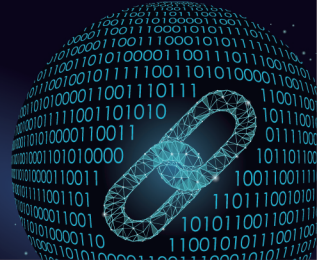




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

# 控制与决策

CONTROL AND DECISION



## 多车道交叉口交通信号与混合车辆轨迹协同优化框架

王立夫, 刘一铄, 孔芝, 郭戈

引用本文:

王立夫, 刘一铄, 孔芝, 郭戈. 多车道交叉口交通信号与混合车辆轨迹协同优化框架[J]. *控制与决策*, 2024, 39(11): 3567–3576.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1616>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [基于混合整数规划的智能网联车冲突区时序优化模型](#)

Mixed integer programming model of scheduling for connected automated vehicles in a conflict zone

控制与决策. 2021, 36(3): 705–710 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0886>

#### [通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制](#)

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption

控制与决策. 2021, 36(4): 933–939 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

#### [通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制](#)

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption

控制与决策. 2021, 36(4): 933–939 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

#### [基于Frenet坐标系的自动驾驶轨迹规划与优化算法](#)

Trajectory planning and optimization algorithm for automated driving based on Frenet coordinate system

控制与决策. 2021, 36(4): 815–824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0748>

#### [基于改进萤火虫算法的区域交通信号配时优化](#)

Timing optimization of regional traffic signals based on improved firefly algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2829–2834 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1835>

# 多车道交叉口交通信号与混合车辆轨迹协同优化框架

王立夫<sup>†</sup>, 刘一铄, 孔芝, 郭戈

(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 智能网联自动驾驶技术逐渐成熟, 为交叉口日益严重的交通拥堵和能源浪费问题提供了新的解决方案. 将交通信号控制与车辆轨迹优化相结合, 可以有效提高通行效率和燃油效率. 因此, 针对混合交通流环境下的多车道交叉口, 提出一种交通信号与车辆轨迹协同优化控制框架. 首先, 考虑到信号相序的动态变化和车辆变道的原因及其持续性影响, 对车辆的纵向跟驰模型和横向变道模型进行改进; 其次, 以最小化车辆通行延迟和油耗为目标, 提出交通信号与车辆轨迹协同优化控制方法, 在交通信号的自适应控制下平滑车辆轨迹; 此外, 设计一种协同优化控制算法, 以较低的计算量保证优化效率; 最后, 在不同的交通情境下进行数值仿真, 结果表明所提出框架能够同时提高通行效率和燃油效率. 相比交通信号或车辆轨迹的单独优化框架, 所提出协同优化框架在通行延迟、油耗、安全性能和驾驶舒适度等方面均能产生更多的增益.

**关键词:** 混合交通流; 多车道交叉口; 车辆轨迹优化; 交通信号优化; 油耗; 通行延迟

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1616

引用格式: 王立夫, 刘一铄, 孔芝, 等. 多车道交叉口交通信号与混合车辆轨迹协同优化框架[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3567-3576.

## Integrated optimization framework for traffic signal and mixed vehicle trajectory at multi-lane intersection

WANG Li-fu<sup>†</sup>, LIU Yi-shuo, KONG Zhi, GUO Ge

(School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The maturing intelligent connected autonomous driving technology presents a novel solution to the increasing traffic congestion and energy wastage issues at the signalized intersection. Integrating traffic signal control with vehicle trajectory optimization holds significant promise in enhancing traffic throughput and fuel efficiency. Therefore, addressing the multi-lane signalized intersection in mixed traffic flow environments, this paper proposes an integrated optimization framework for traffic signal and vehicle trajectory. Initially, improvements are made to the longitudinal car-following model and lateral lane-change model, considering the dynamic changes in signal sequencing and the reasons behind vehicle lane-changing, as well as the persistent impact of vehicle lane-changing processes. Subsequently, an integrated optimization method is established with the goal of minimizing vehicle travel delays and fuel consumption, which achieves adaptive traffic signal control and smooth vehicle trajectory. Furthermore, an integrated optimization control algorithm is devised to ensure minimal computational overhead while guaranteeing optimizing efficiency. Finally, numerical simulations conducted in various traffic scenarios indicate that the proposed framework significantly improves both traffic throughput and fuel efficiency. Compared to individual optimization frameworks for traffic signal or vehicle trajectory, the proposed framework demonstrates notable additional benefits in terms of travel delay, fuel consumption, safety performance and driving comfort.

