

文章编号: 2095-2163(2022)05-0050-07

中图分类号: U495

文献标志码: A

考虑自动驾驶车队的高速公路双车道混合交通流行驶模型

胡晨曦, 韩 印, 王嘉文, 李少波

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 为了使自动驾驶车辆以及人工驾驶车辆所构成的混合车流达到高效通行的目的,有必要研究自动驾驶车队这种新型的驾驶形式。首先,本文基于对自动驾驶车辆特性的分析,建立了一个自动驾驶车辆集聚策略模型,该模型包括以车辆集聚为目的的换道模型以及使车队内部车辆能够有效集聚的跟驰模型。接着以元胞自动机模型为基础搭建了一个高速公路双车道仿真平台。最后将自动驾驶车辆集聚模型与无策略模型进行对比,通过设定不同指标来对道路通行效率以及交通拥堵率进行分析。结果表明:采用自动驾驶车辆集聚策略模型相较于无策略模型会获得更好的道路通行能力,尤其是在自动驾驶车辆渗透率超过40%之后;混合交通拥堵率会随着自动驾驶车辆渗透率的提高而下降。

关键词: 自动驾驶; 车队; 混合交通流; 换道模型; 跟驰模型; 渗透率

Mixed traffic flow model of two-lane expressway considering autonomous vehicle platoon

HU Chenxi, HAN Yin, WANG Jiawen, LI Shaobo

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] In order to make the mixed traffic of autonomous vehicles and human driven vehicles effectively drive, it is necessary to study the new driving form of autonomous vehicle platoon. First, based on the analysis of the characteristics of autonomous vehicles, the paper establishes an autonomous vehicle gather strategy model, this model includes the lane changing model for the purpose of vehicle agglomeration and a car following model for the agglomeration of vehicles in the vehicle platoon effectively. Then, the method uses cellular automata model to establish two-lane expressway simulation platform. Finally, the autonomous vehicle gather strategy model is compared with the none strategy model by setting different indicators to analyze the road traffic efficiency and traffic congestion rate. The results show that when the penetration rate of autonomous vehicles is over 40%, autonomous vehicle gather strategy model have more obvious advantages than the none strategy model; the mixed traffic stream congestion rate will decrease with the increasing of the penetration rate of autonomous vehicles.

[Key words] autonomous vehicle; vehicle platoon; mixed traffic flow; lane changing model; car following model; penetration rate

0 引言

自动驾驶是车辆作为运载工具发展到一定阶段的产物,是智能交通产业发展的核心,相较于人工驾驶车辆(Human Driven Vehicles, HDVs),自动驾驶车辆(Autonomous Vehicles, AVs)能够依靠车载探测设备,实时获取前后车辆的运动状态信息,从而使车与车之间相互联系并组成车队进行行驶,车队行驶相较单个车辆行驶能够更好地达到节约资源、减少碳排放以及有效地利用道路资源的目的。2019年,中共中央、国务院印发的《交通强国建设纲要》明确提出要加强智能网联汽车(智能汽车、自动驾驶、车路协同)研发,这也代表着人们会逐步接受并选购自动驾驶车辆,但在自动驾驶车辆能够完全替换人工

驾驶车辆之前,会存在一段混合交通流(Mixed Traffic Flow, MTF),也就是自动驾驶车辆和人工驾驶车辆混合行驶的过渡期,如何保证在这段过渡时期内车辆能够安全有效行驶具有很重要的意义。

车队的概念随着自动驾驶技术不断提高而被提出,Zhou等人^[1]从道路通行能力和交通稳定性2个方面揭示了车队长度变化对交通流运行所带来的影响。Wu等人^[2]建立了车队内部车辆场势来描述车辆周边的风险分布,同时设计了车队换道的过程,并在此基础上提出了车队换道临界距离模型;Sun等人^[3]的研究以车队效益最大化为目标,确定了一种利益重新分配机制,以激励车辆组成车队进行行驶。Li等人^[4]将图论和场势论相结合,实现了车队的编队以及行驶的优化。

