中,分离态车流能使最多的CAV以CACC模式行驶,提升道路的通行能力。

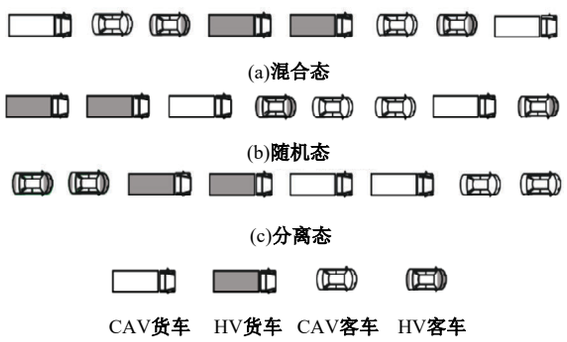

图1 车辆排列方式图

Fig. 1 Diagram of vehicle arrangement

混合交通流中,CAV客车、CAV货车、HV客车、HV货车的排列方式可以反映道路系统的有序性程度。研究交通流有序性的前提是对交通流的有序与无序状态进行界定[14]。本文定义:单车道车流中,当所有车辆跟随行为均为CAV客车跟随CAV客车或CAV货车跟随CAV货车,即认为车流有序。

相对熵D_{KL}是量化有序车流概率分布和实际车流概率分布差异的函数。通过信息化的车联网获得车道上实际车流(随机态)分布$Q(x_i)$,利用相对熵公式计算$Q(x_i)$与有序车流分布$P(x_i)$的差异,可定量描述混合车流的有序性[15]。

有序车流分布$P(x_i)$为:

$$P(x_i)=\begin{cases}1, & x_i=\text{CACC}\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{11}$$

实际车流分布$Q(x_i)$为:

$$Q(x_i)=\begin{cases}\dfrac{Np-n-m}{N}, & x_i=\text{CACC}\\ 1-\dfrac{Np-n-m}{N}, & \text{其他}\end{cases} \tag{12}$$

则相对熵D_{KL}的计算公式为:

$$D_{KL}=\sum_{i=1}^{n}P(x_i)\log\frac{P(x_i)}{Q(x_i)}=-\log\frac{Np-n-m}{N} \tag{13}$$

从式(13)可知,混合车流的相对熵不仅与CAV渗透率p有关,还与CAV队列数m、n有

关。当CAV渗透率p固定时，混合车流的相对熵与CAV队列数呈正相关，即随着队列数增加，车流相对熵增大，与有序流的差异增大，混合车流趋于无序；当CAV队列数固定时，混合车流的相对熵与CAV渗透率呈负相关关系，即随着CAV渗透率增大，混合车流相对熵减小，与有序流的差异减小，更多CAV以CACC模式行驶，车流趋于有序。综上所述，提高混合车流CAV渗透率及减少CAV队列数是提高车流有序性的有效方法。

2　考虑CAV集聚的换道策略

2.1　换道策略

2.1.1　NOA换道策略

在传统的无集聚(No aggregation，NOA)换道策略下，车辆会在当前车道行驶受限且相邻车道行驶条件更优时进行换道。其换道动机如式(14)所示，HV车辆安全条件如式(15)所示。相比于HV，CAV对换道安全距离的要求更低，故引入控制系数λ，则CAV安全条件如式(16)所示。

$$\begin{cases} D_n < \min(v_n + a_n, v_{\max}) \\ D_n^{\mathrm{f}} > D_n \end{cases} \tag{14}$$

$$D_n^{\mathrm{l}} > v_{\max} \tag{15}$$

$$D_n^{\mathrm{l}} > \lambda(v_n^{\mathrm{l}} - v_n) + (1-\lambda)v_{\max} \tag{16}$$

式中：D_n、D_n^{f}、D_n^{l}分别为车辆n与当前车道前车、相邻车道前车及相邻车道后车的距离；v_n、a_n、$v_{\max}$、v_n^{l}分别为车辆n的速度、加速度、最大速度及相邻车道后车速度。