**Keywords:** mixed traffic flow; multi-lane intersection; vehicle trajectory optimization; traffic signal optimization; fuel consumption; travel delay

## 0 引言

车辆在交叉口频繁的变速和红灯滞留行为是造成交通拥堵和能源浪费的主要原因<sup>[1]</sup>. 车联网通讯技

术的快速发展在改善通行效率和降低能耗层面为交叉口优化管理提供了新思路<sup>[2]</sup>, 使得交通信号和车辆轨迹的优化控制成为智能交通领域的热点问题<sup>[3-5]</sup>.

收稿日期: 2023-11-19; 录用日期: 2024-01-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573077, U1808205); 河北省自然科学基金项目(F2022501005); 国家留学基金项目(202308130119).

责任编辑: 虞文武.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: wlfkz@qq.com.

在过去十几年的信号交叉口优化研究中,交通信号和车辆轨迹的优化往往是分开的. 针对交通信号的优化主要集中在基于轨迹预测的信号自适应控制. Feng等<sup>[6]</sup>提出了一种自适应信号配时策略,在网联环境下求得最优信号相序. Chen等<sup>[7]</sup>提出了一种无需枚举信号相位的改进型自适应信号控制. Lin等<sup>[8]</sup>利用模糊时间序列预测车流量并实时调整信号相序. 然而,这类针对交通信号的优化方法无法避免预测误差,影响优化效率. 针对车辆轨迹的优化主要集中在固定信号时序下的轨迹平滑. Ma等<sup>[9]</sup>提出了一种打靶启发式算法,预测车辆轨迹的最大边界,但预测精度有所欠缺. Feng等<sup>[10]</sup>求得了低油耗驾驶策略的解析解,通过降低车队的红灯滞留时间改善油耗. Zhao等<sup>[11]</sup>设计了一种车队生态驾驶策略,有效降低了通行时间. 然而,这类针对车辆轨迹的优化方法难以适应实时变化的交通流量,优化效率存在瓶颈.

近些年来,交通信号和车辆轨迹的协同优化得到了关注. 这种优化框架既可以适应交通流量的变化,又可以解决红灯滞留问题<sup>[12]</sup>. Yu等<sup>[13]</sup>提出了一种多目标优化方法并利用滚动区域法进行求解. Jiang等<sup>[14]</sup>根据优化后的信号配时优化多个车队的通行时间. Jiang等<sup>[15]</sup>提出两阶段联合优化框架并利用动态规划进行求解. 该类研究主要考虑全网环境,但由于车联网通讯技术发展尚不完全,未来将会有一段长期的网联自动驾驶车辆 (connected autonomous vehicle, CAV) 和人为驾驶车辆 (human-driven vehicle, HDV) 共存的混合驾驶阶段<sup>[16]</sup>,因此有必要在混合交通流环境下展开研究. Chen等<sup>[17]</sup>提出了“1+n”混合车辆编队优化控制,并针对实施效率设计了分层事件触发算法. Yao等<sup>[18]</sup>在混合交通流环境下应用模型预测控制优化轨迹. 然而,上述研究忽略了车辆的变道行为,该过程会对原车道的车流量造成显著的影响<sup>[19]</sup>. 综上,在混合交通流环境下的多车道信号交叉口中,缺少同时考虑信号优化、轨迹优化、跟驰行为和变道行为的优化控制框架.

基于上述研究,本文提出一种混合交通流环境下多车道交叉口交通信号与车辆轨迹协同优化控制框架. 首先,对车辆纵向跟驰模型和横向变道模型进行了改进. 将跟驰模型从传统的固定信号配时环境扩展到动态可变信号配时环境,同时提出了改进的车辆变道模型,对车辆的变道原因及持续过程进行了精确的判断,更符合真实驾驶情况. 其次,为了降低通行延迟和油耗,提出了交通信号与车辆轨迹协同优化方法,实现信号灯的自适应控制与车辆的平滑行驶. 此

外,设计了一种协同优化控制算法,以较低的计算量保证所提出框架的优化效果. 最后,通过数值仿真进行性能对比,验证了所提出框架的有效性.