作者简介: 胡晨曦(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:智能交通系统;韩 印(1964-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:交通规划与管理、交通控制与仿真、智能交通系统。

收稿日期: 2021-12-06

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

关于车辆位于 MTF 中该如何进行行驶,许多学者也对此做了研究,宗芳等人^[5]建立了适用于网联自动驾驶车辆、自动驾驶车辆、人工驾驶车辆 3 种类型车辆的混流跟驰模型。梁军等人^[6]面向未来混行交通环境,结合交通工程中人、车、路等要素设计了基于多智能体系统的网联自动驾驶车辆集聚控制模型。Amirgholy 等人^[7]提出一种在 MTF 背景下的最佳车道管理策略。杨达等人^[8]研究了在车联网环境下的自动驾驶车辆车道选择决策模型。

综上,目前国内外学者积累了很多有关自动驾驶车队以及混合交通流的研究成果。然而针对于自动驾驶车队的研究,大多以如何形成车队为目的,没有考虑形成车队后车队内部车辆该如何行驶,同时针对于混合交通流的研究,大多是以车辆个体为研究对象,很少能将车队这一概念融入进去。

为了弥补以上空白,本文主要做出以下 3 点贡献:

- (1) 建立了一个自动驾驶车辆集聚模型,其换道模型使 AVs 之间能相互联系组成车队,其跟驰模型使得车队内部的车辆能够更加迅速地集聚和行驶。
- (2) 利用元胞自动机模型搭建了一个高速公路双车道平台。
- (3) 将自动驾驶车辆集聚模型与无策略模型的性能进行对比分析,通过道路通行效率以及交通拥堵率两个指标进行比较可以得出自动驾驶车辆集聚模型更具有优势。

1 问题描述

本文实现的具体场景如图 1 所示。图 1 中的场景为双车道高速公路,在道路中行驶着 AVs 及 HDVs,其中黑色小车代表 AVs,白色小车代表 HDVs,AVs 之间相互联系并形成车队进行行驶,HDVs 则仅仅根据自身情况判断进行行驶。



图 1 高速公路单向双车道上的混合车流

Fig. 1 Mixed traffic on two-lane expressway

本文利用了元胞自动机模型对这种有 AVs 集聚行驶行为的 MTF 进行了仿真模拟,元胞自动机^[9](Cellular Automata, CA)最早是由冯·诺依曼(J.von Neumann)提出的一种模拟生命系统复制功能的网

格动力学模型。元胞自动机本质上是一种离散的模式,而交通元素从本质上来讲也是离散的,因此利用元胞自动机模型对交通进行研究拥有着先天的优势,本文将通过元胞自动机构建单向双车道高速公路的仿真环境。关键参数示意图如图 2 所示。模型的整体公式如下所示:

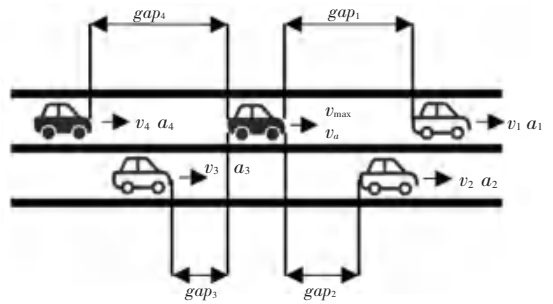


图 2 关键参数示意图

Fig. 2 Key parameters schematic diagram

$cellular(i, lanes) =$

$$\left\{ \begin{matrix} plaza, v_{max}, v, a, gap_1, gap_2, gap_3, gap_4, \\ v_1, v_2, v_3, v_4, a_1, a_2, a_3, a_4 \end{matrix} \right\} \quad (1)$$

$$space = \{ cellular(1, 1), \dots, cellular(i, lanes), \dots, cellular(n, n) \} \quad (2)$$

