

8-15-2022

## Modeling of Traffic Flow Velocity Control Strategy for Human-machine Mixed Driving at Signalized Intersections

Jianxu Zhang

*1.School of Traffic, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;2.Chongqing Key Laboratory of Transportation System and Safety in Mountainous City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;; zjxdisk@gmail.com*

Shuai Hu

*1.School of Traffic, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;; 975362879@qq.com*

Hongyi Jin

*1.School of Traffic, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, 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.

---

# Modeling of Traffic Flow Velocity Control Strategy for Human-machine Mixed Driving at Signalized Intersections

## Abstract

**Abstract:** In order to analyze the influence of speed control strategy of autonomous vehicle on the operation characteristics of traffic flow, *a deterministic decision-making model for intersections with artificially driven vehicles considering the driver's influence on the acquisition of driving information is constructed. An automatic driving speed control strategy considering the influence of the speed of preceding vehicle is proposed, and the continuous Cellular Automata update rules for signalized intersections are constructed respectively.* By introducing the different penetration rates of automatic driving, road saturation and control area length parameters, the influence of CAV speed control strategy on the traffic flow characteristics of signalized intersections is studied. The results show that the autonomous vehicle can significantly improve the traffic capacity of intersection, and the delay of traffic flow through the intersection area is significantly reduced. The implementation effect of the speed control strategy is also affected by the length of control area, which shows that following the increase of length of control area, the average vehicle delay gradually decreases and stabilizes.

## Keywords

intelligent transportation, speed control, Cellular Automata, mixed traffic flow, Internet of Vehicles, signalized intersections

## Recommended Citation

Jianxu Zhang, Shuai Hu, Hongyi Jin. Modeling of Traffic Flow Velocity Control Strategy for Human-machine Mixed Driving at Signalized Intersections[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(8): 1697-1709.

# 信号交叉口人机混驾交通流速度控制策略建模

张建旭<sup>1,2</sup>, 胡帅<sup>1\*</sup>, 金宏意<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 山地城市交通系统与 safety 重庆市重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 为分析人机混驾交通流下网联自动驾驶车辆 (connected and autonomous vehicles, CAV) 速度控制策略对交通流运行特征的影响, 构建了考虑驾驶员对行车信息获取不确定性的人工驾驶车辆交叉口通行决策模型。提出考虑前车速度影响的自动驾驶速度控制策略, 构建信号交叉口连续型元胞自动机更新规则, 通过引入不同 CAV 渗透率、道路饱和度、控制区长度参数, 研究 CAV 速度控制策略对信号交叉口交通流运行特征的影响。结果表明: CAV 能显著提高交叉口通行能力, 且车流通过交叉口区域的延误显著降低; 同时速度控制策略的实施效果还受控制区长度的影响, 呈现出随着控制区长度的增加, 车均延误逐渐降低并趋于稳定。

**关键词:** 智能交通; 速度控制; 元胞自动机; 混合交通流; 车联网; 信号交叉口

中图分类号: TP391; U491

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)08-1697-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0307

## Modeling of Traffic Flow Velocity Control Strategy for Human-machine Mixed Driving at Signalized Intersections

Zhang Jianxu<sup>1,2</sup>, Hu Shuai<sup>1\*</sup>, Jin Hongyi<sup>1</sup>

(1. School of Traffic, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Transportation System and Safety in Mountainous City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of speed control strategy of autonomous vehicle on the operation characteristics of traffic flow, a *deterministic decision-making model for intersections with artificially driven vehicles considering the driver's influence on the acquisition of driving information is constructed*. An automatic driving speed control strategy considering the influence of the speed of preceding vehicle is proposed, and the continuous Cellular Automata update rules for signalized intersections are constructed respectively. By introducing the different penetration rates of automatic driving, road saturation and control area length parameters, the influence of CAV speed control strategy on the traffic flow characteristics of signalized intersections is studied. The results show that the autonomous vehicle can significantly improve the traffic capacity of intersection, and the delay of traffic flow through the intersection area is significantly reduced. The implementation effect of the speed control strategy is also affected by the length of control area, which shows that following the increase of length of control area, the average vehicle delay gradually decreases and stabilizes.

**Keywords:** intelligent transportation; speed control; Cellular Automata; mixed traffic flow; Internet of Vehicles; signalized intersections

收稿日期: 2022-04-05 修回日期: 2022-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(52078070)

第一作者: 张建旭(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为交通规划, 交通流理论。E-mail: zjxdisk@gmail.com

通讯作者: 胡帅(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为混合交通流, 交通仿真。E-mail: 975362879@qq.com

## 引言

交叉口是城市道路交通的关键，其通行能力直接影响着路网的承载能力<sup>[1]</sup>。当车辆通过交叉口时，信号灯的存在造成了车辆长时间怠速和急加减速工况的频繁出现<sup>[2]</sup>，从而导致交叉口通行效率的下降并伴随着燃油消耗与污染物排放的增加，对交通流运行的安全性与舒适性造成负面影响。随着自动驾驶技术与车联网技术的发展，网联自动驾驶车辆(connected and autonomous vehicles, CAV)可以根据自身位置以及运行状态，结合实时接收的周边车辆和临近交叉口相位配时等信息，对车辆速度进行调整，从而影响临近车辆的运行状态，有效改善以上问题。

国内外学者基于车路协同的交叉口速度诱导策略开展了相关研究。Asadi<sup>[3-4]</sup>等采用匀加减速-匀速引导模型求解车辆的速度轨迹；Yang H等<sup>[5]</sup>通过确保车辆在前方排队车辆消散后到达交叉口为目标优化车辆轨迹；刘欢等<sup>[6]</sup>将被控制车辆及其后续车辆看作车队，对车辆的不同行驶状态进行判断以实现整体引导；孟竹等<sup>[7]</sup>以交叉口上下游总油耗最小为目标构建速度控制策略；刘显贵等<sup>[8]</sup>以油耗、排放、通行时间多指标为优化目标，考虑目标车辆前后车的运行状态构建生态车速优化模型。现有研究一定程度上实现了节能减排以及通行效率的提升，但结合未来道路将长期处于人机混驾的交通流这一事实<sup>[9]</sup>，当前研究未考虑人机混驾情况下人工车辆决策不确定性对于CAV速度控制策略的影响，因此充分考虑人工驾驶车辆和CAV的不同驾驶特性，构建更加符合实际混合交通流场景的速度控制策略具有重要意义。

目前，已有较多学者利用元胞自动机对交通特性进行建模分析<sup>[10]</sup>。马新露等<sup>[11]</sup>基于信号交叉口实测数据构建了能够反映驾驶员心理的元胞自动机模型；李素兰等<sup>[12]</sup>结合元胞自动机模型和MOVES(motor vehicle emission simulator)排放模型，研究了信号灯配时与车辆排放之间的关系；

Du M等<sup>[13]</sup>构建混有人工车辆和自动驾驶车辆的信号交叉口元胞自动机模型，主要研究了混合交通流在黄灯期间的通行效率问题。本文基于Gipps跟驰模型和加州大学伯克利分校实车验证的自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)、协同自适应巡航控制(cooperative adaptive cruise control, CACC)模型构建信号交叉口连续型元胞自动机模型，针对人工驾驶车辆通过交叉口的特性设计通行决策模型，同时利用CAV实时接收道路交通信息的特性，构建考虑前车速度影响的交叉口速度控制策略模型。