## 1 问题描述

本文主要考虑混合交通流环境下的十字型信号交叉口场景,如图1所示. 由于右转车辆不受信号灯的直接控制,只考虑左转和直行的车辆运动. 同时,路口的中央控制器可以实时收集通讯范围 $L_{ctrl}$ 内车辆的信息,规划信号相序,并提供驾驶策略. 这种优化方法旨在实时整合交叉口的时空信息,平滑车辆轨迹,提高交叉口通行容量,降低通行延迟和油耗.

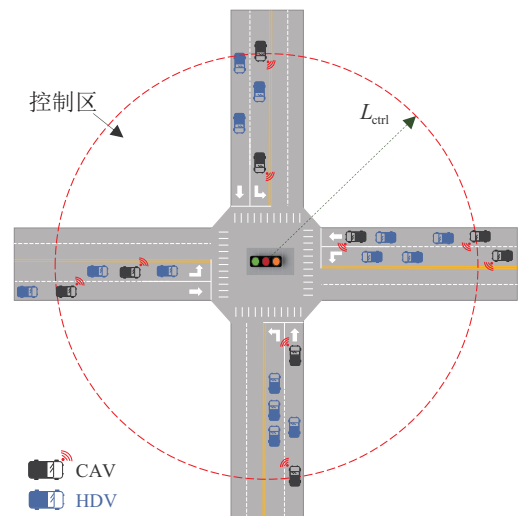


图1 混合交通流环境下多车道十字型信号交叉口场景

本文将控制区车道 $[0, L]$ 分为4个区域<sup>[15,20]</sup>,如图2所示. 为确保安全,车 $n$ 应当与其紧前方车辆 $n-1$ 保持最低的安全距离 $d^{safe}$ (由车辆长度和安全缓冲距离组成<sup>[9]</sup>),则 $t$ 时刻车 $n$ 与前车的安全时距为

$$h_n^{safe}(t) = \begin{cases} \tau_{CAV} + \frac{d_{CAV}^{safe}}{v_n(t)}, & n \in \Omega_{CAV}; \\ \tau_{HDV} + \frac{d_{HDV}^{safe}}{v_n(t)}, & n \in \Omega_{HDV}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\tau$ 表示反应时间, $v_n(t)$ 表示车 $n$ 在 $t$ 时刻的速度, $\Omega_{CAV}$ 和 $\Omega_{HDV}$ 分别表示CAV和HDV的集合. 车 $n$ 驶入控制区的初始时间 $t_n^0$ 应满足<sup>[9]</sup>

$$t_n^0 = t_{n-1}^0 + h_n^{safe}(t_n^0) \left( 1 + \xi_n \left( \frac{1}{f_s} - 1 \right) \right). \quad (2)$$

其中: $\xi_n \in [0, 2]$ 是一个随机数, $f_s \in [0, 1]$ 表示交通拥堵率,初始速度 $v_n(t_n^0)$ 在 $[v_{max}/2, v_{max}]$ 范围内随机选择. 当车 $n$ 的起始状态不满足安全条件,即 $d_{n,n-1}(t_n^0) < v_n(t_n^0)h_n^{safe}(t_n^0)$ 时,需要重新初始化车辆的状态,即

$$\begin{cases} v_n(t_n^0) = v_{n-1}(t_{n-1}^0), \\ t_n^0 = t_{n-1}^0 + h_n^{safe}(t_n^0), \end{cases} \quad (3)$$

其中  $d_{n,n-1}(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t)$  表示  $t$  时刻车  $n$  与前车  $n-1$  的间距。

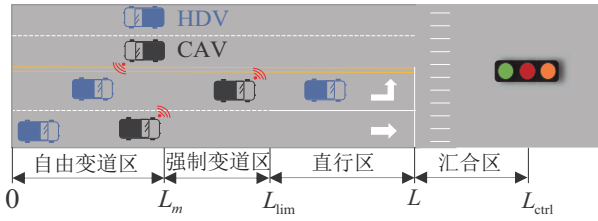


图2 车道的区域划分

车辆的行驶轨迹受信号灯的直接控制,图3显示了美国电气制造商协会标准的信号灯结构下的一组信号周期<sup>[10,15]</sup>,其中  $\varphi_i$  表示8个方向的车辆运动,对应图1中的8条车道.每个相位包含两种互不冲突的运动,意味着同一时刻将有两条车道处于绿灯状态。