其中, $cellular(i, lanes)$ 为一个位于第 $lanes$ 条道路第 i 个元胞的状态; $plaza$ 为车辆类型; v_{max} 为车辆最大车速; v 为车辆瞬时车速; a 为车辆瞬时加速度; gap_1 为当前车道车辆与当前车道前车之间的距离; gap_2 为当前车道车辆与相邻车道前车之间距离; gap_3 为当前车道车辆与相邻车道后车之间的距离; gap_4 为当前车道车辆与当前车道后车之间的距离; v_1 为当前车道车辆前车的瞬时车速; v_2 为相邻车道前车的瞬时车速; v_3 为相邻车道后车的瞬时车速; v_4 为当前车道后车的瞬时车速; a_1 为当前车道车辆前车的瞬时加速度; a_2 为相邻车道前车的瞬时加速度; a_3 为相邻车道后车的瞬时加速度; a_4 为当前车道后车的瞬时加速度; $space$ 为整个元胞空间内所有元胞的集合。

2 模型建立

2.1 换道模型

车辆换道(Lane Changing, LC)指的是车辆因驾驶员的一种决策从一条车道更换到另一条车道的一种行为,而换道模型^[10]则是利用数学语言对这种行为的抽象化表达。换道模型的建立主要包含 2 个方面。一是换道决策模型,二是换道实施模型。其中,换道决策模型主要通过所获得的道路上交通信

息来对车道进行选择。换道实施模型指的是车辆在执行换道的过程中与其他车辆发生交互。本文拟着重对换道的决策部分进行讨论,弱化换道具体实施部分,所以选用了不考虑换道细节的元胞自动机模型。

根据以往的换道决策模型研究可以发现,车辆是否决定换道与前后车辆以及相邻车道车辆的瞬时状态有关,包括位置、间隙、速度和加速度。

对此,Jin 等人^[11]建立了一种以当前位置的车辆能在未来获得一个更远的移动空间为动机的换道模型,以下将该模型称为未来决策换道模型,具体模型如下所示:

$$gap_1 + v_1 * T < gap_2 + v_2 * T \quad (3)$$

当前车道前方的车辆在下个时间步长内所移动的距离若小于相邻车道前方车辆在下一个时间步长内所移动的距离就执行换道,反之则不进行换道。本文在该模型的基础上考虑了车辆加速度对换道决策的影响,所做的修改如下所示:

$$gap_1 + (v_1 + a_1) * T < gap_2 + (v_2 + a_2) * T \quad (4)$$

在满足该模型的基础上,会有以下4种可能:

$$gap_1 < gap_2, v_1 + a_1 < v_2 + a_2 \quad (5)$$

$$gap_1 < gap_2, v_1 + a_1 \geq v_2 + a_2 \quad (6)$$

$$gap_1 \geq gap_2, v_1 + a_1 < v_2 + a_2 \quad (7)$$

$$gap_1 \geq gap_2, v_1 + a_1 \geq v_2 + a_2 \quad (8)$$

其中,式(5)的类型是最适合进行换道,而式(8)的类型是最不适合进行换道。本文的目标是使AVs能够形成车队进行行驶,因此根据这个特性来为AVs和HDVs制定2种不同的换道策略模型。针对HDVs的换道策略规则模型如下所示:

$$gap_1 + v_1 + a_1 < gap_2 + v_2 + a_2 \quad (9)$$

$$gap_1 < gap_2, v_1 + a_1 < v_2 + a_2 \quad (10)$$

$$gap_1 < gap_2, v_1 + a_1 \geq v_2 + a_2 \quad (11)$$

若HDVs满足以上条件,车辆就执行换道,本文将其称为None策略模型。而在以上条件的基础上,AVs考虑了式(7)的类型和式(8)的类型,若AVs相邻车道前方3个元胞长度内存在其他AVs,那么车辆也会执行换道,本文将其称为自动驾驶车辆集聚策略模型(Autonomous Vehicle Gather),简称AVG策略模型。现给出本文模型的数学表述如下:

