

4-15-2024

## Modeling and Analysis of Hybrid Traffic Flow Considering Actual Behavior of Platoon

Xi Wang

*Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China, 1136905313@qq.com*

Xiujian Yang

*Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China, yangxiujian2013@163.com*

Xiaohan Jia

*Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China*

Shenyi Wang

*Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Modeling and Analysis of Hybrid Traffic Flow Considering Actual Behavior of Platoon

## Abstract

**Abstract:** To explore the effect of actual behavior of autonomous vehicular platoon on traffic flow, aiming at the hybrid traffic flow mixed with predecessor following(PF) platoon which is modeled according to the actual control strategy, a hybrid traffic flow model is established based on cellular automata(CA) modeling method. Simulation analysis shows that the effect of platoon characteristics such as time headway, market penetration, platoon size, and control gains on hybrid traffic flow presents coupling and nonlinear properties. The spatiotemporal behavior of hybrid traffic flow with different platoon characteristics is generally much different. Reducing time headway or increasing platoon market penetration is generally beneficial to enhance road capacity. The consistent laws of the effect of platoon size and control gains on traffic flow are not obvious, which must be combined with other platoon characteristics to carry out the analysis.

## Keywords

intelligent transportation, vehicular platoon, cellular automata, hybrid traffic flow, predecessor following

## Recommended Citation

Wang Xi, Yang Xiujian, Jia Xiaohan, et al. Modeling and Analysis of Hybrid Traffic Flow Considering Actual Behavior of Platoon[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4): 929-940.

## 面向队列实际行为特性的混合交通流建模及分析

王曦<sup>1</sup>, 杨秀建<sup>1,2\*</sup>, 贾晓寒<sup>1</sup>, 王申义<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 为探讨自主汽车队列实际行为特性对交通流的影响, 针对混入前车跟驰(PF)汽车队列的混合交通流, 考虑队列实际行为特性并按照其实际控制策略进行建模, 基于元胞自动机方法建立了混合交通流模型。仿真分析表明: 队列车头时距、队列渗透率、队列规模、控制增益等队列特征对混合交通流呈现出耦合及非线性的影响特性, 不同队列特征下的混合交通流时空特征差异显著; 减小队列车头时距或增加队列渗透率对提升道路的通行能力总体是有利的; 队列规模及控制增益对交通流量的一致性影响规律不明显, 都需要结合其他队列特征进行具体分析。

**关键词:** 智能交通; 汽车队列; 元胞自动机; 混合交通流; 前车跟驰

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2024)04-0929-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1510

**引用格式:** 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.

**Reference format:** Wang Xi, Yang Xiujian, Jia Xiaohan, et al. Modeling and Analysis of Hybrid Traffic Flow Considering Actual Behavior of Platoon[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4): 929-940.

## Modeling and Analysis of Hybrid Traffic Flow Considering Actual Behavior of Platoon

Wang Xi<sup>1</sup>, Yang Xiujian<sup>1,2\*</sup>, Jia Xiaohan<sup>1</sup>, Wang Shenyi<sup>2</sup>

(1. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** To explore the effect of actual behavior of autonomous vehicular platoon on traffic flow, aiming at the hybrid traffic flow mixed with predecessor following(PF) platoon which is modeled according to the actual control strategy, a hybrid traffic flow model is established based on cellular automata(CA) modeling method. Simulation analysis shows that the effect of platoon characteristics such as time headway, market penetration, platoon size, and control gains on hybrid traffic flow presents coupling and nonlinear properties. The spatiotemporal behavior of hybrid traffic flow with different platoon characteristics is generally much different. Reducing time headway or increasing platoon market penetration is generally beneficial to enhance road capacity. The consistent laws of the effect of platoon size and control gains on traffic flow are not obvious, which must be combined with other platoon characteristics to carry out the analysis.

**Keywords:** intelligent transportation; vehicular platoon; cellular automata; hybrid traffic flow; predecessor following

收稿日期: 2022-12-16 修回日期: 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(52162046)

第一作者: 王曦(1998-), 女, 硕士生, 研究方向为智能车辆与智能交通技术。E-mail: 1136905313@qq.com

通讯作者: 杨秀建(1980-), 男, 教授, 博士, 研究方向为智能车辆与智能交通技术。E-mail: yangxiujian2013@163.com

## 0 引言

汽车队列作为智能网联汽车技术的一种重要实施方式,通过合理的控制使队列内车辆以较小的车间距跟驰行驶,对缓解交通拥堵、提升交通安全性、降低能量消耗等都有积极作用<sup>[1-4]</sup>。汽车队列在结构形式、运行特性等方面都与传统人工驾驶车辆有很大的不同,汽车队列与人工驾驶车辆形成的混合交通流引起了交通、车辆及物理等相关领域专家学者的关注,并进行了较多的研究探讨<sup>[5-8]</sup>。汽车队列实施方案较多,不同实施方案的汽车队列实际行为特性差异显著,因此,有必要深入研究混入不同实施方案汽车队列的混合交通流特性。

模型仿真仍然是研究交通流特性的重要方法之一,其中,元胞自动机是应用较多的一种建模仿真方法,具有规则简单、计算速度快的特点,可模拟复杂系统时空演化,被广泛用于研究复杂的交通现象。NS(NaSch)模型<sup>[9]</sup>作为代表性的经典模型之一,制定了加速、减速、随机慢化和位置更新4条规则以模拟复杂的交通流。国内外学者基于NS模型对混合交通流特性进行了深入研究,Zhu等<sup>[10]</sup>建立了由队列和人工驾驶车辆组成的混合交通流模型,讨论了队列渗透率和队列规模对道路流量、交通拥堵,以及换道频率的影响。Jiang等<sup>[11]</sup>建立了考虑驾驶行为的混合交通流模型,分析了3种不同跟驰模型以及在不同智能网联车辆渗透率下交通拥堵和速度波动情况。Yang等<sup>[12]</sup>改进现有元胞自动机模型,分析得到增加自动驾驶车辆比例,车道变换概率会明显降低,减少反应时间在单车道下可显著提高道路通行能力,而对于双车道没有明显影响。Zeng等<sup>[13]</sup>提出一种基于实时信息的平均速度反馈策略对改进的舒适驾驶模型进一步改进,结果表示其能保持交通流量的稳定性并提高道路运行效率。Zhou等<sup>[14]</sup>研究了队列规模对道路容量和交通流稳定性的影响,较大

的队列规模有助于增加道路容量,当队列渗透率大、队列规模小时,交通流稳定性会更好。秦严严等<sup>[15]</sup>建立异质交通流的解析表达并推导基本图模型设计数值仿真实验,对期望车间时距进行参数敏感性分析,其建立的解析表达能应用于异质交通流特性研究。董长印等<sup>[16]</sup>针对车辆下匝道行驶特性,建立车辆横向运动的换道模型,分析出CACC车辆混入率对于下匝道瓶颈路段的拥挤情况。