2.1.2　CVA换道策略

CAV能够快速精准地识别交通环境并以低延迟响应。恰当的车辆换道策略能更好地促使CAV集聚，进而形成CACC队列，提升通行效率。Zhou等[11]和梁军等[12]均提出了常规聚集(Conventional aggregation，CVA)换道策略，如图2所示。该策略能在一定程度上使CAV形成小规模的CACC队列，其换道标准为：

$$\begin{cases} M == 1 \\ T == \mathrm{HV} \\ T^{\mathrm{f}} == \mathrm{CAV} \\ D_n^{\mathrm{l}} > \lambda(v_n^{\mathrm{l}} - v_n) + (1-\lambda)v_{\max} \end{cases} \tag{17}$$

式中：M为CACC队列规模；T为前车类型；T^{f}为邻车道前车类型。

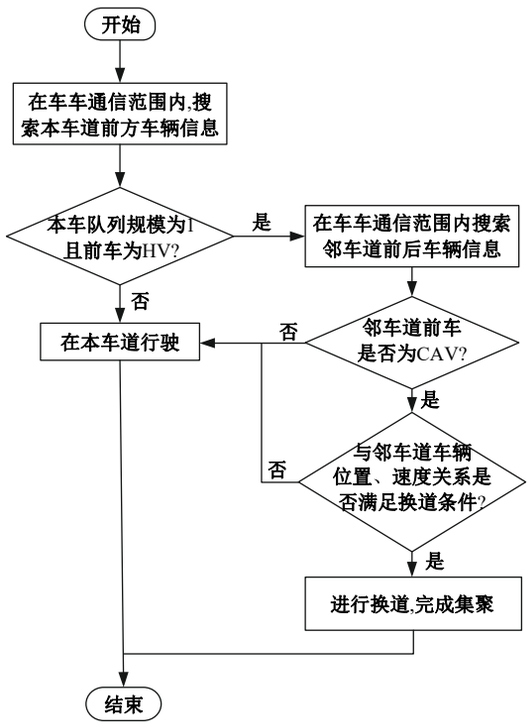

图2　CVA换道流程

Fig. 2　Flowchart of CVA lane-change

2.1.3　条件集聚(CDA)换道策略

CDA换道策略的换道动机需满足2个条件：一是CAV在当前车道行驶受限且相邻车道行驶条件更好；二是当前CACC队列规模小于最小队列规模且邻车道前车为CAV。CDA换道流程图如图3所示，其换道标准为：

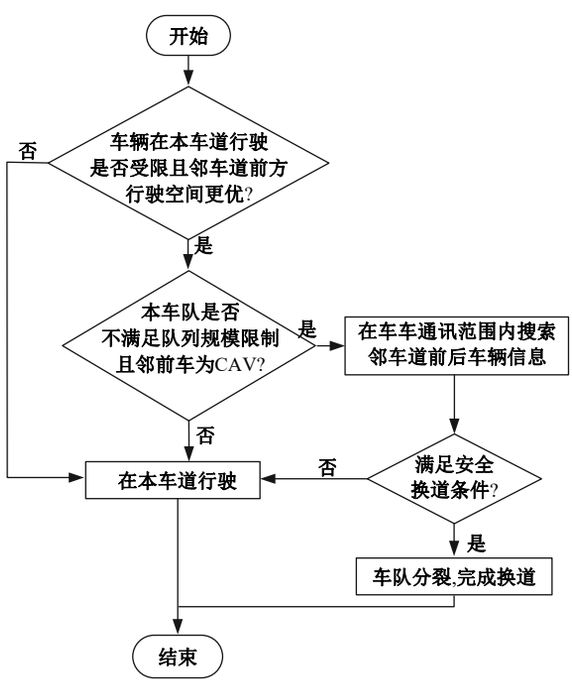

图3　CDA换道流程

Fig. 3　Flowchart of CDA lane-change

$$\begin{cases} D_n < \min(v_n + a_n, v_{\max}) \\ D_n^{\mathrm{f}} > D_n \\ M < S_{\min} \\ T^{\mathrm{f}} == \mathrm{CAV} \\ D_n^{\mathrm{l}} > \lambda(v_n^{\mathrm{l}} - v_n) + (1-\lambda)v_{\max} \end{cases} \tag{18}$$