条件一:

$$gap_1 + v_1 + a_1 < gap_2 + v_2 + a_2 \quad (12)$$

$$gap_1 < gap_2, v_1 + a_1 < v_2 + a_2 \quad (13)$$

$$gap_1 < gap_2, v_1 + a_1 \geq v_2 + a_2 \quad (14)$$

条件二:

$$AV_{exist}(i, lanes) =$$

$$\begin{cases} \text{存在} & plaza((i + 3:i), total - lanes) = 1 \\ \text{不存在} & \text{other} \end{cases} \quad (15)$$

$$gap_1 + v_1 + a_1 < gap_2 + v_2 + a_2 \quad (16)$$

$$gap_1 \geq gap_2, v_1 + a_1 < v_2 + a_2 \quad (17)$$

$$gap_1 \geq gap_2, v_1 + a_1 \geq v_2 + a_2 \quad (18)$$

其中, AV_{exist} 为用于判断目标车辆的相邻车道3给元胞长度内是否存在其他AVs; $plaza$ 取值为1代表着自动驾驶车辆,取值为2代表人工驾驶车辆; $total$ 为计算相邻车道的一个数值。只要满足该模型中的任意一个条件都可以进行换道。

2.2 跟驰模型

车辆跟驰(Car Following)可以理解跟驰车辆在纵向上的相互作用,车辆跟驰模型^[12]可以从交通工程的角度以及统计物理的角度进行划分。从统计物理的角度去考虑,针对道路上运行的混合车流,参考了Nagel等人^[9]对初等元胞自动机184号规则进行推广所得的NaSch模型,并将该模型应用于MTF车辆之间的跟驰现象,同时本文也考虑了AVs集聚形成车队后,车队车辆之间的跟驰情况,并利用NaSch模型来解释这种跟驰现象。

NaSch模型规定从 t 时刻到 $t + 1$ 时刻的过程中,车辆按照以下4个步骤进行演化:

步骤1 加速规则。道路上的车辆在一个仿真步长时间之内,按照不同车流密度下的随机概率的不同来对车辆进行加速,其中车流密度越大,加速的可能性越小。

步骤2 减速规则。道路上的车辆因前车的速度无法满足自身需求而选择减速。

步骤3 随机慢化规则。道路上的车辆因各种随机因素干扰而造成的车辆减速行为,其随机慢化的概率受车间距离以及自身车速的影响。

步骤4 运动规则。车辆根据调整后的车速在下一个仿真时间点对位置进行调整。车辆跟驰模型的加速减速规则如下所示:

$$a(i, lanes) = \begin{cases} 1 & v < v_1 + gap_1 - d_{safe} \\ 0 & v = v_1 + gap_1 - d_{safe} \\ -1 & v > v_1 + gap_1 - d_{safe} \end{cases} \quad (19)$$

$$v(i, lanes) = \begin{cases} \min(v + a, v_{max}) & a = 1 \\ v & a = 0 \\ \max(v + a, 0) & a = -1 \end{cases} \quad (20)$$

其中, $a(i, lanes)$ 为当前车辆的加速度,判断当

前车速与前车车速和与前车之间的距离之和相比较,可以将速度状态标记为加速、减速以及保持速度不变; $v(i,lanes)$ 为当前车辆根据 $a(i,lanes)$ 值的不同而选择不同的速度变化形式; d_{safe} 为车与车之间的安全距离。

车辆跟驰模型的随机慢化规则^[13]如下所示:

$$p = [f(gap_1)]^\alpha [g(v)]^\beta \quad (21)$$

$$v(i,lanes) = \begin{cases} \max(v-1,0) & rand < p \\ v & rand > p \end{cases} \quad (22)$$

其中, p 为随机慢化的概率^[11]; $f(gap_1) =$

$$\frac{e^{-a_1 gap_1}}{1 + e^{-a_2 gap_1}}$$

为影响因子、即车间间距对随机慢化概率 p 的贡献,这里取 $a_1 = a_2 = 0.4$; $g(v) = \frac{1 - e^{-b_1 v}}{1 + e^{-b_2 v}}$