## 1 信号交叉口场景构建

本文主要研究混有人工驾驶车辆和CAV的信号交叉口区域，研究范围为单一交叉口的直行流向，信号灯配时固定，不考虑车辆变道、相邻交叉口、行人，以及非机动车的影响，分析交叉口的上、下游2部分区域的交通流运行状态，针对人工驾驶车辆和CAV的特性，信号交叉口前的路段被分为4个区域，如图1所示。

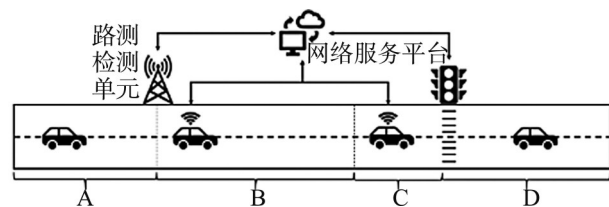


图1 信号交叉口道路抽象示意图

Fig. 1 Abstract schematic diagram of signalized intersection road

对于人工驾驶车辆，A、B、D区域均为自由行驶区，此时车辆的行驶仅受到相邻车辆限制、道路限速和驾驶员随机行为的影响，采用Gipps跟驰模型行驶；当车辆进入C区域后，人工驾驶员开始结合感知到的车辆距停车线距离和信号灯剩余时间做出启停决策的判断。过去针对人工车辆通过信号交叉口运行特征的研究较多<sup>[11,14]</sup>，大多基于实测数据的结论，均表示信号灯对于人工驾驶车辆的影响主要集中在停车线前70 m范围内，由

此后文的C区域的长度 $l_c$ 均取值70 m。

针对CAV, 其自由行驶区为A、D区域, 此时车辆有2种跟驰方式: 当前车同样为CAV时, 它们之间能实时进行行车信息(速度、加速度、位置)通讯, 行驶时能及时对通讯车辆行驶状态的变化做出反应, 此时车头时距较小, 采用CACC跟驰模型保持车辆的速度更新; 当前车为人工车辆时, CAV仅能通过传感器获取前车的信息(速度、位置), 考虑此时车辆无法与前车通讯, 车头时距将会增大以保证行车安全, 车辆退化为ACC跟驰模型行驶。

由于CAV可以通过车联网与道路基础设施通讯, 在较远的距离实时获取路网中车辆速度、位置、信号灯状态等相关信息, 由此B、C区域总长记为 $l_k$ , 均为CAV的速度控制路段, 一旦车辆进入此区域, 由上层控制系统结合获取的信息做出车辆加减速决策, 控制车辆以较小的速度波动不停车通过交叉口。

## 2 人机混驾信号交叉口交通流模型

### 2.1 人工驾驶车辆交叉口通行决策

在人工车辆作出启停决策的过程中, 本文以Gipps跟驰模型<sup>[15]</sup>来控制车辆与前车的安全间隔:

$$d_{\text{safe},i} = v_i(t)T_i + v_i(t)^2/2b - v_{i+1}(t)^2/2b \quad (1)$$

$$d_i(t) = x_{i+1}(t) - x_i(t) - l - s_0 \quad (2)$$

$$v_{\text{safe},i}(t) = -bT_i + \sqrt{b^2T_i^2 + b(2d_i(t) - (v_i(t)T_i + v_{i+1}(t)^2)/b)} \quad (3)$$

式中:  $d_{\text{safe},i}$ 、 $v_{\text{safe},i}(t)$ 分别为当前前后车运行状态下的安全行驶间隔以及安全速度;  $x_{i+1}(t)$ 和 $x_i(t)$ 分别为第 $i+1$ 和第 $i$ 辆车在 $t$ 时刻所在的位置;  $l$ 为车的长度;  $s_0$ 为最小车间距;  $d_i(t)$ 为第 $i$ 辆车与前车的距离;  $v_{i+1}(t)$ 和 $v_i(t)$ 分别为第 $i+1$ 和第 $i$ 辆车在 $t$ 时刻的速度;  $b$ 为车辆的减速度;  $T_i$ 为第 $i$ 辆车驾驶员的反应时间, 参考文献[16]对参数进行标定, 反应时间 $T_i = 0.8$  s。

### 2.1.1 自由行驶区演化规则

驾驶员在信号灯感知区外自由行驶, 主要通过考虑前车紧急刹车的情况下后车不与前车发生碰撞的最小安全距离进行速度更新。

(1) 若 $d_i(t) > d_{\text{safe},i}$ , 则执行加速规则:

$$v_i(t+1) = \min(v_i(t) + a_{\text{max}}, v_{\text{max}}, v_{\text{safe},i}(t), d_i(t)) \quad (4)$$

(2) 若 $d_i(t) \leq d_{\text{safe},i}$ , 则执行确定性减速:

$$v_i(t+1) = \max(\min(v_i(t), v_{\text{safe},i}(t), d_i(t)), 0) \quad (5)$$

(3) 随机减速, 设定减速概率 $p_{\text{slow}}$ , 舒适减速度为 $b'$ , 当 $\text{rand}(0, 1) < p_{\text{slow}}$ 时, 执行以下减速操作:

$$v_i(t+1) = \max(v_i(t) - b', 0) \quad (6)$$

(4) 位置更新:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (7)$$

### 2.1.2 信号灯感知区内演化规则

当车辆逐渐靠近交叉口信号灯, 此时驾驶员开始有意识地针对信号灯剩余时间以及自身到停车线的距离进行决策判断。本文在Gipps跟驰模型的基础上对文献[11]提出的信号交叉口决策模型进行改进, 原模型中驾驶员能够准确获取当前时刻车辆到停车线距离 $D_i(t)$ 并参与决策, 考虑实际驾驶场景中驾驶员存在感知误差以及不同驾驶风格的影响, 参考文献[13]的建模思路, 假设驾驶员对 $D_i(t)$ 的判断值服从正态分布, 将 $D_i(t)$ 估计为 $D_i^c(t)$ , 其中 $D_i^c(t)$ 满足 $N(D_i, (0.3D_i)^2)$ 以体现驾驶员信息获取的不确定性, 具体决策过程如图2所示。

(1) 人工驾驶车辆 $i$ 为头车

1) 当车辆处于信号灯感应区时为绿灯, 记 $t_g(t)$ 为 $t$ 时刻的绿灯剩余时间。

场景a: 若 $D_i^c(t)/v_i(t) \leq t_g(t)$ , 此时车辆 $i$ 保持当前速度即可在绿灯期间通过停车线, 设 $p_a = (v_{\text{max}} - v_i(t))/v_{\text{max}}$ 为在当前速度下能通过停车线仍然加速的概率, 则有:

$$a_i(t) = \begin{cases} \min(a', v_{\max} - v_i(t)), & \text{if } \text{rand}(0, 1) < p_a \\ 0, & \text{if } \text{rand}(0, 1) \geq p_a \end{cases} \quad (8)$$

场景b: 若  $D_i^c(t)/v_i(t) > t_g(t)$ , 车辆*i*在当前速度下无法通过停车线, 需对车辆在剩余绿灯期间最大行驶距离  $l_{g,i}(t)$  求解, 记  $t_m = (v_{\max} - v_i(t))/a_{\max}$  为车辆加速到最大限速值所需时间,  $\lfloor t_m \rfloor$  表示对  $t_m$  向下取整, 则有:

$$l_{g,i}(t) = \begin{cases} v_i(t)t_g(t) + \frac{a_{\max}(t_g(t)+1)t_g(t)}{2}, & t_m \geq t_g(t) \\ v_i(t)\lfloor t_m \rfloor + \frac{a_{\max}(\lfloor t_m \rfloor+1)\lfloor t_m \rfloor}{2} + \\ v_{\max}(t_g(t) - \lfloor t_m \rfloor), & t_m < t_g(t) \end{cases} \quad (9)$$