式中:$S_{\min}$为最小队列规模,取值为4。

2.2 车辆纵向跟驰

本文在NaSch模型[16]的基础上,通过提高仿真步长精度并考虑混合车流特性,对车辆纵向更新进行细化,具体如下。

速度计算:

$$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t) + a_n, v_{\max}) \tag{19}$$

$$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t), v_{n,\mathrm{safe}}) \tag{20}$$

$$v_{n,\mathrm{safe}} = \begin{cases} \min\left[\sqrt{2b_{\max}(d-L-s_0) + v_{n-1}^2(t)},\ \sqrt{2b_{\max} \cdot R}\right], \mathrm{CAV} \\ d - L - s_0, \mathrm{HV} \end{cases} \tag{21}$$

人工车辆慢化:

$$v_n(t+1) \rightarrow \max(v_n(t+1) - b, 0) \tag{22}$$

车辆坐标更新:

$$y_n(t+1) \rightarrow y_n(t) + v_n(t+1) \tag{23}$$

$$x_n(t+1) = x_n(t) + \mathrm{ent}[x_n(t+1)] \tag{24}$$

$$y_n(t+1) = y_n(t+1) - \mathrm{ent}[y_n(t+1)] \tag{25}$$

式中:$v_{n,\mathrm{safe}}$、a_n分别为第n辆车的安全速度和加速度;$v_n(t)$为第n辆车t时刻的速度;$b_{\max}$为车辆最大减速度;d为车头间距;L为车长;s_0为安全间距;b为期望减速度;$x_n(t)$为车辆坐标;$y_n(t)$为辅助参数;R为车间通信范围,取300 m;$\mathrm{ent}[x_n(t+1)]$表示对$x_n(t+1)$取整。

2.3 混合车流跟驰模型

将广泛应用的智能驾驶员模型(Intelligent driver model, IDM)作为HV、ACC车辆跟驰模型[17],将PATH实验室数据标定的CACC模型作为CACC车辆的跟驰模型[18]。

IDM表达式为:

$$\dot{v} = a_{\max}\left[1 - \left(\frac{v}{v_{\mathrm{f}}}\right)^4 - \left(\frac{s_0 + vT + \dfrac{v\Delta v}{2\sqrt{a_{\max}b}}}{h - L}\right)^2\right] \tag{26}$$

式中:$a_{\max}$、v、v_{f}分别为车辆最大加速度、速度、自由流速度;T为安全车头时距;Δv为车辆与前车的速度差;h为车头间距。

IDM参数见表1[19],其中HV客车、HV货车、ACC客车、ACC货车的安全车头时距T取值分别为1.5、2.0、1.0、1.5 s;客车、货车车身长度L分别取6、10 m。

表1 IDM参数取值

Table 1 Values of IDM parameters

参数	取值
$a_{\max}/(\mathrm{m\cdot s^{-2}})$	1
$v_{\mathrm{f}}/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	33.3
s_0/m	2
$b/(\mathrm{m\cdot s^{-2}})$	2

CACC模型为:

$$\begin{cases} v = v_{\mathrm{prev}} + k_{\mathrm{p}}e + k_{\mathrm{d}}\dot{e} \\ e = h - s_0 - L - t_{\mathrm{c}}v \end{cases} \tag{27}$$

式中:v_{prev}为车辆上一时刻的速度;e为实际车间距与期望车间距的误差;$\dot{e}$为车间距误差的微分;t_{c}为期望车间时距,取0.6 s;控制系数k_{p}、k_{d}分别取0.45、0.25。