为影响因子、即车辆自身车速对随机慢化概率 p 的贡献,这里取 $b_1 = b_2 = 0.4$; a 为对应于车间间距的权重因子, $a = a_0 e^{k_1(gap_1 - d_{safe})}$,这里取 $a_0 = 0.7$, $k_1 = 0.1$, $d_{safe} = 1$; β 为对应于车辆自身车速权重因子, $\beta = \beta_0 e^{k_2(v_{i+1} - v_i)}$,这里的 $\beta_0 = 0.7$, $k_2 = 0.1$, $v_{i+1} - v_i$ 为当前车辆下一时间点的车速与当前时间点的车速之差; v 为车辆随机慢化后的值,随机生成一个0到1之间的数值,若该值小于随机慢化概率 p ,则对当前车速进行减速处理。

车辆跟驰模型的运动规则如下所示:

$$pos = i + v + a \quad (23)$$

$$plaza(pos,lanes) = plaza(i,lanes) \quad (24)$$

$$v_{max}(pos,lanes) = v_{max}(i,lanes) \quad (25)$$

$$v(pos,lanes) = v(i,lanes) + a(i,lanes) \quad (26)$$

其中, pos 为下一个时间点更新后的元胞位置,其值等于当前时间点的位置加上当前时间点的速度; $plaza(pos,lanes)$ 、 $v_{max}(pos,lanes)$ 、 $v(pos,lanes)$ 以及 $a(i,lanes)$ 为更新后的数值。

由于AVs相较于HDVs具有更好的可控性,依据该特性可以在AVG策略模型的基础上建立一个AVs车队内部车辆跟驰模型,车队内的车辆以领头的车辆为目标,将自身的车速逐步向领头车辆的车速以及车辆的位置靠拢,而领头的车辆则根据原本的跟驰模型来调整自身的车速,AVs车队内车辆跟驰模型数学公式具体如下:

$$a(i,lanes) = \begin{cases} 1 & v < v_{lead} + gap_{lead} - d_{safe} \\ 0 & v = v_{lead} + gap_{lead} - d_{safe} \\ -1 & v > v_{lead} + gap_{lead} - d_{safe} \end{cases} \quad (27)$$

$$v_{max} = v_{max lead} \quad (28)$$

$$v(i,lanes) = \begin{cases} \min(v + a, v_{max}) & a = 1 \\ v & a = 0 \\ \max(v + a, 0) & a = -1 \end{cases} \quad (29)$$

其中, v_{lead} 为车队中领头车辆的瞬时车速; gap_{lead} 为车队中目标车辆距离领头车辆的距离; $v_{max lead}$ 为车队中领头车辆的最大车速。跟驰模型的运动规则跟前文相同。

3 实验仿真与评价

3.1 仿真平台的建立

为了研究混合交通车流在2种不同的策略下的表现情况,选用了Matlab2017a进行建模以及仿真。

本文利用元胞自动机所建立的仿真平台为双车道高速公路,因此根据仿真需求建立一个 $4 * n$ 的元胞空间,包含2条车道及2条边界,其中元胞空间的边界不允许车辆行驶。根据标准小汽车长度为5m,以及为了避免车与车之间前后相互紧挨着需要给车辆前后一个自由活动空间,因此将单个元胞长度设置为7.5m,同时根据国内高速公路道路宽度标准规范规定高速公路每个车道的宽度应为3.75m,故将单个元胞宽度设置为3.75m。每一个元胞都包含着一些信息,研究中利用 $plaza$ 的取值代表该处元胞所处的一个状态,若该处元胞存在AV,那么 $plaza = 1$,若该处元胞存在HDV,那么 $plaza = 2$,若该元胞不存在任何车辆,那么 $plaza = 0$ 。当该处元胞状态为存在车辆,则赋予该处元胞最大车速 v_{max} 以及利用最大车速 v_{max} 所生成的当前车速 v ,同时也赋予该处元胞一个初始加速度 a 。在元胞空间生成初始车辆之后,计算每一辆车的其余参数周边车辆的速度 v 、加速度 a 以及和周边车辆的距离 gap 。

本文所设置的2种不同的换道策略均在元胞空间内完成仿真,每次运行1000个时间步长,文中所设置的时间步长为Matlab仿真时间的1s,为了保证最终效果的可靠性,每一个策略均在生成不同初始车流的情况下迭代100次,求得的结果取100次迭代平均值。同时为了研究不同车流密度以及不同AVs渗透率情况下对整个交通流状态的影响,本文设置了对比实验,AVs的渗透率指代自动驾驶车辆占总的车辆的比例。