可以看出,当前关于混入智能网联车辆的混合交通流研究已较为深入,然而,现有文献鲜有考虑汽车队列自身动力学特性对于混合交通流特性的影响。汽车队列本身是一种复杂的多智能体系统,队列车辆通过车载传感器及V2V通信获取其他车辆的运动状态并自主调整控制自身的运动,与单一的自动驾驶汽车不同,队列车辆还需要服从队列的整体运动需要。汽车队列按照队形策略和信息流拓扑结构的不同实施方案较多,包括前车跟驰(predecessor following, PF),双向跟驰(bidirectional following, BDF),前车-领航者跟驰(predecessor-leader following, PLF)等多种形式<sup>[17]</sup>。不同形式的汽车队列实际行为特性差异显著,对汽车队列本身的实际行为特性及其控制策略有大量的研究,涉及队列的稳定性、可扩展性、队形控制策略等多个方面的问题<sup>[18-21]</sup>。考虑到汽车队列自身特殊的实际行为特性,队列内部车辆之间以及队列与异质交通流之间必然存在复杂的动力学耦合关系,现有文献对汽车队列的建模大多采取简单处理,如将整个队列视作一个刚体整体,无法反映汽车队列系统自身的实际行为特性,更无法反映队列内车辆的跟驰调整与混合交通流间的耦合作用。

PF队列是一种基础的汽车队列形式,其他形式的队列大多由此发展而来,本文考虑PF队列,研究在人工驾驶车辆中混入PF汽车队列的元胞自动机混合交通流建模及其混合交通流特性。

# 1 考虑队列实际行为特性的混合交通流建模

## 1.1 队列实际行为特性描述

汽车队列控制一般是指由领航车及其跟随车辆组成的车队,通过车载雷达等传感器及V2V等方式获得其他车辆的运动状态,从而以相同速度及期望车辆间距安全跟驰行驶。队列车辆之间相互耦合,一种合理的车辆间距控制策略对汽车队列的整体稳定性有积极作用。间距策略包括定间

距策略(constant spacing policy, CSP)和可变间距策略(variable spacing policy, VSP)。CSP策略虽然可以使队列车辆以较小的车间距行驶,但在通讯受限的情况下难以保证队列的稳定性<sup>[22]</sup>。因此,本文基于VSP间距策略对汽车队列进行建模仿真。

混入PF汽车队列的单车道混合交通流如图1所示,其中,人工驾驶车辆通过人工驾驶进行跟驰,队列车辆可通过雷达等车载传感器探测与前车的相对速度及间距等信息,实现自动跟驰行驶。

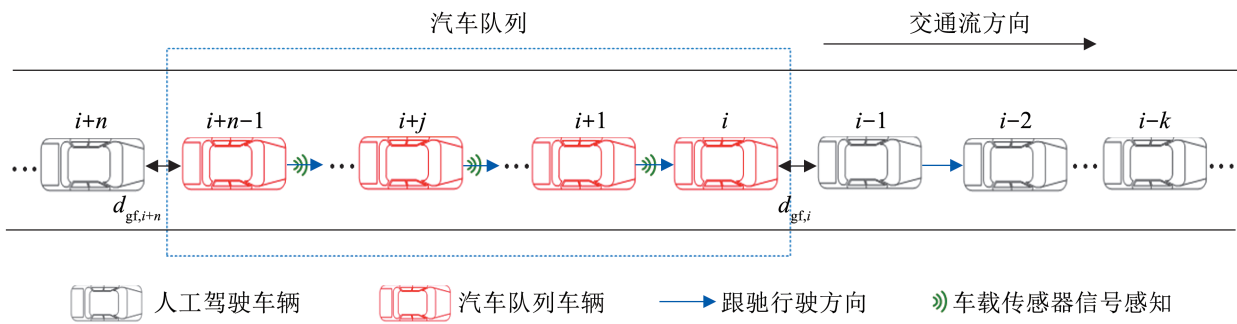


图1 混入PF汽车队列的混合交通流  
Fig. 1 Hybrid traffic flow mixed with PF platoon

本文基于VSP间距策略的车间距为

$$d_s = d + L_{car} \quad (1)$$

$$d_{des} = d_s + hv \quad (2)$$

式中:  $d_s$  为最小安全间距;  $d$  为车辆间最小距离;  $L_{car}$  为车辆车身长度;  $d_{des}$  为期望车间距;  $h$  为车头时距;  $v$  为车速。  $h$  或  $v$  越大, 车辆间距越大。

文献常将汽车队列建模为一个刚性整体来研究对混合交通流的影响, 但汽车队列作为一种多智能体系统, 需要队列内部车辆间协同控制才能达到队列整体控制的目的, 其内部实际行为特性与混合交通流特性之间的耦合作用不可忽视, 因此, 本文根据队列自身实际行为特性得出队列中各车运行状态, 队列车辆可通过间距控制和速度控制来获取自身加速度, 通过队列车辆运行规则可得出自身速度。若当前车为队列的领航车, 对应于如图1中的车辆  $i$ , 其加速度为

$$a_i(t) = k_p [X_{i-1}(t) - X_i(t) - d_s - hv_i(t)] + k_v [v_{i-1}(t) - v_i(t)] \quad (3)$$

式中:  $a_i(t)$  为第  $i$  辆车对应的加速度;  $k_p$ 、 $k_v$  分别为队列的间距控制增益和速度控制增益;  $X_i(t)$ 、 $v_i(t)$  分别为队列领航车的位移和速度;  $X_{i-1}(t)$ 、 $v_{i-1}(t)$  分别为队列领航车前方车辆  $i-1$  的位移和速度。

若当前车为队列第二辆车, 对应于图1中的车辆  $i+1$ , 其加速度为

$$a_{i+1}(t) = k_v [v_i(t) - v_{i+1}(t)] + k_p [X_i(t) - X_{i+1}(t) - d_s - hv_{i+1}(t)] \quad (4)$$

式中:  $X_{i+1}(t)$ 、 $v_{i+1}(t)$  分别为队列中车辆  $i+1$  的位移和速度。

以此类推, 可以确定队列中其他车辆的加速度, 这里不再赘述。

## 1.2 安全间距

前方车辆紧急刹车时后方车辆为避免与其发生



追尾需要保持一定的安全距离，车辆的速度、制动性能，以及驾驶人的反应时间都是影响安全间距的重要因素。混合交通流中主要存在汽车队列及人工驾驶2类车辆。考虑到人工驾驶车辆驾驶人反应时间的影响，本文在已有安全间距的基础上增加一段安全保护距离，以保证更安全行驶。基于Gipps模型<sup>[23]</sup>计算的安全间距和安全速度分别为

$$d_{gs,i} = X_{i-1}(t) - X_i(t) - L_{i-1} + d_{gs} = v_i(t)\tau_i + \frac{v_i^2(t)}{2B_i} - \frac{v_{i-1}^2(t)}{2B_{i-1}} + d_{gs} \quad (5)$$

$$v_{safe,i}(t) = -B_i\tau_i + \sqrt{B_i^2\tau_i^2 + B_i \left\{ 2[X_{i-1}(t) - X_i(t) - L_{i-1}] - \tau_i v_i(t) + \frac{v_{i-1}^2(t)}{B_{i-1}} \right\}} \quad (6)$$