3 数值仿真实验

为研究NOA、CVA、CDA 3种换道策略下混合车流的交通流演化规律,基于MATLAB对不同换道策略的混合车流进行元胞自动机数值仿真。本文设置的基本交通场景为单向四车道高速公路,路段长5 km。混合车流中,HV和ACC车辆采用IDM跟驰模型,CACC车辆采用CACC跟驰模型;客车可在任意车道进行换道及跟驰,货车只能在外侧2个车道进行换道及跟驰;客车、货车的限速值分别取120和80 km/h。仿真采用周期性边界,时间步长为3 600 s(取最后600 s数据),重复5次并取其均值作为最终结果。仿真模型中各参数取值见2.2节、2.3节。

3.1 通行能力研究

针对不同客货比和不同CAV渗透率的混合车流通行能力进行仿真分析。本研究基于常规高速公路场景探讨混合车流特性,故不考虑货车比例过高的情况。设置单向四车道高速公路场景,货车比例取0.2、0.4、0.6,CAV渗透率取0.2、0.4、0.6、0.8;在不同货车比例和CAV渗透率组合下,3种换道策略对应的最大通行能力如图4所示。

从图4可以得出,在3种不同货车比例的交通

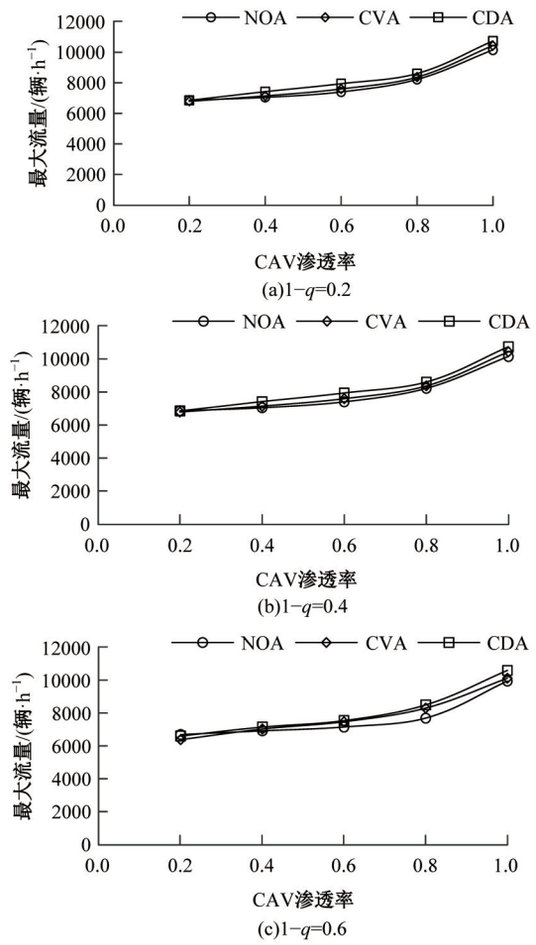

图 4　最大通行能力

Fig. 4　Maximum capacity

场景中，当CAV渗透率在0.2以上时，CDA换道策略对应的最大通行能力始终最大，NOA换道策略对应的最大通行能力均最小。这表明当CAV渗透率超过0.2时，集聚换道策略能更好地使CAV形成协同队列，从而提升道路通行能力。相较于NOA换道策略，CDA换道策略在不同CAV渗透率、客货比例的混合车流中可将道路最大通行能力提高5.5%～10.5%。特别是在货车比例为0.2的交通场景下，CDA换道策略在各CAV渗透率下均能显著提升通行能力。

基于以上分析，选择货车比例为0.2，CAV渗透率p为0.2、0.4、0.6、0.8的单向四车道高速公路场景进一步进行仿真，以研究该场景组合下的混合车流特性。货车比例为0.2时，不同CAV渗透率下3种换道策略对应交通场景的流量密度关系如图5所示。