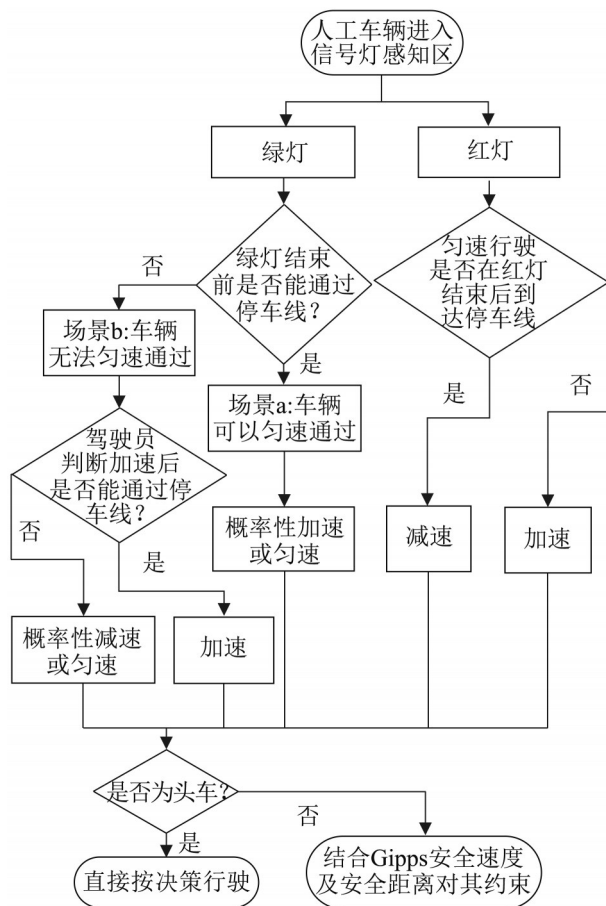


图2 信号感知区演化流程

Fig. 2 Evolution process of signal perception area

$$a_i(t) = \begin{cases} -\min(b', v_i(t)), l_{g,i}(t) \leq D_i^c(t) \text{ and } \\ \text{rand}(0, 1) < p_b \\ 0, l_{g,i}(t) \leq D_i^c(t) \text{ and } \text{rand}(0, 1) \geq p_b \\ \min(a_{\max}, v_{\max} - v_i(t)), l_{g,i}(t) > D_i^c(t) \end{cases} \quad (10)$$

当驾驶员判断加速行驶仍无法通过时  $l_{g,i}(t) \leq D_i^c(t)$ , 会采取匀速或缓慢减速2种决策, 其中  $p_b = v_i(t)/v_{\max}$  以体现驾驶员考虑当前行驶速度选择减速的决策差异, 当  $l_{g,i}(t) > D_i^c(t)$  时, 驾驶员判断能够通过, 通常选择加速通过停车线。

2) 当车辆处于信号灯感应区时为红灯, 记  $t_r(t)$  为*t*时刻红灯剩余时间:

$$a_i(t) = \begin{cases} \min(D_i(t) - v_i(t), \\ -\min(b', v_i(t) - (D_i^c(t)/t_r(t))), \\ v_i(t) > (D_i^c(t)/t_r(t)) \\ \min(\min(a', v_{\max} - v_i(t)), D_i(t) - v_i(t)), \\ v_i(t) \leq (D_i^c(t)/t_r(t)) \end{cases} \quad (11)$$

此时驾驶员结合当前速度和红灯剩余时间下匀速行驶至停车线的速度调整车速, 同时限制加速后速度不超过最大速度及当前车辆距停车线的距离。

(2) 当车辆*i*为跟驰车

驾驶员同样会进行是否通过的决策判断, 首先按上述头车启停决策更新加速度后, 令  $a_i^c(t)$  为跟驰车辆*i*按头车速度决策计算得到的期望加速度, 同时结合Gipps安全距离计算规则对车辆速度进行约束以保证安全行驶:

$$v_i(t+1) = \min(v_{\text{safe},i}(t), v_i(t) + a_i^c(t), d_i) \quad (12)$$

## 2.2 自动驾驶车辆速度控制策略

### 2.2.1 自由行驶区演化规则

加州大学Path实验室团队通过真车实验对自动驾驶车辆的跟驰行为开展了研究<sup>[17]</sup>, 跟驰模型如下并将其改进为连续型元胞自动机模型:

$$a_i^{\text{ACC}}(t) = k_1 e^{\text{ACC}} + k_2 (v_{i+1}(t) - v_i(t)) \quad (13)$$

$$a_i^{\text{CACC}}(t) = j_1 a_{i+1}(t) + j_2 e^{\text{CACC}} + j_3 (v_{i+1}(t) - v_i(t)) \quad (14)$$

$$e^{\text{CACC}} = x_{i+1}(t) - x_i(t) - l - s_0 - T_{\text{CACC}} v_i(t) \quad (15)$$

$$e^{\text{ACC}} = x_{i+1}(t) - x_i(t) - l - s_0 - T_{\text{ACC}} v_i(t) \quad (16)$$

式中:  $a_i^{\text{ACC}}(t)$ 、 $a_i^{\text{CACC}}(t)$  分别为第  $i$  辆车在  $t$  时刻采用不同自动驾驶跟驰规则时的加速度;  $T_{\text{ACC}}$ 、 $T_{\text{CACC}}$  分别为 ACC 和 CACC 模型的期望车间时距;  $e$  为实际车间距与期望车间距的差值;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $j_1$ 、 $j_2$ 、 $j_3$  为模型控制系数。依据文献[17-19]对上述模型参数进行标定, 其中:  $k_1=0.23$ 、 $k_2=0.07$ 、 $j_1=1$ 、 $j_2=0.2$ 、 $j_3=3$ 、 $T_{\text{ACC}}=1.1$  s、 $T_{\text{CACC}}=0.6$  s。

(1) CAV 上层控制系统加速度计算:

$$a_i(t) = \begin{cases} a_i^{\text{ACC}}(t), \text{cartype}_{i+1}(t) = 0 \\ a_i^{\text{CACC}}(t), \text{cartype}_{i+1}(t) = 1 \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\text{cartype}_{i+1}$  为同车道前车的车辆类型, 0 代表人工驾驶车辆, 1 代表 CAV。

(2) 当  $a_i(t) \geq 0$  时, 执行加速规则:

$$v_i(t+1) = \min(v_i(t) + a_i(t), v_i(t) + a_{\max}, v_{\max}) \quad (18)$$

(3) 当  $a_i(t) < 0$  时, 执行减速规则:

$$v_i(t+1) = \max(\max(v_i(t) + a_i(t), v_i(t) - b), 0) \quad (19)$$

(4) 位置更新:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (20)$$

### 2.2.2 车联网环境下速度控制策略构建

当车辆进入速度控制路段时, CAV 根据实时接收的各类信息判断以何种方式通过交叉口, 与人工决策不同的是不用考虑信息获取误差, 同时由于行驶状态受上层控制系统制约, 加减速度的调节可精确变化以达到最优速度, 具体决策过程如下:

(1) CAV 车辆  $i$  为头车

1) 当车辆处于速度控制区域时, 前方信号灯为绿灯, 参数  $t_g(t)$ 、 $D_i(t)$ 、 $t_m$ 、 $l_{g,i}(t)$  与 2.1.2 节采用同样的求法。