式中： $d_{gs,i}$ 为车辆*i*与其前车的安全间距； $d_{gs}$ 为车辆*i*相对其前车的安全保护距离； $X_{i-1}(t)$ 和 $X_i(t)$ 分别为车辆*i-1*和车辆*i*在*t*时刻的位置； $L_{i-1}$ 为车辆*i-1*的车身长度； $v_{i-1}(t)$ 为车辆*i-1*在*t*时刻的速度； $v_{safe,i}(t)$ 为车辆*i*在*t*时刻为避免追尾前车的安全速度； $B_i$ 和 $B_{i-1}$ 分别为车辆*i*和车辆*i-1*的最大减速度； $\tau_i$ 为车辆*i*的反应时间，对队列车辆和人工驾驶车辆分别用 $\tau_i^{Platoon}$ 和 $\tau_i^{HDV}$ 表示。

### 1.3 元胞自动机模型

本文混合交通流是由人工驾驶车辆和队列车辆组成的时间、空间和状态都呈离散化的复杂系统，采用元胞自动机方法进行建模和仿真。基于经典的NS模型对混合交通流建模，并对元胞尺寸进行细化，使仿真模拟更接近真实路况。

#### 1.3.1 元胞尺寸细化

在NS模型并行更新过程中，未考虑前车运动对后车车前空间的影响，从而导致仿真流量偏小。在传统元胞尺寸下，车辆的运行速度、加减速度，以及位移不可能完全都是元胞尺寸的整数倍，本文考虑到这种由于元胞尺寸的粗糙性引起的模型精度降低的“迟滞效应”情况，对元胞尺寸进行细化。车辆跟驰模型更新步长一般较小，以体现

车辆运行状态的连续变化对位移的影响。本文将更新步长设为1 s，将元胞长度细化成1 m。为了真实体现车辆之间的跟驰行为特性以及运动连续性，在计算车辆速度、加减速度时允许小数的存在，在计算车辆位移时对其整数部分进行更新，小数点部分进行余量累计更新，以提高仿真结果的精度<sup>[24]</sup>。辅助余量更新过程为

$$Y_i(t + \Delta t) \rightarrow Y_i(t + \Delta t) - \text{fix}(Y_i(t + \Delta t)) \quad (7)$$

$$Y_i(t + \Delta t) \rightarrow Y_i(t) + v_i(t)\Delta t \quad (8)$$

式中： $Y_i(t)$ 为车辆*i*在*t*时刻位置更新时的辅助余量(初始值为0)； $\text{fix}(\cdot)$ 为取整函数。

#### 1.3.2 车辆产生离去模型

为了更准确地分析模拟道路实际运行状况，本文选取开放性边界对车辆进出道路进行控制，车辆进入模拟路段按照泊松分布原理进行随机发车<sup>[25]</sup>，分布概率为

$$P(x) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^x}{x!} \quad (9)$$

式中： $P(x)$ 为该路段观测时间*t*内到达*x*辆车的概率； $\lambda$ 为单位时间内的平均到达率； $\lambda t$ 为在观测时间*t*内的平均到达车辆数目。利用随机生成的概率 $P \in (0, 1)$ 与概率 $P(x)$ 进行比较，并判定若入口位置与第一辆车间距大于车身长度，则车辆按照规则驶入道路：

$$\begin{aligned} &\text{if } X_i(t) \geq L_{car} \ \& \ P < P(x) \\ &\text{then } X_i(t + \Delta t) = 1 \\ &\quad v_i(t + \Delta t) = \min(v_i(t + \Delta t), v_{safe,i}(t)) \end{aligned} \quad (10)$$

式中： $v_i(t + \Delta t)$ 为下一时刻产生新的车辆速度。

车辆车头位置位于模拟路段终点时，车辆驶离模拟路段，车辆的位置、速度清零：

$$\begin{aligned} &\text{if } X_i(t) > L \\ &\text{then } X_i(t) = 0 \\ &\quad v_i(t + \Delta t) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中： $L$ 为模拟路段总长度。

#### 1.3.3 车辆跟驰模型

队列车辆和人工驾驶车辆采用不同的跟驰规则，首先判断当前车辆的类型，跟驰模型框架如图2所示。

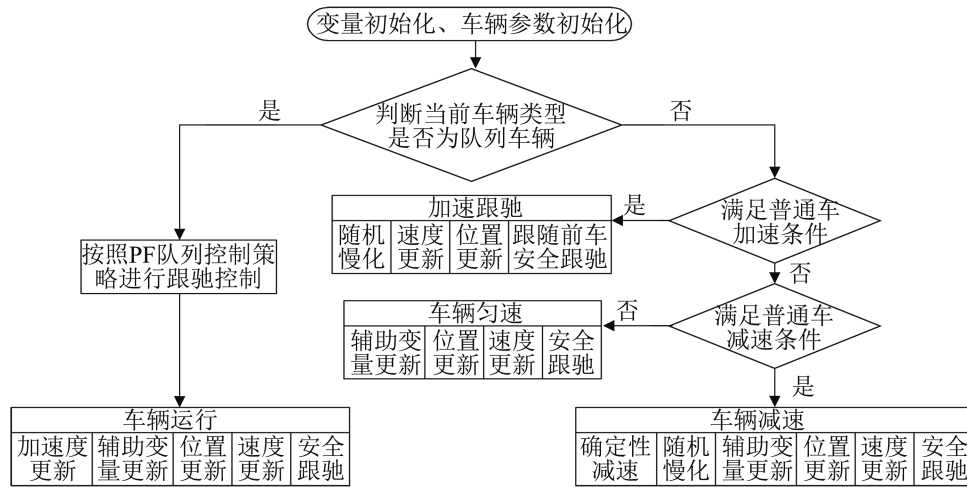


图2 跟驰模型框架

Fig. 2 Car following model framework

## (1) 人工驾驶车辆跟驰规则

## 1) 加速规则

车辆总是期望以最大的速度行驶, 若车辆行驶速度未达到最大速度, 并且与前车的间距大于车辆之间的安全间距, 意味着车辆可以在保证行驶安全的情况下进行加速。对照图1所示的混合交通流示意图, 图中车辆  $i-k$  为人工驾驶车辆, 当  $d_{gf,i-k} > d_{gs,i-k}$  时:

$$v_{i-k}(t+\Delta t) \rightarrow \min(v_{i-k}(t) + a_{i-k}\Delta t, v_{c,\max}, d_{gf,i-k}, v_{safe,i-k}(t)) \quad (12)$$

式中:  $d_{gf,i-k}$  为车辆  $i-k$  与其前车的间距;  $v_{i-k}(t+\Delta t)$  为车辆  $i-k$  加速后的速度;  $a_{i-k}$  为车辆  $i-k$  的常规加速度;  $v_{c,\max}$  为车辆最大行驶速度;  $v_{safe,i-k}(t)$  为车辆  $i-k$  在  $t$  时刻的安全速度。