由图5分析可知，在车流密度较低的自由流状态下，车辆行驶空间一般不会受限，导致换道的

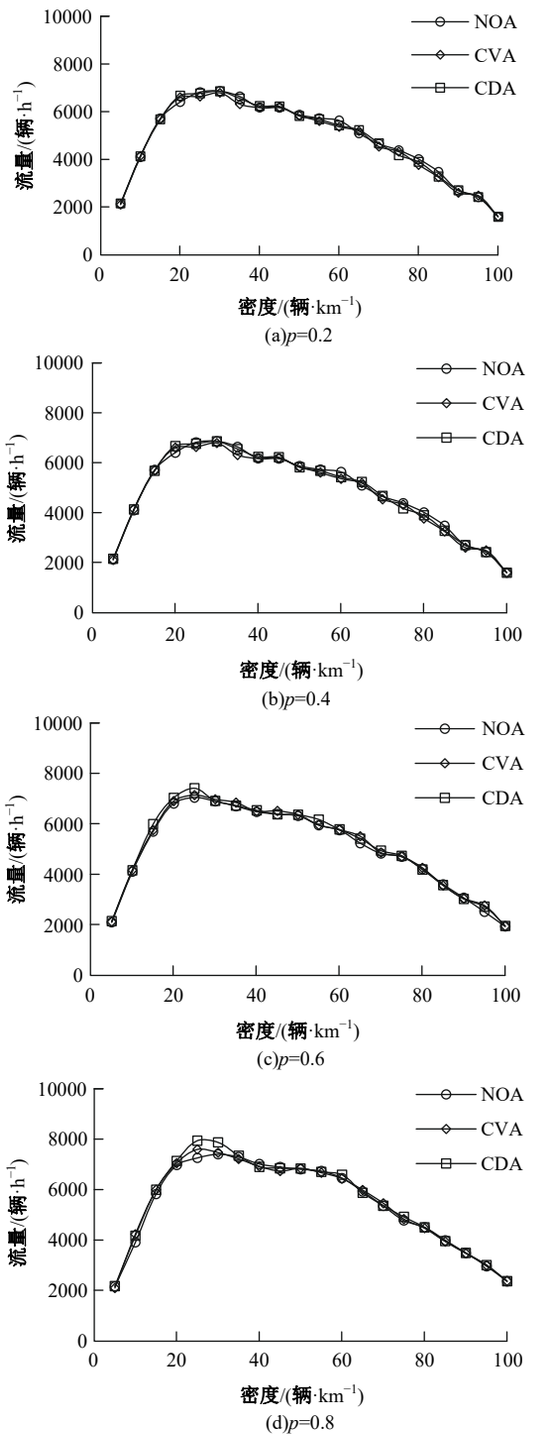

图 5　密度−流量图

Fig. 5　Density−flow diagram

车辆较少；在车流密度较高的拥堵状态下，车辆的换道空间及安全条件得不到保障，同样导致换道行为较少。这两种情况下，3种换道策略对车流的影响不明显。在车流密度介于自由流状态及拥堵状态之间时，3种换道策略对交通流影响的差异得到体现：当CAV渗透率为0.2时，3种换道策

略对通行能力的改善效果差异不大;当CAV渗透率为0.4时,在车流密度20~30辆/km区间内CDA策略能较为有效地提升道路通行能力;当CAV渗透率为0.6时,在车流密度20~35辆/km区间内CDA策略能较为明显地提升道路通行能力;当CAV渗透率为0.8时,相较于其他两种换道策略,CDA策略在更宽的车流密度15~45辆/km区间内能显著提升道路通行能力。