场景 c: 若  $l_{g,i}(t) > D_i(t)$ , 则

$$a_i(t) = \min(a_{\max}, v_{\max} - v_i(t)) \quad (21)$$

表明 CAV 能通过速度调整在绿灯结束前通过停车线, 此时车辆加速行驶, 以保证通行效率最大化, 且最大限度的为后续车辆通行提供时间。

场景 d: 若  $l_{g,i}(t) \leq D_i(t)$ , 则判断无法通行, 考虑在下一个信号周期通过, 此时引入剩余行驶时间  $t_s(t) = t_g(t) + T_{\text{redtime}}$ ,  $T_{\text{redtime}}$  为红灯相位总时长, 需作进一步判断。

若  $D_i(t) > v_i(t)t_s(t)$ , 则还需加速才能在下一个信号周期开始时通过停车线, 令  $l_{s,i}(t)$  为车辆在  $t_s(t)$  时长下车辆能行驶的最远距离, 此时  $l_{s,i}(t)$  的求解方法与 2.1.2 节场景 b 最远行驶距离相同, 决策规则如下:

$$a_i(t) = \begin{cases} \frac{2(D_i(t) - v_i(t)t_s(t))}{(t_s(t) + \Delta t)t_s(t)}, l_{s,i}(t) > D_i(t) \\ \min(a_{\max}, v_{\max} - v_i(t)), l_{s,i}(t) \leq D_i(t) \end{cases} \quad (22)$$

若  $D_i(t) \leq v_i(t)t_s(t)$ , 则需要减速或匀速即能在下一个信号周期开始时通过停车线, 此时尽可能以较小的加速度调整速度或匀速通行。首先以小于舒适减速度  $b'$  的减速度匀减速至  $v_c$ , 然后以  $v_c$  匀速通行且在下一个信号周期开始时不停车通过停车线, 鉴于元胞自动机速度变化机理,  $a_i(t)$ 、 $v_c$  的求解设计如下迭代算法:

step 1: 此时总行驶时长为  $t_s(t)$ , 距停车线距离  $D_i(t)$ , 目标匀减速度为  $a_i(t)$ , 令匀减速时间为  $t_b = 1$ , 则满足下式:

$$D_i(t) = v_i(t)t_b + \frac{t_b(t_b + 1)}{2} a_i(t) + (v_i(t) + a_i(t)t_b) \cdot (t_s(t) - t_b) \quad (23)$$

step 2: 求解目标减速度

$$a_i(t) = \frac{2(D_i(t) - v_i(t)t_s(t))}{(2t_s(t) + 1)t_b - t_b^2} \quad (24)$$

step 3: 若  $a_i(t) < b'$  and  $t_s(t) > t_b$  成立, 此时  $a_i(t)$  即为当前状态下的推荐加速度, 否则  $t_b = t_b + 1$ , 跳回到 step 1 重新求解。

2) 当车辆进入速度控制区域时为红灯, 此时

策略与绿灯期间考虑在下一个信号周期通过的情况类似，将  $t_s(t)$  用红灯剩余时间  $t_r(t)$  代替，令  $l_{r,i}(t)$  表示在  $t_r(t)$  时长下车辆能行驶的最远距离，通过上述“场景d”所对应的算法求解  $a_i(t)$ 。

(2) 当CAV车辆  $i$  为跟驰车

主要对上述“场景c”的加速通过情况考虑，判断当此次加速不成功时，是否影响车辆在绿灯结束前通过停车线，由此需判断前车的行驶状态是否对此次加速造成影响，令  $a_i^e(t)$  为跟驰车辆  $i$  按头车速度控制策略求解得到的加速度， $a_i^{\text{limit}}(t)$  为车辆  $i$  在考虑与前车距离以及前车行驶状态下保证安全行驶的最大加速度。

若前车为人工驾驶车辆，仅能通过传感器检测前车当前速度，为保证加速后与前车的距离大于ACC跟驰模式下的期望车头间距，需满足  $d_i(t) + v_{i+1}(t) - (v_i(t) + a_i^{\text{limit}}(t)) \geq T_{\text{ACC}} \times (v_i(t) + a_i^{\text{limit}}(t))$ ，此时：

$$a_i^{\text{limit}}(t) = \min\left(\frac{d_i(t) + v_{i+1}(t) - (T_{\text{ACC}} + 1)v_i(t)}{T_{\text{ACC}} + 1}, a_{\text{max}}\right) \quad (25)$$

若前车为CAV，能实时获取前车的速度加速度信息，为保证加速后与前车的距离大于CACC跟驰下的期望车头间距，需满足  $d_i(t) + v_{i+1}(t) + a_{i+1}(t) - (v_i(t) + a_i^{\text{limit}}(t)) \geq T_{\text{CACC}}(v_i(t) + a_i^{\text{limit}}(t))$ ：

$$a_i^{\text{limit}}(t) = \min\left(a_{\text{max}}, \frac{d_i(t) + v_{i+1}(t) + a_{i+1}(t) - (T_{\text{CACC}} + 1)v_i(t)}{T_{\text{CACC}} + 1}\right) \quad (26)$$

1) 若此时为绿灯，相关参数计算结果满足上述“场景c”判定条件  $l_i(t) > D_i(t)$ 。

场景e：若  $a_i^{\text{limit}}(t) \geq a_i^e(t)$ ，此时前车的运行状态不会影响此次速度控制策略的调整，可以安全行驶：

$$a_i(t) = a_i^e(t) \quad (27)$$

场景f：若  $a_i^{\text{limit}}(t) < a_i^e(t)$ ，此时策略推荐的加速度受前方车辆影响而无法加速，需进行

二次判断，假设车辆  $i$  按  $a_i^{\text{limit}}(t)$  更新了速度，并迭代一个时间步长，此时有：

$$\begin{cases} v_i'(t+1) = v_i(t) + a_i^{\text{limit}}(t) \\ t_g'(t) = t_g(t) - 1 \\ D_i'(t) = D_i(t) - v_i'(t+1) \\ t_m' = (v_{\text{max}} - v_i'(t))/a_{\text{max}} \end{cases} \quad (28)$$

由此可求得车辆  $i$  在下一个时间步长后的  $l_{g,i}'(t)$  估计值并进行后续判断。

若  $l_{g,i}'(t) > D_i'(t)$ ，即此次加速度受限不影响后续通过交叉口，则保持与前车的紧密跟驰：

$$a_i(t) = \min(a_i^{\text{limit}}(t), v_{\text{max}} - v_i(t)) \quad (29)$$

若  $l_{g,i}'(t) \leq D_i'(t)$ ，即此次加速度受限导致车辆无法在绿灯结束前通行，则考虑在下一个信号周期通过交叉口，使用上述“场景d”的算法求解加速度  $a_i(t)$ 。

2) 若信号灯为红灯，此时不仅需要考虑紧邻前车的影响，还需对信号灯前车辆的消散时间进行考虑，令车辆  $i$  前方未通过停车线的车辆数为  $n_p$ ，车辆通过停车线的平均消散时间记为  $t_r$ ，则将  $t_s(t)$  用红灯剩余时间与前方车辆消散时间  $t_p(t) = t_r(t) + t_r n_p$  代替， $l_{p,i}(t)$  表示在  $t_p(t)$  时长下车辆能行驶的最远距离，通过上述“场景d”所对应的算法求解控制加速度  $a_i(t)$ 。

3) 除以上情况外，其余情况按头车策略求解得到加速度  $a_i^e(t)$  后，均遵循CACC和ACC跟驰规则对车辆速度的约束以保证安全行驶：

$$a_i(t) = \min((a_i^{\text{ACC}}(t) \text{ or } a_i^{\text{CACC}}(t)), a_i^{\text{limit}}(t), a_i^e(t)) \quad (30)$$