## 2) 减速规则

车辆与前车的间距小于车辆之间的安全间距时, 为保证安全后车将进行减速, 保证与前方车辆的安全间距, 当  $d_{gf,i-k} < d_{gs,i-k}$  时:

$$v_{i-k}(t+\Delta t) \rightarrow \max(\min(v_{safe,i-k}(t), d_{gf,i-k}), 0) \quad (13)$$

## 3) 匀速规则

车辆与前车的间距等于车辆之间的安全间距并且前车平稳行驶时, 在保证安全的前提下后车会继续匀速行驶, 当  $d_{gf,i-k} = d_{gs,i-k}$  时

$$v_{i-k}(t+\Delta t) \rightarrow \min(v_{i-k}(t), d_{gf,i-k}) \quad (14)$$

## 4) 随机慢化

由于在实际驾驶过程中总存在一些不确定因素, 如驾驶员的人为因素等, 导致车辆的随机减速, 本文假设人工驾驶车辆以概率  $P_{slow}$  随机慢化减速:

$$v_{i-k}(t+\Delta t) \rightarrow \max(v_{i-k}(t+\Delta t) - b_{i-k}\Delta t, 0) \quad (15)$$

式中:  $b_{i-k}$  为车辆  $i-k$  的随机慢化减速度。

## 5) 位置更新

车辆根据其速度进行位置更新, 首先进行辅助余量更新, 当  $Y_{i-k}(t+\Delta t) \geq 1$  时:

$$Y_{i-k}(t+\Delta t) \rightarrow Y_{i-k}(t+\Delta t) - \text{fix}(Y_{i-k}(t+\Delta t)) \quad (16)$$

再进行位置更新:

$$X_{i-k}(t+\Delta t) \rightarrow X_{i-k}(t) + \text{fix}(Y_{i-k}(t+\Delta t)) \quad (17)$$

## (2) 队列车辆跟驰规则

本文考虑 PF 汽车队列, 队列车辆通过间距控制和速度控制跟驰其前车的运动, 队形策略和控制策略决定了队列的实际行为特性, 在混合交通流中车辆队列的实际行为特性还与交通流的耦合作用密切相关。

## 1) 运行规则

对照图1所示的混合交通流示意图, 根据前文所述队列实际行为特性, 队列车辆运行状态由队列内部车辆结合队列的整体控制目标协同控制

决定, 此时当前车辆可根据车载传感器或V2V通讯获取前车运行状态, 根据式(3)(4)计算出当前车辆的实际加速度后代入队列车辆的运行规则, 从而实现队列车辆的速度更新。图中车辆 $i+j$ 为队列车辆, 以该车为例的队列车辆的运行规则为

$$v_{i+j}(t+\Delta t) \rightarrow \min(v_{i+j}(t)+a_{i+j}(t)\Delta t, v_{p,\max}, d_{gf,i+j}, v_{safe,i+j}(t)) \quad (18)$$

式中:  $a_{i+j}(t)$ 为车辆 $i+j$ 的加速度;  $v_{p,\max}$ 为队列车辆的最大行驶速度。

## 2) 位置更新

队列车辆的加速度和速度依照运行规则确定后, 同理根据式(16)(17)的规则进行位置更新。

## 2 混合交通流特性分析

以 $L=2000\text{ m}$ 的高速公路单车道为例, 采用开放性边界条件, 小元胞尺寸可方便车辆长度、速度等设定, 提高模型的精确, 本文设元胞尺寸为 $1\text{ m}$ , 道路上人工驾驶车辆总数为 $N_1$ , 队列总数为 $N_2$ , 队列内部车辆规模为 $n$ , 道路上车辆总数为 $N=N_1+nN_2$ , 密度 $\rho=N/L$ ,  $t$ 时刻内道路车辆的总平均车速 $\bar{v}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N v_i(t)$ 。初始状态下人工驾驶车辆和队列车辆在道路中随机分布, 并随机赋予其 $0\sim v_{\max}$ 的初速度。考虑 $p=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 共4种队列渗透率, 在同一渗透率下仿真5次并求取平均值作为分析结果, 以消除随机性对仿真结果的影响。仿真环境参数设置如表1所示。

### 2.1 交通流基本图分析

对考虑队列实际行为特性的混合交通流模型和将队列视作一个刚性整体不考虑队列实际行为特性的模型进行比较。假设队列渗透率 $p=0.6$ , 队列车头时距 $h=0.5\text{ s}$ , 队列车辆间距控制增益 $k_p=1$ , 速度控制增益 $k_v=1$ , 将队列建模为刚性整体的模型队列内采用 $2\text{ m}$ 的固定车间距, 图3给出了2种模型的流量-密度特性对比散点图。

表1 仿真参数值

Table 1 Value for parameters in simulation

参数	取值
仿真时长/s	1 000
人工驾驶车辆最大加、减速度 $a_{car}/(\text{m/s}^2)$	6
人工驾驶车辆限速值 $v_{c,\max}/(\text{m/s})$	33
车辆车身长度 $L_{car}/\text{m}$	5
队列车辆反应时间 $\tau_i^{\text{Platoon}}/\text{s}$	1
人工驾驶车辆常规加速度 $a_{i-k}/(\text{m/s}^2)$	6
步长/s	1
人工驾驶车辆随机慢化概率 $P_{slow}$	0.3
队列车辆限速值 $v_{p,\max}/(\text{m/s})$	33
安全保护距离 $d_{gs}/\text{m}$	2
人工驾驶车辆反应时间 $\tau_i^{\text{HDV}}/\text{s}$	2
人工驾驶车辆随机慢化减速度 $b_{i-k}/(\text{m/s}^2)$	6

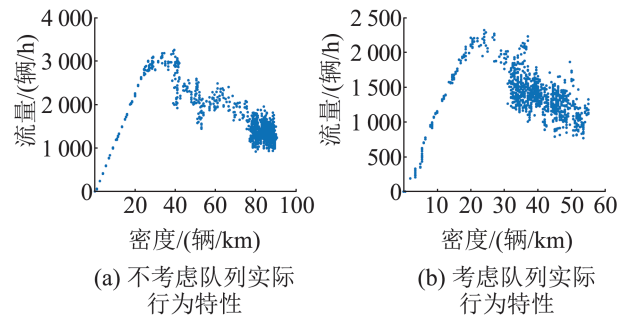


图3 本文模型与现有模型的流量-密度特性比较  
Fig. 3 Comparison of flow-density property between model in this work and exist model

可以看出, 2种模型的道路流量都是随车流密度的增加先上升到峰值再下降, 符合交通流基本特性。进一步可以看出, 本文考虑队列实际行为特性模型的峰值流量比将队列建模为刚性整体不考虑队列实际行为特性模型的峰值流量低, 说明队列的实际行为特性会对交通流的流量特性产生影响。队列内部车辆由于协同控制导致复杂的队列动力学特性, 并且与交通流之间存在复杂的耦合关系。而不考虑队列实际行为特性而采用固定间距的模型, 并不能体现出队列自身动态特性, 也就无法反映出与交通流间的动态耦合关系。