3.2 道路通行效率分析

为了分析不同密度下的混合车流的整体通行效率,本文通过人工控制调节车流密度以及AVs的渗透率,通过数据处理分析得到了密度-速度曲线图以及密度-流量曲线图,见图3。

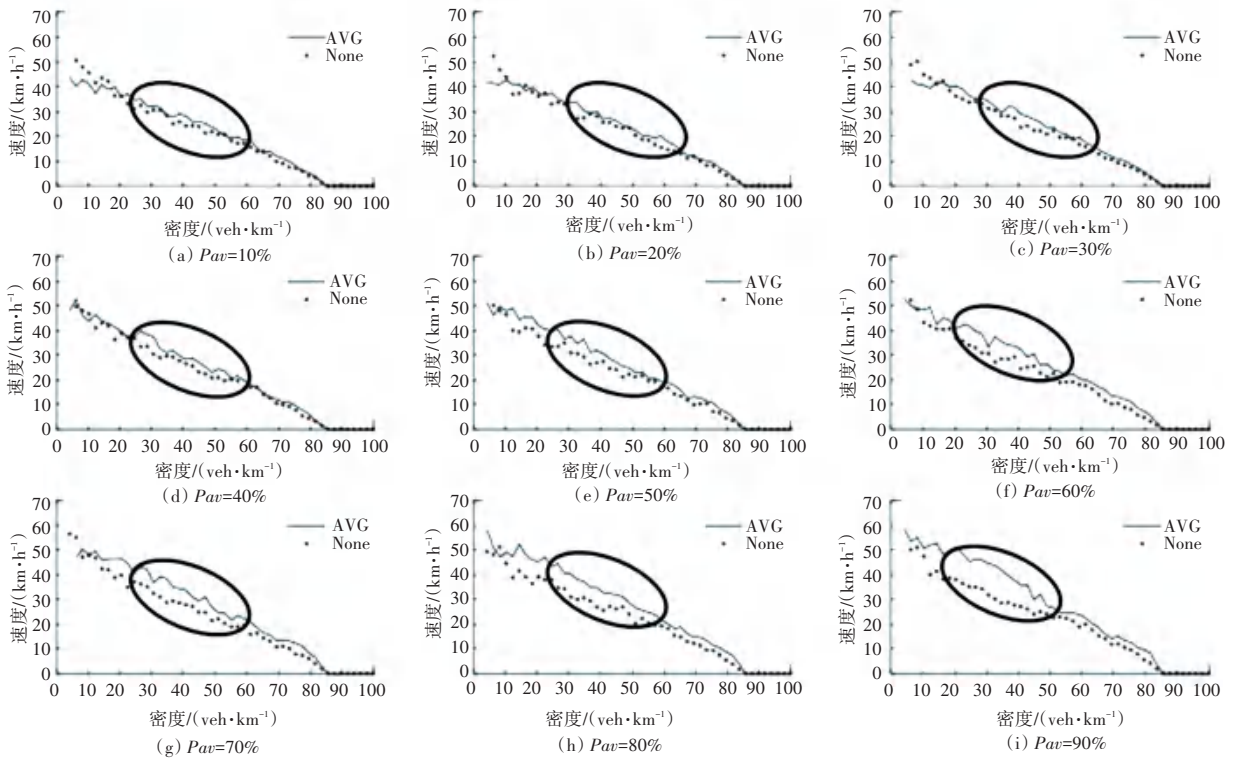


图3 混合交通流密度-速度图

Fig. 3 Mixed traffic density-velocity diagram

3.2.1 密度-速度

由图3中可以看出,随着密度的逐渐上升,速度呈现出一种递减的趋势,从初期的自由流到末期的阻塞流,MTF的平均车速从最大值到零,本文构建的模型符合实际的交通流状况。对比2种不同的策略,在AVs的渗透率处在30%以下时,两者的差异不大,当AVs的渗透率超过40%以后,AVG策略的优势就逐步体现出来,随着AVs比例增多,这种优势也就愈发明显。