## 3 仿真实验及结果分析

### 3.1 基本参数设置

本文采用Python环境开发混合交通流元胞自动机仿真平台，以总长为800m的单车道直行路段为仿真场景，信号灯离进口600m，采用开放边界条件，在道路起点以概率  $q_{\text{in}}$  不断进入车辆，同



时按CAV渗透率 $p_{cav}$ 确定进入车辆的类型, 当条件满足, 则产生一辆初始速度 $v = v_{max}$ , 车辆类型 $cartype = [0, 1]$ , 位置 $x = \min(x_{last} - v_{max}, v_{max})$ 的车辆; 在道路终点当车辆位置大于车道长度, 车辆离开道路系统。本文假设所有车辆均为小汽车, 参考文献[16], 对车辆的相关参数取值如下:  $v_{max} = 16 \text{ m/s}$ (约为 $57.6 \text{ km/h}$ ),  $a_{max} = 2 \text{ m/s}^2$ ,  $b' = 1.5 \text{ m/s}^2$ ,  $b = 3 \text{ m/s}^2$ ,  $l = 5 \text{ m}$ ,  $s_0 = 2 \text{ m}$ , 随机减速概率 $p_{slow}$ 为0.2, 时间步长取值为1 s, 为便于仿真, 信号周期 $T_c = 60 \text{ s}$ , 由绿灯和红灯交替组成, 则 $T_{redtime} = T_{greentime} = 30 \text{ s}$ , 每组仿真采用不同的随机种子运行20次, 每次实验运行1 800 s, 对仿真中的600~1 800 s记录并统计数据。

### 3.2 交叉口通行能力分析

为分析人机混驾交通环境下信号灯交叉口运行情况, 将CAV渗透率 $p_{cav}$ 在 $[0, 1]$ 中取值, 增幅为0.2, 同时车辆进入概率 $q_{in}$ 在 $(0, 1]$ 中取值, 对应车辆到达率为0~3 600 pcu/h。图3给出了不同 $p_{cav}$ 下交叉口平均流量与进车概率 $q_{in}$ 的关系。

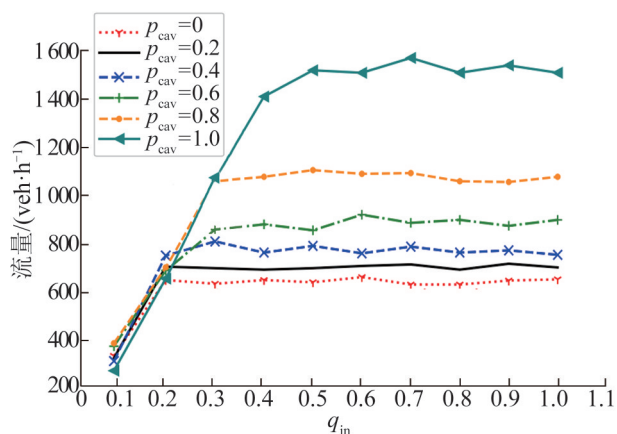


图3 不同渗透率下平均流量与 $q_{in}$ 的关系

Fig. 3 Relationship between average flow and  $q_{in}$  under different penetration rate

由图3可以看出, 直行交叉口总流量随着进车概率 $q_{in}$ 的不断增加呈现出先增加并逐渐稳定于某一固定值, 当 $q_{in}$ 较低时, 大多车辆均能够顺利通过交叉口, 随着 $q_{in}$ 的进一步增加, 车辆排队现

象开始出现, 排队长度将会越来越长, 进而交叉口流量不再发生变化, 将这个饱和而稳定的流量定义为此时交叉口的通行能力, 这与道路的基本通行能力的概念类似。

当渗透率 $p_{cav} = 0$ 时, 此时全为人工驾驶车辆。在 $q_{in} \geq 0.2$ 后, 流量不再随 $q_{in}$ 的增大而增大, 达到饱和并稳定在650 veh/h附近, 而基于《城市道路工程设计规范》(CJJ37—2012)中推荐的停止线法及其相关模型参数推荐值, 可计算出本文模拟的交叉口直行车道的通行能力为652 veh/h, 说明模型可以较好地还原实际交通流场景。

观察不同 $p_{cav}$ 下交叉口通行能力差异, 随着渗透率 $p_{cav}$ 的提升, 道路最大通行能力不断增加, 同时总流量变为稳定值的临界流量水平也不断增大。当 $p_{cav} = 0.4$ 时, 通行能力相较于纯人工驾驶车辆提升约23%, 此时道路中CAV较少, 受人工车辆驾驶随机性的影响, 速度控制策略对交通流的优化不明显; 当 $p_{cav} = 0.8$ 时, 通行能力提升68%, 此时道路中大部分为CAV, 通过速度的引导, 对其余人工车辆速度也起到了限制作用, 避免了车辆的大规模排队启停现象; 当 $p_{cav} = 1$ 时, 道路全为CAV时, 通行能力提升134%, 这样的场景在短期内难以实现, 但也侧面说明了此速度控制策略对交叉口处通行效率的正面影响。

### 3.3 不同渗透率下交叉口时空图对比

随着CAV渗透率的增加, 直行车道的通行能力逐渐增大, 为了更加详细地分析CAV比例对交叉口通行效率的影响机理和演化规律, 针对3.2节仿真得出的交叉口通行能力650 veh/h, 设置对应的进车概率 $q_{in}$ , 绘制 $p_{cav} = 0, 0.2, 0.6, 0.8, 1$ 时交叉口时空轨迹如图4所示。

图4展示了不同CAV渗透率下车辆的行驶轨迹, 其中斜率代表不同的行车速度, 600 m处密集的水平点代表红灯对车道进行关闭; 当渗透率较低时, 如图4(a)、(b)所示, 人工驾驶车辆大多在离信号灯较近时作出决策判断, 且存在感知误差,

导致了信号灯前存在较多排队车辆；随着CAV渗透率的提升，车辆提前针对信号灯状态调整车速，同时对后续车辆速度限制，减少了信号灯前的车辆的启停，红灯期间排队状况改善显著；当道路