进一步考察队列渗透率、队列车头时距、队列规模等队列特征的影响, 图4~5分别给出了混入两车队列和三车队列的混合交通流的流量-密度



特性, 仿真中  $k_p=1$ ,  $k_v=1$ 。可以看出, 道路流量随车流密度的增加都是先近似线性上升, 到达峰值后再逐渐下降, 流密图都呈抛物线形。当车流密度小于最佳车流密度时, 车流处于自由流状态, 车流平均速度较高; 当车流密度等于最佳车流密度时, 车流出现跟驰现象, 车速受到限制; 在车流密度大于最佳车流密度时, 车流处于拥堵流状态, 车速和交通通行能力下降, 将产生交通拥堵。

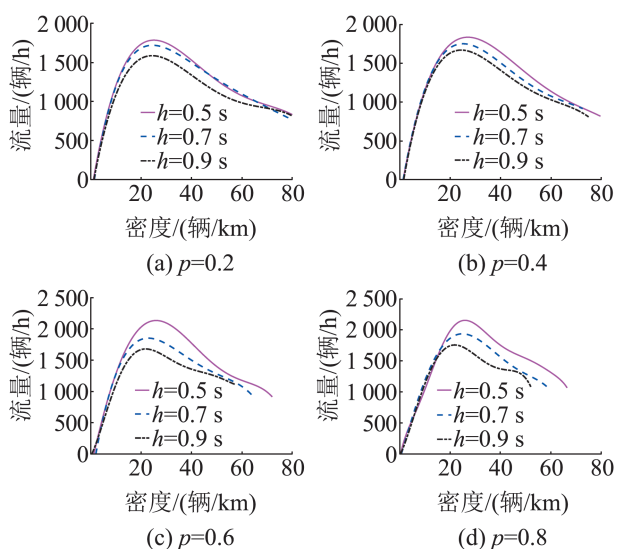


图 4 混入两车 PF 队列的混合交通流流量-密度特性  
Fig. 4 Flow-density property of hybrid traffic flow mixed with two-vehicle PF platoon

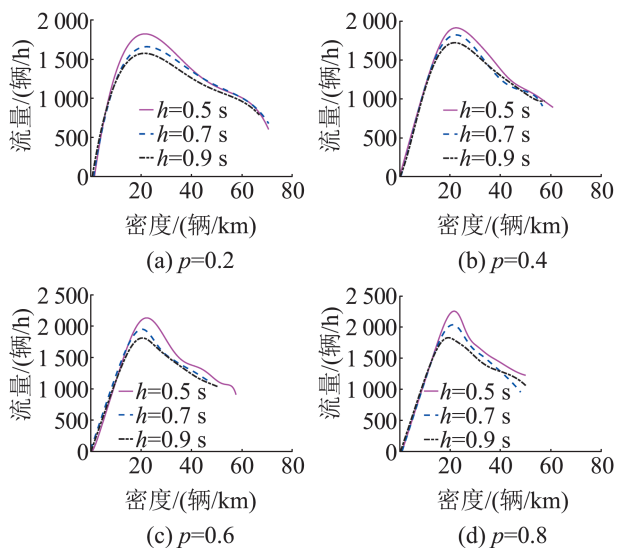


图 5 混入三车 PF 队列的混合交通流流量-密度特性  
Fig. 5 Flow-density property of hybrid traffic flow mixed with three-vehicle PF platoon

比较车头时距和队列渗透率的影响, 明显可以看出, 在同一队列渗透率下, 峰值流量及对应的最佳车流密度都是随车头时距的减小而增加的。这正是汽车队列的一个重要优势, 队列车辆通过自动加减速控制, 与人工驾驶车辆相比反应更快, 允许以更小的车间距跟驰行驶, 可以省出更多的道路空间给人工驾驶车辆, 从而可以使人工驾驶车辆随机慢化减小, 整个混合交通流更为流畅。随着队列渗透率的增加, 峰值流量随车头时距的变化并非一致变化, 展现出了非线性的变化特征, 并且混入的队列规模不同时这种非线性变化规律也不同。

这可从队列与人工驾驶车辆及整个混合交通流之间的耦合作用来理解, 增加队列车头时距尽管对队列的调整控制和队列行驶的流畅性是有利的, 但也意味着队列反应快、允许近距跟驰的优势不能充分利用, 在一定的车流密度下人工驾驶车辆的道路空间被挤压, 会加剧人工驾驶车辆的随机慢化, 对整个交通流的流畅性而言又是不利的, 从最终结果来看是不利的一面影响更大, 从而导致车头时距增加峰值流量下降的现象, 具体影响程度还与队列渗透率和混入的队列规模有关。随着队列渗透率的增加, 能达到的最大车流密度减小, 这是因为在设定的相同边界条件下, 队列车辆反应快, 车辆通过速度较快, 从而能达到的最大密度较小。

就队列规模的影响而言, 结合图 4~5 来看, 在相同的队列渗透率和车头时距下, 混入三车队列的峰值流量比混入两车队列的峰值流量总体略高, 但过了峰值流量后混入三车队列的流量随密度的增加下降也更快一些。这可从车辆队列与交通流间的动态耦合来理解, 增加队列规模会导致队列的调整控制更为困难, 进而影响交通流的流畅性, 但是在一定的队列车辆渗透率下, 增加队列规模会导致道路中队列的数量减少, 这对减小车辆队列、人工驾驶车辆以及交通流之间的耦合影响又是有利的; 在峰值流量附近车流密度相对较小, 队列与交通流间的耦合作用小, 有利的一面影响较大, 但是随着车流密度的增加耦合作用

增强，交通流“时走时停”会加剧规模较大队列调整控制的难度，不利的影影响增加，从而严重影响交通流的流畅性。

## 2.2 时空轨迹图分析

图6~7分别给出了混入两车队列和三车队列的混合交通流的时空轨迹图，队列车头时距为 $h=0.7$  s，仍考虑 $p=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 共4种队列渗透率。可以看出，随着时间步数及空间位置的变化，轨迹呈现出紊乱、波折、团簇等物理现象，展现出了明显的异质性交通流特征，反映了车辆队列与人工驾驶车辆交通流特性的差异性。在车辆队列渗透率较小时，轨迹团簇面积较大，拥堵情况严重，随着队列渗透率的增加，轨迹团簇面积减少，拥堵情况逐渐缓解甚至消散。这与流密图的分析是吻合的，随着队列渗透率的增加，反应更快的队列车辆增加，随机慢化较大的人工驾驶车辆减少，整个交通流可以以更高的速度运行，交通拥堵逐渐缓解，峰值流量增加。对比图6~7可以看出，混入三车队列与混入两车队列的交通流时空轨迹特征差异非常显著，混入三车队列的自由流与拥堵流更为分明。