货车比例为0.2时,CVA、CDA换道策略相较于NOA换道策略在各CAV渗透率下的最大通行能力提升程度如表2所示。

表2 最大通行能力提升比例

Table 2 Maximum capacity increase ratio %

换道策略	p=0.2	p=0.4	p=0.6	p=0.8
CVA	−1.0	1.3	2.6	1.8
CDA	−0.1	5.7	7.3	7.0

从表2可以得出,当p=0.2时,CVA及CDA策略相比NOA策略的最大通行能力略有下降,这是由于道路中CAV车辆过少,以CAV集聚为换道动机的策略无法发挥效果;当p>0.2时,CVA、CDA、NOA策略均能提升道路通行能力,且CDA的提升效果显著高于CVA。两个集聚换道策略均在p=0.6时对通行能力的提升达到最大,其中CVA最大提升2.6%,CDA策略最大提升7.3%。

3.2 相对熵研究

为分析3种换道策略对混合车流相对熵及CACC队列规模的影响,取货车比例0.2、CAV渗透率0.6、车流密度30辆/km的单向四车道高速公路交通场景进行实验。通过实时记录仿真过程中混合车流的分布状态Q,结合式(13)计算得到车流的相对熵。3种策略相对熵仿真结果如图6所示。

从图6可以得出,相比NOA策略,CVA、CDA策略能够有效降低车流的相对熵。NOA策略中,随仿真时间的推进,相对熵并没有降低,保持在1.6 bit附近;而CVA、CDA策略对应车流的相对熵随着时间推进迅速下降,并最终稳定于1.2 bit附近。其中,CVA策略能更快地使相对熵趋于稳定。

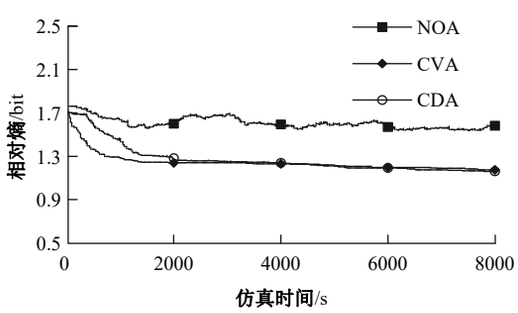

图6 不同换道策略的相对熵

Fig. 6 Relative entropy of different lane change strategies

同样取货车比例0.2、CAV渗透率0.6、车流密度30辆/km的单向四车道高速公路交通场景,进一步研究3种换道策略下的CACC队列规模特征,仿真结果如图7所示。

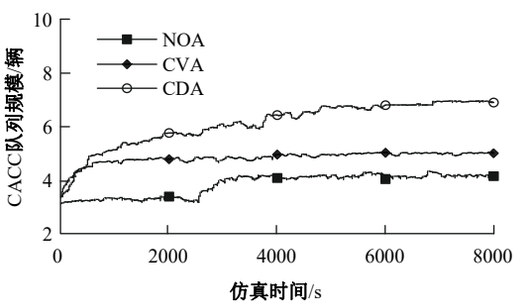

图7 不同策略下CACC队列规模特征

Fig. 7 CACC queue size characteristics under each strategies

由图7可以得出,在NOA策略下,混合车流的CACC平均队列规模先是维持在3.3辆左右,当仿真时间达到3 300 s后稳定在4.1辆;CVA策略下,在仿真时间达到700 s后,CACC平均队列规模稳定在4.9辆;而CDA策略下,CACC平均队列规模随仿真时间的增加而逐渐提升,最终在仿真时间达到6 000 s附近趋于稳定,平均达到6.9辆,并呈现缓慢增长的趋势。

由以上可以得出,以CAV集聚为目标的集聚换道策略能够在一定程度上改善道路的交通环境。特别是CDA策略,不仅能有效降低混合车流的相对熵,还能提升CAV集聚效果,促进更多的CAV以CACC队列行驶,使车流趋于有序,提高通行效率。

3.3 CDA最小队列规模分析

针对CDA策略在不同场景下的最佳CACC最小队列规模进行仿真研究。设置单向四车道高速公路场景,取货车比例为0.2、0.4、0.6,CAV渗透率为0.2、0.4、0.6、0.8;仿真时长为3 600 s,取最后600 s数据的均值为最终结果。不同货车比例与CAV渗透率组合下,CDA策略的CACC最小队列规模对混合车流的通行能力影响如图8所示。