3.2.2 密度-流量

相较于密度-速度折线图,密度-流量折线就更加直观。混合交通流密度-流量图如图4所示。通过观察图4发现,2种策略下的MTF均在密度达到40 veh/km至50 veh/km之间,交通量达到顶峰,并在达到顶峰之后呈现下降的趋势。同样与密度-速度曲线图分析的结果相同,当AVs的渗透率超过了40%之后,AVG策略的优势将渐渐地体现出来,并在道路上的AVs渗透率达到最大时,AVG策略的优势将拉到最大。

3.3 交通拥堵分析

交通拥堵是一种车多且车速缓慢的交通现象,为了能将这一指标在MTF中所体现,本文将车速小

于2元胞长度/s的车辆定义为处在拥挤的车辆,利用拥挤的车辆在整体交通流中所占的比例来代表交通流的拥挤程度。利用如下公式对交通拥堵比例进行计算:

$$R_{jam} = \frac{N_{jam}}{T \cdot N} \quad (30)$$

其中, R_{jam} 表示车辆拥堵的比例; N_{jam} 表示在每一个时间步长内拥堵的车辆数; T 表示总的时间步长; N 表示车辆的总数。

计算不同AV渗透率以及不同密度下的 R_{jam} ,并将其进行可视化展示,如图5所示。图中,颜色越偏白色、代表其拥堵的程度越低,颜色越偏黑色、代表其拥堵程度越高。

从横向上来对交通拥堵图进行分析,当密度处于0~40 veh/km之间时,交通流正处于一个自由流状态,所以其颜色变化的效果不明显,当密度超过40 veh/km以后,交通拥堵程度会随着密度的增大而增大。从纵向上来对交通拥堵图进行分析,随着AV渗透率的增大,可以明显发现交通的拥堵程度正在下降,但是当密度超过80 veh/km以后,交通流将处在一个饱和的状态,这种优势将不再存在。