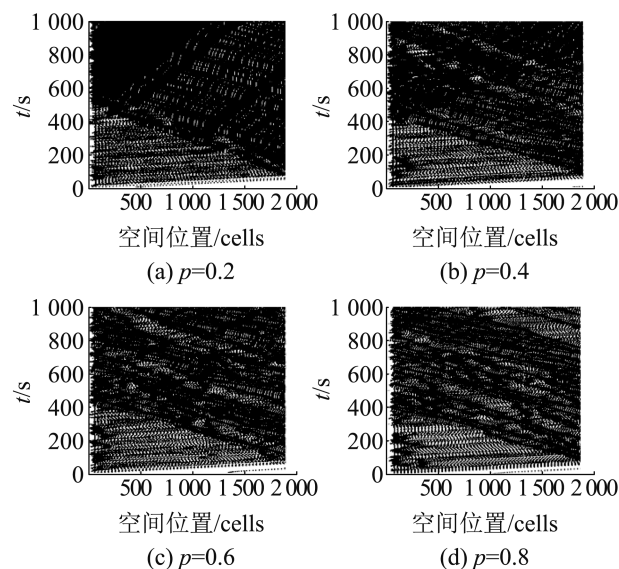


图6 混入两车PF队列的混合交通流的时空轨迹图  
Fig. 6 Space-time trajectory diagram of hybrid traffic flow mixed with two-vehicle PF platoon

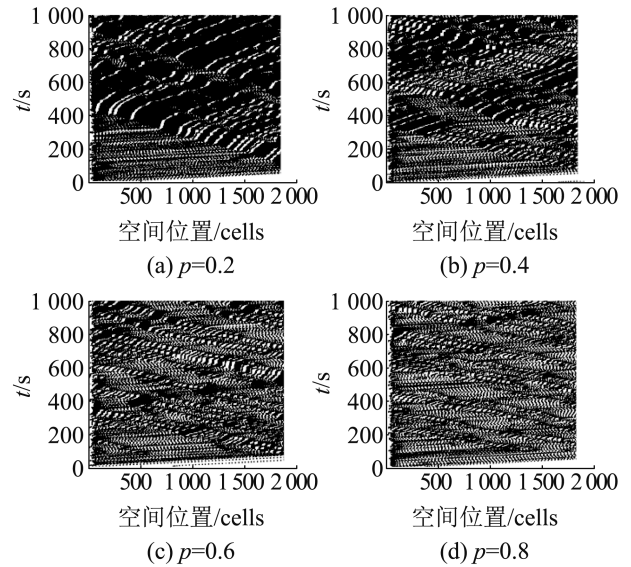


图7 混入三车PF队列的混合交通流的时空轨迹图  
Fig. 7 Space-time trajectory diagram of hybrid traffic flow mixed with three-vehicle PF platoon

图8给出了混入两车队列和三车队列的混合交通流在不同渗透率下对应的交通流速度分布，队列车头时距为 $h=0.7$  s。可以看出，无论是两车队列还是三车队列都是随着队列渗透率的增加，车辆平均速度标准差减小。混入三车队列的车辆平均速度标准差与两车队列相比更小，证明当队列渗透率增加以及队列规模增加，道路车辆平均速度分布更均匀，混合交通流运行更平稳。

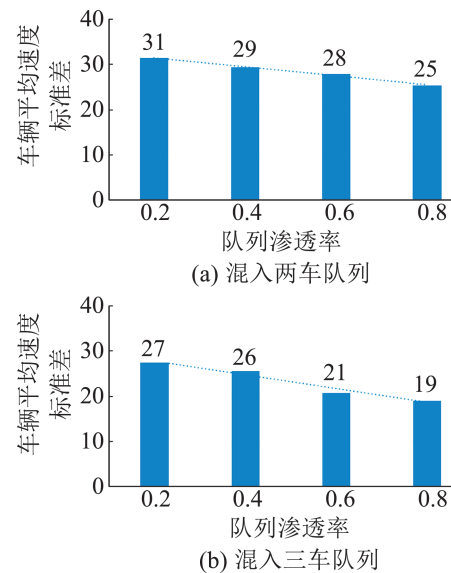


图8 混合交通流的速度分布特性  
Fig. 8 Speed distribution of mixed traffic flow

### 2.3 队列控制增益的影响分析

汽车队列的跟驰控制策略是影响其自身的实际行为特性的重要因素, 在与人工驾驶车辆形成的混合交通流中必然会影响到整个交通流的行为特性。针对PF队形策略的汽车队列, 分析间距控制增益 $k_p$ 和速度控制增益 $k_v$ 对混合交通流的影响, 考察 $p=0.4$ 、 $0.8$ 队列渗透率, 控制增益对混入两车队列和三车队列的混合交通流行为特性的影响分别如图9~10所示。

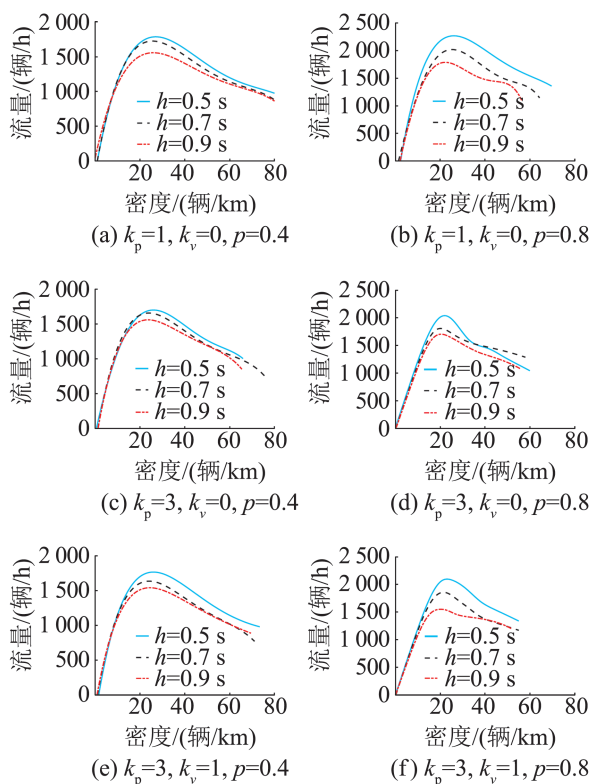


图9 控制增益对混入两车队列的混合交通流特性的影响  
Fig. 9 Effect of control gain on behavior of hybrid traffic flow mixed with two-vehicle platoon

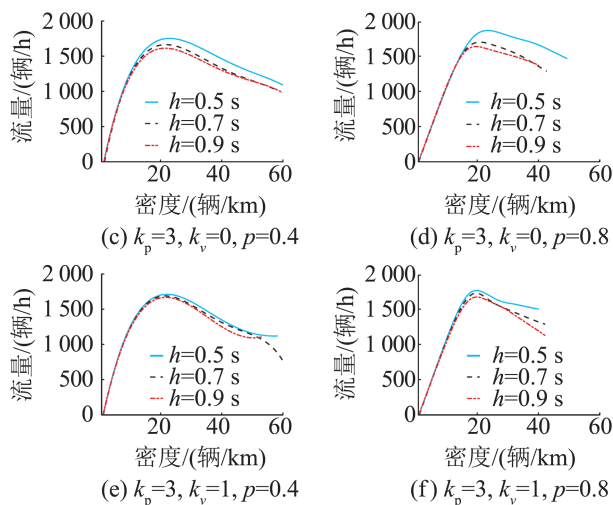
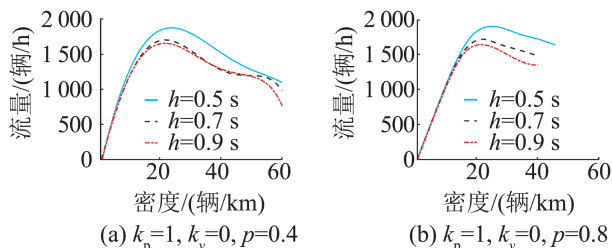