从图8可以得出,CACC最小队列规模对不

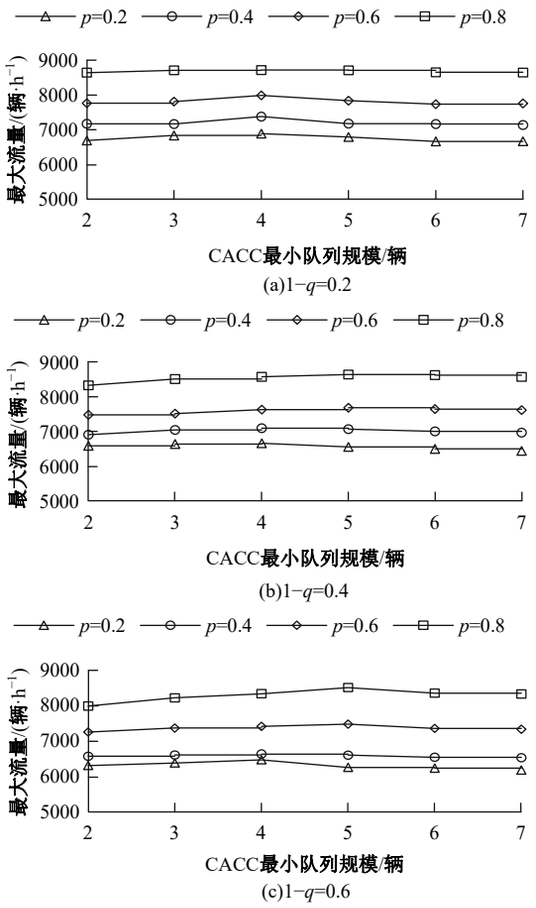

图 8　最小队列规模敏感性

Fig. 8　Sensitivity to minimum queue size

同货车比例和CAV渗透率的混合车流最大通行能力具有不同程度的影响。在货车比例为0.2的场景中，最大通行能力随着CACC最小队列规模的增大呈先提高后降低的规律，在CACC最小队列规模为4辆时通行能力最大，且不同CAV渗透率下均是如此。然而，在货车比例为0.4、0.6的场景中，最佳CACC最小队列规模呈现出不同规律：当$p=0.2$和$p=0.4$时，CACC最小队列规模为4辆时通行能力最大，而当$p=0.6$和$p=0.8$时，CACC最小队列规模为5辆时通行能力最大。

通过以上研究可以得出，CDA策略的CACC最小队列规模显著影响混合车流的通行能力。当货车比例为0.2时，最佳CACC最小队列规模为4辆；当货车比例为0.4和0.6时，最佳CACC最小队列规模为4～5辆。当CACC最小队列规模取值小于最佳值时，混合车流中会存在较多的小规模CACC队列和ACC车辆，导致车流有序性较差，难以有效提升通行能力；当CACC最小队列规模取值大于最佳值时，已形成最佳CACC队列规模的CACC队列会进行换道，从而汇聚为更大规模的CACC队列，这会导致更频繁的换道行为，扰乱交通流的稳定性，使得通行能力降低。

4　结　论

(1)相对熵可定量描述混合车流的有序性，反映车流中CAV的集聚程度；CAV集聚性越强，则相对熵越小。在混合车流中，增大CAV渗透率及限制客货车的CACC协同队列数量均能够促进CAV进一步集聚，提升车流有序性。

(2)相比NOA换道策略，针对CAV的集聚换道策略能够促使CAV形成适当规模的CACC队列，提升混合车流有序性和道路通行能力。CDA策略在不同货车比例的车流中，可将道路的最大通行能力提高5.5%～10.5%。

(3)在混合车流中，不同的货车比例对应有各自的最佳CACC队列规模，并不是CACC队列规模越大通行能力就越大。过大规模的CACC队列会使CAV换道较为频繁，并且在CAV渗透率达到一定程度时容易使CAV在同一车道过度集聚导致单一车道车流密度过大，从而影响通行效率。CDA策略的CACC最小队列规模为4～5辆时，对道路通行能力提升最大。

本文仅从仿真角度对混合车流的换道策略进行研究，且带来的通行效益是从整体车流的交通效益出发，未考虑车辆换道对局部车辆的影响。以上问题在将来研究加以完善。

参考文献：

[1] 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.