全为CAV时，此时交叉口运行状态良好，车辆均能通过速度控制策略不停车通过交叉口，同时部分相邻的CAV形成车队行驶，通行能力显著提高。

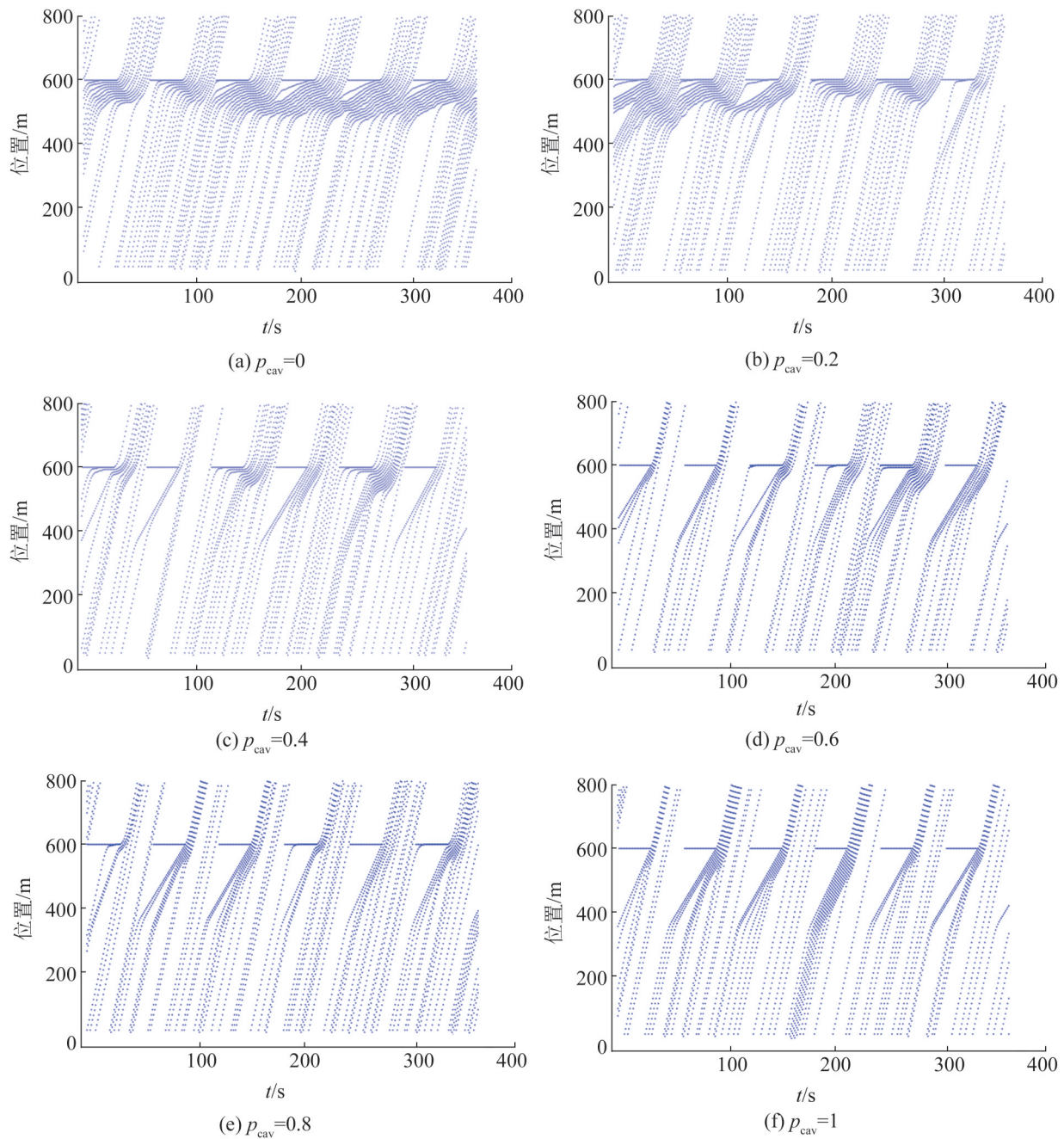


图4 不同渗透率下交叉口时空图

Fig. 4 Spatiotemporal map of intersection under different penetration rate

### 3.4 交叉口延误分析

为进一步分析本文提出的速度控制策略对交通流的改善效果, 将CAV渗透率 $p_{cav}$ 在 $[0, 1]$ 中取值, 增幅为0.2, 同时按650 veh/h的20%、40%、60%、80%、100%分别设置进车概率 $q_{in}$ , 为统一对比标准, 本节讨论人工驾驶和CAV的延误范围包含(交叉口上下游), 把车辆通过信号交叉口后车速恢复到初始车速过程也考虑进来, 对应图1中B、C、D区域, 鉴于车辆到达随机性对延误的影响, 每种场景进行20次仿真以探究延误的普遍规律, 图5、表1给出了不同道路饱和度下, 车辆通过交叉口平均延误与 $p_{cav}$ 的关系。

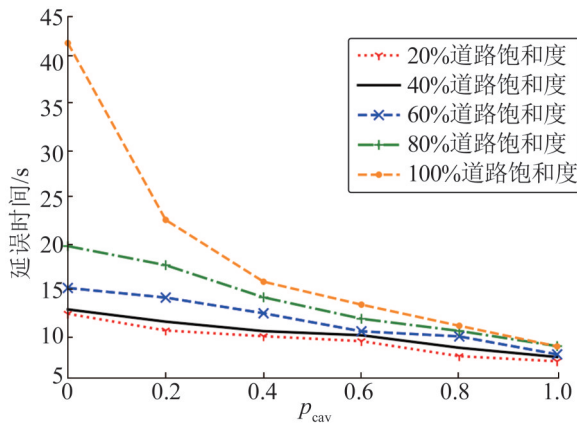


图5 不同道路饱和度下延误与渗透率的关系

Fig. 5 Relationship between penetration rate and delay under different road saturation

表1 不同道路饱和度下延误降低百分比

饱和度	saturation					%
$p_{cav} = 0.2$	$p_{cav} = 0.4$	$p_{cav} = 0.6$	$p_{cav} = 0.8$	$p_{cav} = 1.0$		
20	-14.1	-18.9	-23.1	-35.7	-40.0	
40	-10.0	-17.6	-21.0	-31.2	-38.7	
60	-6.7	-17.5	-30.0	-33.5	-46.0	
80	-10.2	-27.5	-39.0	-45.5	-53.7	
100	-45.4	-61.3	-67.2	-72.6	-77.9	

由图5、表1可知随着交通流中CAV渗透率的增加, 不同道路饱和度下车辆的平均延误相较于纯人工驾驶交通流均有着显著提升, 当道路饱和

度为40%时, 随着CAV的混入, 交通流平均延误降低10%~38.7%; 当道路饱和度达到100%时, 仅40%的CAV渗透率就能降低61.3%的平均延误, 在此之后, 继续提高渗透率对平均延误的优化效果逐渐减小, 纯CAV时延误降低77.9%。总结以上规律可以发现, 当道路饱和度较低时, 此时信号灯放行时间能满足当前到达车辆的通行需求, 排队现象鲜有发生, CAV速度控制策略几乎不会对其他车辆造成影响, 延误降低效果有限; 当达到高饱和度时, 车与车之间相互制约作用增强, 此时道路中CAV不仅控制了自身速度, 还对后续车辆起到了速度调节作用, 由此道路饱和度越高, CAV对于交通流的优化越显著。

### 3.5 速度控制区长度对交通流的影响分析

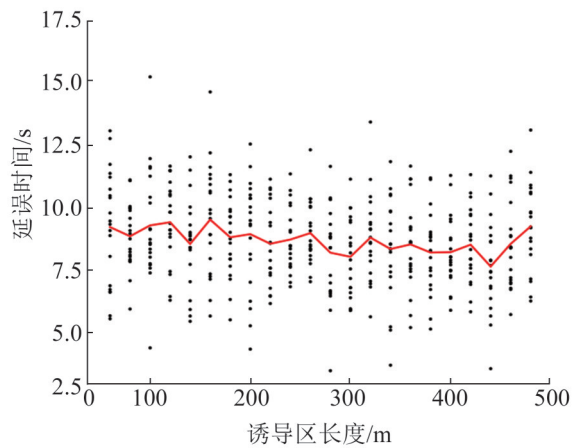
速度控制策略是基于对信号灯状态的提前获取实现的, 然而实际交通场景下CAV获取信息的最远距离可能会受到数据采集装置、网络状况等因素的影响, 由此有必要研究在同样的控制策略下速度控制长度对交通流的影响。文献[20]对速度诱导区的范围设定进行了分析:

$$l_k \subset \left[ \max \left\{ \frac{v_{\max}^2 - v_{\min}^2}{2a_{\max}}, \frac{v_{\max}^2 - v_{\min}^2}{2b} \right\}, T_c v_{\min} \right] \quad (31)$$