图10 控制增益对混入三车队列的混合交通流特性的影响  
Fig. 10 Effect of control gain on behavior of hybrid traffic flow mixed with three-vehicle platoon

首先, 无论是混入两车队列还是三车队列, 在各控制增益下车头时距和队列渗透率对峰值流量的影响规律都与前文的分析一致。但是, 队列规模的影响呈现出一些不同的现象: 渗透率 $p=0.4$ 时, 在各控制增益下混入两车队列或三车队列的峰值流量都可能出现相对较大的情况, 具体还要取决于车头时距, 总体差别不太明显; 在渗透率 $p=0.8$ 时, 在各控制增益下混入三车队列比混入两车队列的峰值流量总体要小。这里队列规模的影响与前文的分析有所不同, 这与队列的控制增益有很大关系, 即在图9~10的分析中控制增益 $k_p$ 、 $k_v$ 的取值组合与图4~5的取值情况不同。队列控制增益是决定汽车队列实际行为特性的一个重要因素, 队列规模越大其实际行为特性受控制增益的影响越显著, 而具有不同实际行为特性的队列与交通流间又会产生不同程度的耦合作用, 所以, 单就队列规模而言, 其对混合交通流流量的一致性影响规律并不明显, 具体情况还要结合具体的队列控制增益进行具体分析。

结合图9~10可以看出, 队列控制增益的变化对不同队列规模以及同一队列规模而不同队列渗透率下的交通流流量特性的影响规律均存在差异。



无论是混入两车队列还是三车队列，控制增益的变化对队列车头时距较小情况下的流量特性影响更大，队列车头时距越小队列调整控制难度越大，对增益的变化就越敏感。增加控制增益虽然跟驰响应加快，但也容易导致超调量大调整时间长的问题。所以，单就队列控制增益而言，其对混合交通流量的影响要结合混入的队列规模、车头时距进行具体分析。

考虑队列车头时距  $h=0.7\text{ s}$ ，队列渗透率  $p=0.4$ ，控制增益对混入两车队列和三车队列混合交通流的时空轨迹影响，如图 11~12 所示。可以看出，混入不同队列规模的混合交通流时空轨迹特征有

显著差异，在队列规模、车头时距和队列渗透率都相同的情况下，改变队列的控制结构或控制增益，都会明显影响混合交通流的时空轨迹特征。在仅有间距控制的情况下增加控制增益，对混入两车队列的混合交通流而言，时空轨迹团簇特征减弱，如图 11(a)(b)所示；对混入三车队列的情况来说，增加间距控制增益，时空轨迹特征变化并不显著，如图 12(a)(b)所示。在间距控制的基础上增加速度控制后，无论是混入两车队列还是混入三车队列，时空轨迹畅通区域增多，尤其是对混入三车队列的情况而言自由流与拥堵流更为分明，如图 11(b)(c)和图 12(b)(c)的所示。

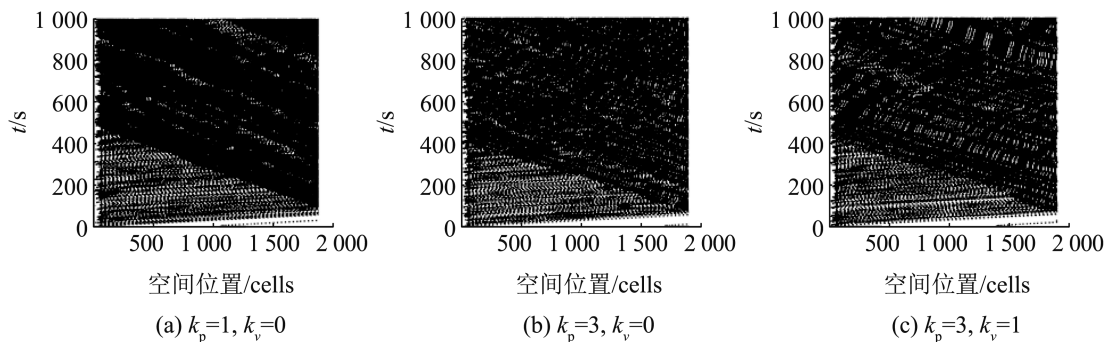


图 11 队列控制增益对混入两车队列的混合交通流时空轨迹的影响

Fig. 11 Effect of control gains on space-time trajectory diagram of hybrid traffic flow mixed with two-vehicle platoons

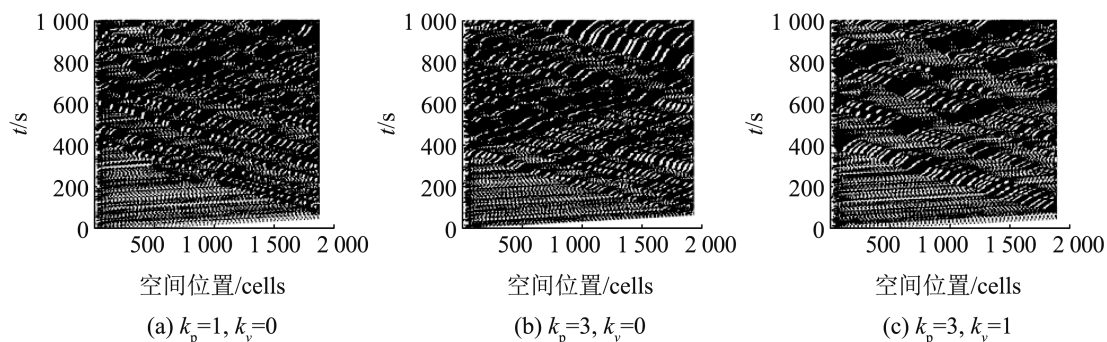


图 12 队列控制增益对混入三车队列的混合交通流时空轨迹的影响

Fig. 12 Effect of control gains on space-time trajectory diagram of hybrid traffic flow mixed with three-vehicle platoons

### 3 结论

不同形式的汽车队列都有其特殊的实际行为特性，混入交通流中必定会与交通流产生不同的耦合作用。本文首先考虑 PF 这种基础的汽车队列

形式，重点研究了在人工驾驶车辆中混入 PF 汽车队列的混合交通流特性。队列车辆与人工驾驶车辆采用不同的跟驰策略，为真实反映队列的实际行为特性，对队列车辆按照 PF 队列的实际控制原理进行建模，建立了混合交通流元胞自动机模型。