[2] Qin Y Y，Tang H H，Yang J Y，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.

[3] Vranken T，Sliwa B，Wietfeld C，et al. Adapting a cellular automata model to describe heterogeneous traffic with human-driven，automated，and communicating automated vehicles[J]. Physica A：Statistical Me-

chanics and its Applications, 2021, 570: No. 125792.

[4] Lai J T, Hu J, Cui L, et al. A generic simulation platform for cooperative adaptive cruise control under partially connected and automated environment[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 121: No. 102874.

[5] Zheng Y, Ran B, Qu X, et al. Cooperative lane changing strategies to improve traffic operation and safety nearby freeway off-ramps in a connected and automated vehicles environment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(11): 4605-4614.

[6] 严永俊, 彭林, 王金湘, 等. 混驾环境下基于主从博弈的多车协同决策规划[J]. 中国公路学报, 2024, 37(3): 117-133.
Yan Yong-jun, Peng Lin, Wang Jin-xiang, et al. Multi-vehicle cooperative decision-making and trajectory planning based on stackelberg game theory in mixed driving environments[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(3): 117-133.

[7] 杜思雨, 赵清海, 何田. 基于博弈论的智能网联汽车换道决策模型研究[J/OL]. 复杂系统与复杂性科学: 1-9[2025-06-06]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1402.N.20231212.1202.002.html.

[8] 梁军, 李燕青, 王文飒, 等. 智能网联环境下CAV混行车流集聚策略及分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2024, 52(1): 118-125.
Liang Jun, Li Yan-qing, Wang Wen-sa, et al. Agglomeration strategy and analysis of CAV mixed traffic flow in intelligent and connected environment [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(1): 118-125.

[9] 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.

[10] 曹丹妮, 吴建军, 屈云超, 等. 考虑自动车队强度的高速公路非常规瓶颈交通流控制策略研究 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(3): 78-88.
Cao Dan-ni, Wu Jian-jun, Qu Yun-chao, et al. Analysis of traffic flow control strategy at non-recurrent bottleneck on freeway considering platoon intensity of connected and automated vehicles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(3): 78-88.

[11] 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, 2020, 540: No. 122721.

[12] 梁军, 杨程灿, 王文飒, 等. 自动驾驶车辆混行集聚MAS控制模型[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 172-183.
Liang Jun, Yang Cheng-can, Wang Wen-sa, et al. Agglomeration control model based on multi-agents for autonomous vehicles in mixed traffic environment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(6): 172-183.

[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 in intelligent network[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(2): 348-356.

[14] Liu Z P, Xu C X, Chen L J, et al. Dynamic traffic flow entropy calculation based on vehicle spacing[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 252(5): No. 052073.

[15] 吴德华, 彭锐, 林熙玲. 智能网联异质交通流混合特性[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(4): 761-768.
Wu De-hua, Peng Rui, Lin Xi-ling. Hybrid characteristics of heterogeneous traffic flow in intelligent network[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(4): 761-768.

[16] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal De Physique I, 1992, 2: 2221-2229.

[17] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Physical Review E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 2000, 62: 1805-1824.

[18] Milanés 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: 285-300.

[19] 李瑞杰, 李林波, 李杨, 等. 跟驰模型场景基准分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2021, 49(7): 922-932.
Li Rui-jie, Li Lin-bo, Li Yang, et al. Scenario-based benchmark analysis for car-following models [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(7): 922-932.