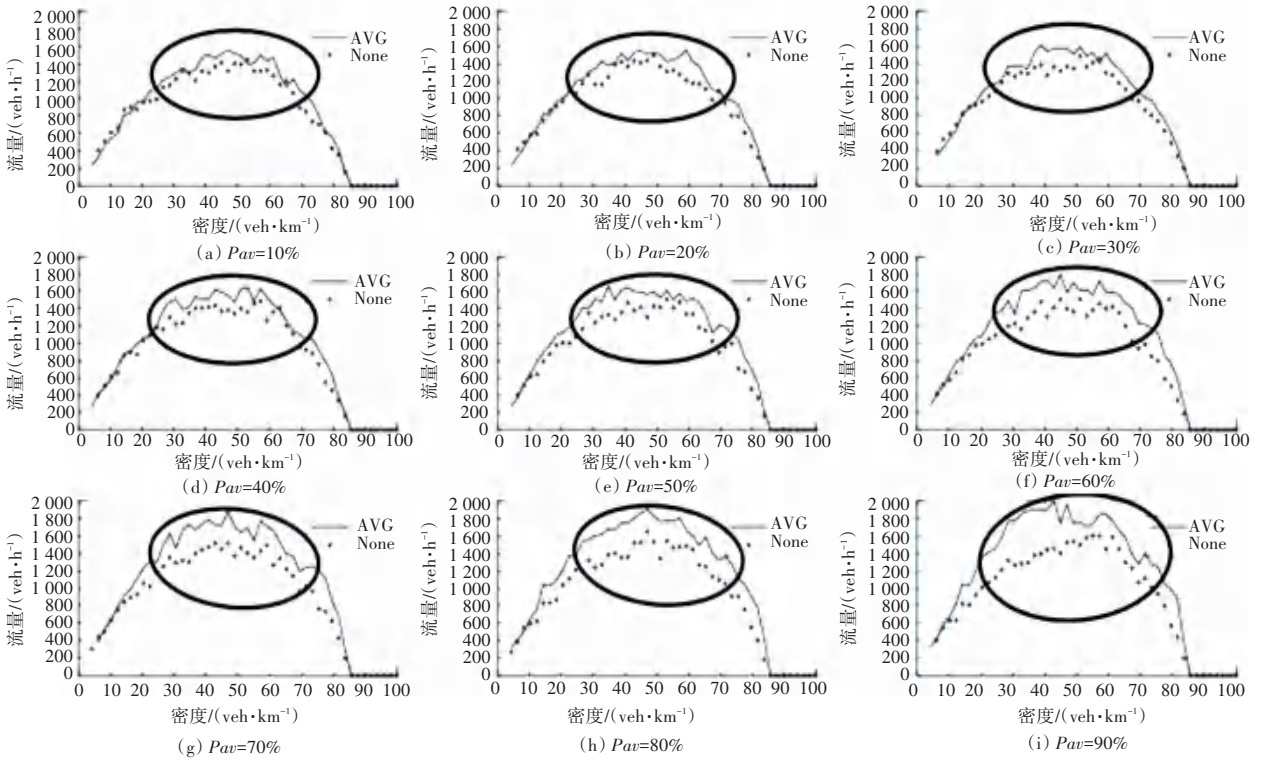


图4 混合交通流密度-流量图

Fig. 4 Mixed traffic density-flow diagram

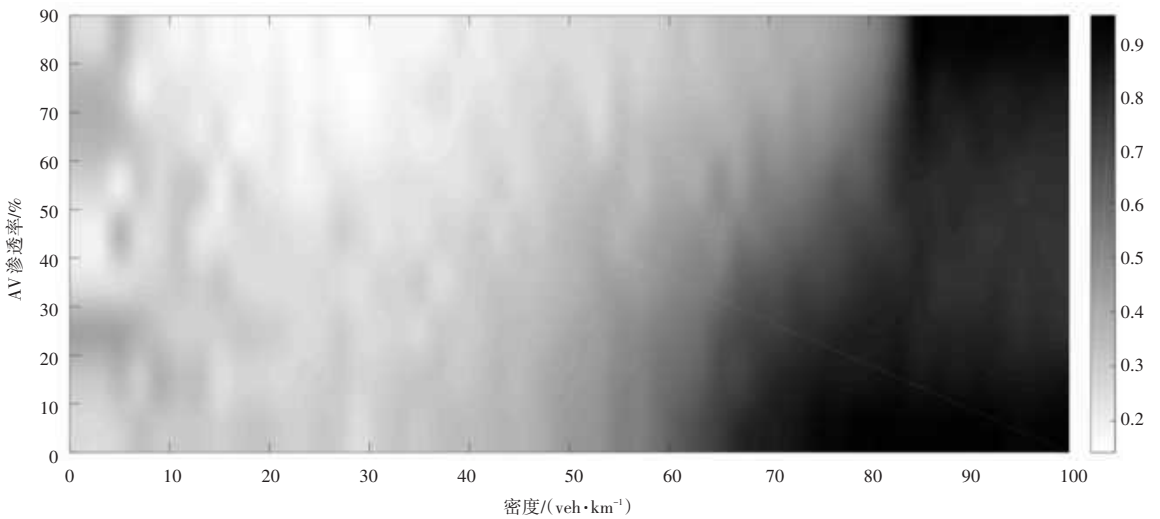


图5 交通拥堵分析图

Fig. 5 Traffic congestion analysis diagram

4 结束语

本文在对自动驾驶车辆特性分析的基础上建立了AVG策略模型,该模型考虑了车辆换道与车辆跟驰两个方面,并在换道模型中融入了AVs集聚概念,还在跟驰模型中考虑了AVs形成车队后车队内车辆的跟驰行为,接着利用元胞自动机模型搭建了

一个高速公路双车道模型,最后与None策略模型进行对比,分析不同AV渗透率下和不同MTF密度下所得到的道路通行效率以及交通拥堵程度,可以得出AVG策略模型在MTF中相较于None策略模型来说拥有着更好的优势,尤其是当AV渗透率超过40%以上,MTF密度在40 veh/km到50 veh/km (下转第60页)