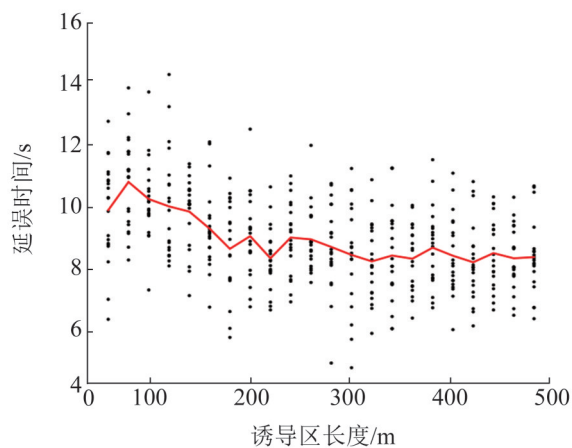
式中:  $v_{\min}$ 为路段的最小限速值, 为了实现通行能力最佳, 这里 $v_{\min}$ 取道路基本图中的临界车速。本节针对道路中不同CAV渗透率的场景, 使CAV速度控制区长度 $l_k$ 在 $[60, 500]$ 变化, 增幅为20 m, 并保持人工车辆的信号感知区长度 $l_c = 70$  m不变, 每种场景进行20次实验, 得到在不同控制区长度下通过车辆的平均延误散点图。

图6为 $p_{cav} = 1$ 时不同道路饱和度在不同速度控制区长度下通过车辆的平均延误散点图, 其中折线表示每种控制区长度下实验的均值。如图6(a)所示, 当道路饱和度较低时, 此时车辆较少, 控制区长度的不同对整体车辆的平均延误不会造成较大差异; 除此之外, 其他道路饱和度场景下平

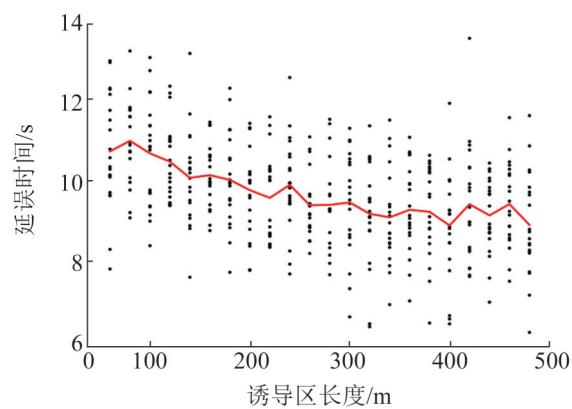
均延误随控制区长度的增加逐渐降低,并在达到一定值后逐渐趋于稳定,将延误达到稳定的临界长度记为 $l_k^0$ ,表示在当前渗透率和道路饱和度下的最佳控制区长度。将该类场景中的数值模拟结果进行统计分析,结果见表2。



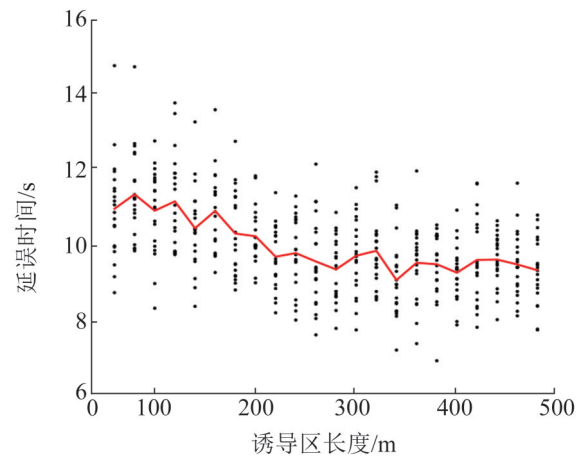
(a) 20%道路饱和度



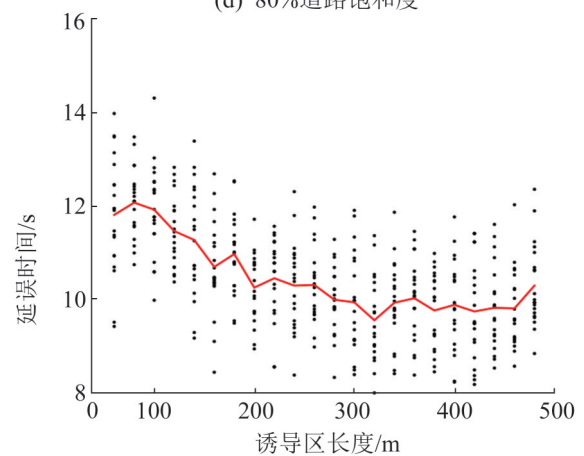
(b) 40%道路饱和度



(c) 60%道路饱和度



(d) 80%道路饱和度



(e) 100%道路饱和度

图6  $p_{cav} = 1$ 时速度控制区长度与平均延误关系Fig. 6 Relationship between length of speed-inducing zone and average delay when  $p_{cav} = 1$ 表2  $p_{cav} = 1$ 时不同道路饱和度下平均延误下降百分比  
Table 2 Average delay reduction percentage under different road saturation when  $p_{cav} = 1$ 

道路饱和度/%	$l_k^0/m$	稳定后平均延误/s	无控制平均延误/s	延误下降比例/%
40	220	8.6	10.5	18.1
60	320	9.1	10.9	16.5
80	340	9.3	11.2	17.0
100	320	9.8	12	18.3

如表2所示,当道路饱和度处于40%~100%时,最佳控制长度 $l_k^0$ 在220~340 m之间浮动,同时可使全为CAV时的平均延误降低16.5%~18.3%。由此可以得出控制区长度可以对策略的效果产生影响,此时进一步改变CAV渗透率水平,令

$p_{cav}=0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ , 分析不同场景下的延误降低程度, 结果见表3~6。

表3  $p_{cav} = 0.8$ 时不同道路饱和度下平均延误下降百分比  
Table 3 Average delay reduction percentage under different road saturation when  $p_{cav} = 0.8$

道路饱和度/%	$l_k^0/m$	稳定后平均延误/s	无控制平均延误/s	延误下降比例/%
40	240	9.3	11.2	17.0
60	280	10.2	11.4	10.5
80	320	10.8	12.9	16.3
100	340	11.7	13.7	14.6

表4  $p_{cav} = 0.6$ 时不同道路饱和度下平均延误下降百分比  
Table 4 Average delay reduction percentage under different road saturation when  $p_{cav} = 0.6$

道路饱和度/%	$l_k^0/m$	稳定后平均延误/s	无控制平均延误/s	延误下降比例/%
40	220	10.1	10.9	7.3
60	280	11.1	12.8	13.3
80	300	12.3	13.8	10.9
100	320	13.9	16.2	14.2

表5  $p_{cav} = 0.4$ 时不同道路饱和度下平均延误下降百分比  
Table 5 Average delay reduction percentage under different road saturation when  $p_{cav} = 0.4$

道路饱和度/%	$l_k^0/m$	稳定后平均延误/s	无控制平均延误/s	延误下降比例/%
40	240	10.8	12.1	10.7
60	260	12.1	13.9	12.9
80	320	14.0	15.6	10.3
100	360	17.0	19.4	12.4

表6  $p_{cav} = 0.2$ 时不同道路饱和度下平均延误下降百分比  
Table 6 Average delay reduction percentage under different road saturation when  $p_{cav} = 0.2$

道路饱和度/%	$l_k^0/m$	稳定后平均延误/s	无控制平均延误/s	延误下降比例/%
40	220	11.5	12.3	6.5
60	200	13.4	14.5	7.6
80	380	15.6	16.7	6.6
100	380	27	28.6	5.6