从流密特性图和时空轨迹图可以看出, 本文所建的混合交通流模型符合实际的交通流规律特性, 通过仿真分析了队列车头时距、队列渗透率、队列规模和 PF 汽车队列控制增益对混合交通流特性的影响。结论如下:

(1) 减小队列车头时距可以充分利用队列反应快的优势, 可显著提升混合交通流的峰值流量;

(2) 对同一车头时距, 增加队列的渗透率对提升交通流的峰值流量和道路通行能力总体是有利的, 尤其是在车头时距较小时影响更为明显;

(3) 随着队列渗透率的增加, 峰值流量随车头时距的变化展现出了非线性的变化特征, 具体还会随着混入的队列规模的不同而有所差异, 这主要与队列和交通流之间的耦合作用有关;

(4) 队列规模和队列控制增益对峰值流量的影响并未呈现出明显的一致性规律特征, 具体还需要结合其他队列特征进行具体分析;

(5) 混入的队列规模不同, 混合交通流的拥堵特征有显著的差异, 队列规模较小时时空轨迹较为紊乱, 随着队列规模的增加, 团簇特征明显, 拥堵流与自由流更为分明, 车辆速度分布更为均匀, 混合交通流运行更为平稳;

(6) 队列控制结构或控制增益的变化会显著影响混合交通流的时空轨迹特征, 随着控制增益的变化时空轨迹可能会呈现出紊乱、不同程度的团簇等复杂的物理现象, 具体与混入的车辆队列的规模有关。

## 参考文献:

- [1] Li Yongfu, Li Kezhi, Zheng Taixiong, et al. Evaluating the Performance of Vehicular Platoon Control Under Different Network Topologies of Initial States[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 450: 359-368.
- [2] Boris S Kerner. Failure of Classical Traffic Flow Theories: Stochastic Highway Capacity and Automatic Driving[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 450: 700-747.
- [3] Jeroen Ploeg, Shladover S, Henk Nijmeijer, et al. Introduction to the Special Issue on the 2011 Grand

- Cooperative Driving Challenge[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(3): 989-993.
- [4] Assad Alam, Bart Besselink, Valerio Turri, et al. Heavy-duty Vehicle Platooning for Sustainable Freight Transportation: A Cooperative Method to Enhance Safety and Efficiency[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2015, 35(6): 34-56.
- [5] Xin Qi, Fu Rui, Ukkusuri S V, et al. Modeling and Impact Analysis of Connected Vehicle Merging Accounting for Mainline Random Length Tight-platoon[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2021, 563: 125452.
- [6] 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]. *系统仿真学报*, 2022, 34(5): 1025-1032.
- Jiang Yangsheng, Wang Sichen, 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.
- [7] Li Tang, Guo Fangce, Krishnan R, et al. Right-of-way Reallocation for Mixed Flow of Autonomous Vehicles and Human Driven Vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 115: 102630.
- [8] Chang Xin, Li Haijian, Rong Jian, et al. Analysis on Traffic Stability and Capacity for Mixed Traffic Flow with Platoons of Intelligent Connected Vehicles[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 557: 124829.
- [9] Kai Nagel, Michael Schreckenberg. A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic[J]. *Journal de Physique I*, 1992, 2(12): 2221-2229.
- [10] Zhu Liling, Tang Yandong, Yang Da. Cellular Automata-Based Modeling and Simulation of the Mixed Traffic Flow of Vehicle Platoon and Normal Vehicles[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2021, 584: 126368.
- [11] Jiang Yangsheng, Wang Sichen, Yao Zhihong, et al. A Cellular Automata Model for Mixed Traffic Flow Considering the Driving Behavior of Connected Automated Vehicle Platoons[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2021, 582: 126262.
- [12] Yang Da, Qiu Xiaoping, Ma Lina, et al. Cellular Automata-based Modeling and Simulation of a Mixed Traffic Flow of Manual and Automated Vehicles[J]. *Transportation Research Record*, 2017, 2622(1): 105-116.
- [13] Zeng Junwei, Qian Yongsheng, Mi Pengfei, et al. Freeway Traffic Flow Cellular Automata Model Based on Mean Velocity Feedback[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2021, 562: 125387.



- [14] Zhou Jiazuo, Zhu Feng. Analytical Analysis of the Effect of Maximum Platoon Size of Connected and Automated Vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 122: 102882.
- [15] 秦严严, 王昊, 王炜, 等. 混入CACC车辆和ACC车辆的异质交通流基本图模型[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(10): 127-136.
- Qin Yanyan, Wang Hao, Wang Wei, et al. Fundamental Diagram Model of Heterogeneous Traffic Flow Mixed with Cooperative Adaptive Cruise Control Vehicles and Adaptive Cruise Control Vehicles[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(10): 127-136.
- [16] 董长印, 王昊, 王炜, 等. 混入智能车的下匝道瓶颈路段交通流建模与仿真分析[J]. *物理学报*, 2018, 67(14): 167-182.
- Dong Changyin, Wang Hao, Wang Wei, et al. Hybrid Traffic Flow Model for Intelligent Vehicles Exiting to Off-ramp[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(14): 167-182.
- [17] Li Shengbo, Zheng Yang, Li Keqiang, et al. An Overview of Vehicular Platoon Control Under the Four-component Framework[C]//2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 286-291.
- [18] Zheng Yang, Bian Yougang, Li Shen, et al. Cooperative Control of Heterogeneous Connected Vehicles with Directed Acyclic Interactions[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2021, 13(2): 127-141.
- [19] Jan Lunze. Adaptive Cruise Control with Guaranteed Collision Avoidance[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(5): 1897-1907.
- [20] Peters A A, Middleton R H, Mason O. Leader Tracking in Homogeneous Vehicle Platoons with Broadcast Delays [J]. *Automatica*, 2014, 50(1): 64-74.
- [21] 边有钢, 杨依琳, 胡满江, 等. 基于双向多车跟随式拓扑的混合车辆队列稳定性研究[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(3): 66-77.
- Bian Yougang, Yang Yilin, Hu Manjiang, et al. Study on the Stability of Mixed Vehicular Platoon Based on Bidirectional Multiple-vehicle Following Topologies[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(3): 66-77.
- [22] 于晓海, 郭戈. 车队控制中的一种通用可变时距策略[J]. *自动化学报*, 2019, 45(7): 1335-1343.
- Yu Xiaohai, Guo Ge. A General Variable Time Headway Policy in Platoon Control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(7): 1335-1343.
- [23] Gipps P G. A Behavioural Car-following Model for Computer Simulation[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1981, 15(2): 105-111.
- [24] 敬明, 邓卫, 季彦婕, 等. 更新步长和元胞尺寸对元胞自动机模型的影响[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2013, 43(2): 310-316.
- Jing Ming, Deng Wei, Ji Yanjie, et al. Influences of Time Step and Cell Size on Cellular Automaton Model[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2013, 43(2): 310-316.
- [25] 叶冬. 基于元胞自动机的交通流模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- Ye Dong. Study on the Model of Traffic Flow Based on Cellular Automata Theory[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.