将以上结果与表2对比, 可以看出随着CAV混入率的降低, 延误下降比例的减少幅度逐渐降低, 当 $p_{cav} = 0.8$ 时, 各饱和度下的延误下降比例处于10.5%~17%, 当 $p_{cav} = 0.4$ 时, 各饱和度下的

延误下降比例降低至10.3%~12.9%, 当 $p_{cav} = 0.2$ 时, 各饱和度下的延误下降比例均低于8%; 对比不同渗透率时各道路饱和度下最佳控制区长度可以发现, 其随着道路流量水平的逐渐上升而增大。

## 4 结论

本文针对信号交叉口人机混驾交通流场景, 分析不同CAV渗透率下的交通特性, 主要结论如下:

(1) CAV能有效提高交叉口通行能力, 渗透率越高提升越显著, 当 $p_{cav} \in [0.4, 0.8]$ 时, 通行能力相较于纯人工驾驶车辆时约提升23%~68%; 在不同道路饱和度下, CAV的混入均能显著降低交叉口延误, 同时道路饱和度越高, 优化效果越明显, 当道路饱和度达到100%时, 40%的CAV渗透率使平均延误低61.3%。

(2) 速度控制策略对交叉口交通流的优化效果受控制区长度的影响, 当道路饱和度大于40%时, 延误随控制区长度增加而减小并逐渐趋于稳定; 相同渗透率下, 流量水平的增加会使得最佳控制长度增大; 相同道路饱和度下, 随着CAV渗透率的提升, 延误降低比例更为显著。

本文所提的速度控制策略能有效改善车辆通过交叉口期间的平均延误, 同时策略的优化效果受到控制区长度的影响, 可为信号交叉口更复杂的人机混驾相关研究提供参考, 但本文的仿真场景搭建还存在不足, 未考虑实际交叉口中多车道转向、换道等情况, 未来的工作可进一步结合交叉口多进口道流向冲突, 车道间的变道行为, 提高模型的适用范围。

## 参考文献:

- [1] 杨晓光, 赵靖, 马万经, 等. 信号控制交叉口通行能力计算方法研究综述[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 148-157.  
Yang Xiaoguang, Zhao Jing, Ma Wanjing, et al. A Review of Research on the Calculation Method of Traffic Capacity of Signal-Controlled Intersections [J]. Journal

- of China Highway, 2014, 27(5): 148-157.
- [2] Sharma N, Kumar P P, Dhyani R, et al. Idling Fuel Consumption and Emissions of Air Pollutants at Selected Signalized Intersections in Delhi[J]. Journal of Cleaner Production (S0959-6526), 2019, 212: 8-21.
- [3] Asadi B, Vahidi A. Predictive Cruise Control: Utilizing Upcoming Traffic Signal Information for Improving Fuel Economy and Reducing Trip Time[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology (S1063-6536), 2011, 19(3): 707-714.
- [4] Ala M V, Yang H, Rakha H. Modeling Evaluation of Eco-Cooperative Adaptive Cruise Control in Vicinity of Signalized Intersections[J]. Transportation Research Record (S0361-1981), 2016, 2559: 108-119.
- [5] Yang H, Rakha H, Ala M V. Eco-Cooperative Adaptive Cruise Control at Signalized Intersections Considering Queue Effects[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2017, 18(6): 1575-1585.
- [6] 刘欢, 杨雷, 邵社刚, 等. 车路协同环境下信号交叉口速度引导策略[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(12): 8-17.  
Liu Huan, Yang Lei, Shao Shegang, et al. Speed Guidance Strategy of Signaled Intersections in Vehicle-Road Collaboration Environment [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2019, 38(12): 8-17.
- [7] 孟竹, 邱志军. 节能导向的信号交叉口生态驾驶策略研究[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(2): 76-84, 92.  
Meng Zhu, Qiu Zhijun. Research on Eco-Driving Strategy of Energy-Saving Signalized Intersections [J]. Traffic Information and Safety, 2018, 36(2):76-84, 92.
- [8] 刘显贵, 王晖年, 洪经纬, 等. 网联环境下信号交叉口车速控制策略及优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(2): 82-90.  
Liu Xiangui, Wang Huinian, Hong Jingwei, et al. Speed Control Strategy and Optimization at Signalized Intersections in the Networked Environment [J]. Transportation Systems Engineering and Information, 2021, 21(2): 82-90.
- [9] Yao Z, Xu T, Jiang Y, et al. Linear Stability Analysis of Heterogeneous Traffic Flow Considering Degradations of Connected Automated Vehicles and Reaction Time[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications (S0378-4371), 2021, 561: 125218.
- [10] 庞明宝, 夏泽民, 栾燕海. 城市快速路多匝道协调控制信号施加策略仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(8): 3050-3057.  
Pang Mingbao, Xia Zemin, Luan Yanhai. Simulation of Multi-ramp Coordinated Control Signal Application Strategy for Urban Expressways [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3050-3057.
- [11] 马新露, 李贝, 许陈蕾. 信号倒计时影响下的进口道交通流分析与建模[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(5): 36-44.  
Ma Xinlu, Li Bei, Xu Chenlei. Traffic Flow Analysis and Modeling of the Entrance Under the Influence of Signal Countdown [J]. Transportation System Engineering and Information, 2017, 17(5): 36-44.
- [12] 李素兰, 张谢东, 施俊庆, 等. 基于机动车排放的交叉口信号控制仿真与分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(4): 72-78.  
Li Sulan, Zhang Xiedong, Shi Junqing, et al. Simulation and Analysis of Intersection Signal Control Based on Motor Vehicle Emissions [J]. Transportation Systems Engineering and Information, 2019, 19(4): 72-78.
- [13] Du M, Liu J, Chen Q. Improving Traffic Efficiency During Yellow Lights Using Connected Vehicles[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications (S0378-4371), 2021, 578: 126108.
- [14] 江泽浩, 杨晓光, 汪涛. 绿灯倒计时影响下机动车微观驾驶行为分析与决策建模[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(2): 66-72.  
Jiang Zehao, Yang Xiaoguang, Wang Tao. Analysis and Decision Modeling of Motor Vehicle Microscopic Driving Behavior Under the Influence of Green Light Countdown [J]. Transportation Systems Engineering and Information, 2018, 18(2): 66-72.
- [15] Gipps P G. A Behavioural Car-Following Model for Computer Simulation[J]. Transportation Research Part B: Methodological(S0191-2615), 1981, 15(2): 105-111.
- [16] 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 Xiaoping, Yu Dan, Sun Ruoxiao, et al. Research on Cellular Automata Traffic Flow Model Based on Safety Distance [J]. Transportation Systems Engineering and Information, 2015, 15(2): 54-60.
- [17] Ao Z, Jiang B, Shi P. Fault-Tolerant Control For a Class of Nonlinear Sampled-Data Systems Via a Euler Approximate Observer [J]. Automatica (S0005-1098), 2010, 46(11): 1852-1859.
- [18] Shladover S E, Su D Y, Lu X Y. Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow[J]. Transportation Research Record (S0361-1981), 2012, 2324(1): 63-70.
- [19] Shladover S E, Nowakowski C, Lu X Y, et al. Cooperative Adaptive Cruise Control: Definitions and

- Operating Concepts[J]. Transportation Research Record (S0361-1981), 2015, 2489(1): 145-152.
- [20] 安实, 姚焱东, 姜慧夫, 等. 信号交叉口绿色驾驶车速控制方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(5): 53-59.
- An Shi, Yao Handong, Jiang Huifu, et al. Speed Control Method for Green Driving at Signalized Intersections [J]. Transportation System Engineering and Information, 2015, 15(5): 53-59.