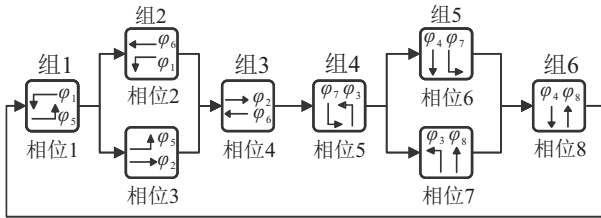


图3 交通信号灯相序周期

为方便设计,需要做出如下假设<sup>[13,18]</sup>: 1)所有车辆都能将速度、加速度和位置传输到中央控制器,且不考虑数据丢失和通信延迟. 2)CAV可实现全自动驾驶,即按规划的轨迹行驶,且不考虑变道. HDV采用纯手动驾驶,应用跟驰和变道模型描述其驾驶行为. 3)所有车辆都是同质的,不区分个性特征。

## 2 车辆轨迹控制模型的改进

为更符合真实驾驶情况,同时适应交通信号的动态变化,本节对车辆的轨迹控制模型进行了改进。

### 2.1 纵向跟驰模型的扩展

对于 HDV,出于驾驶安全性考量,采用 Gipps 跟驰模型<sup>[21]</sup>控制其纵向行为,对于  $n \in \Omega_{HDV}$ ,有

$$v_n(t + \tau_{HDV}) = F(v_n(t), v_{n-1}(t), d_{n,n-1}(t)), \quad (4)$$

$$F(\cdot) = \min\{v_n(t) + a_{\max}\tau_{HDV}, v_{\max}, v_n^{\text{safe}}(v_{n-1}(t), d_{n,n-1}(t))\}, \quad (5)$$

$$v_n^{\text{safe}}(\cdot) = a_{\min}\tau_{HDV} + ((a_{\min}\tau_{HDV})^2 + v_{n-1}^2 - 2a_{\min}(d_{n,n-1} - d_{HDV}^{\text{safe}}))^{1/2}. \quad (6)$$

为适应信号的动态变化,将该模型从传统的固定信号配时扩展到动态信号配时,有

$$v_n(t + \tau_{HDV}) = G(v_n(t), v_{n-1}(t), d_{n,n-1}(t)). \quad (7)$$

$$G(\cdot) =$$

$$\begin{cases} F(v_n, v_{n-1}, d_{n,n-1}), \\ \text{mod}(t, C) \in [s_{\lambda_1-1}, s_{\lambda_1}] \cup [s_{\lambda_2-1}, s_{\lambda_2}]; \\ \min\{F(v_n, v_{n-1}, d_{n,n-1}), \\ F(v_n, 0, L - x_n + d_{HDV}^{\text{safe}})\}, \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $\lambda_1, \lambda_2 (\lambda_1 \leq \lambda_2 - 1)$  表示车  $n$  所处车道的信号相位,  $s_p$  表示从初始时刻到相位  $p$  的总时长,  $C$  表示信号周期. 为保障安全,CAV也具有手动驾驶模式,即

$$v_n(t + \tau_{CAV}) = G(v_n(t), v_{n-1}(t), d_{n,n-1}(t)). \quad (9)$$

### 2.2 改进的横向变道模型

多车道交叉口中,车辆存在变道行为,需要满足安全准则和激励准则<sup>[22]</sup>. 安全准则判断目标车道上前后车间距,有

$$d_{n,n-1} > v_n h_n^{\text{safe}} + \max\left\{0, \frac{v_{n-1}^2 - v_n^2}{2a_{\min}}\right\}, \quad (10)$$

$$d_{n,n+1} > v_{n+1} h_{n+1}^{\text{safe}} + \max\left\{0, \frac{v_n^2 - v_{n+1}^2}{2a_{\min}}\right\}, \quad (11)$$

其中  $n-1$  和  $n+1$  表示车  $n$  在目标车道上的前后车. 激励准则判断变道的原因

$$\tilde{a}_n(t) - a_n(t) > \Delta a_n(t). \quad (12)$$

其中:  $\tilde{a}_n(t)$  和  $a_n(t)$  表示车  $n$  在目标车道和当前车道上的加速度,  $\Delta a_n(t)$  代表判断阈值。

首先,本文对变道原因按自由变道和强制变道进行了精确区分,自由变道使车辆能获得更大加速度,强制变道使车辆能行驶在目标道路,即

$$\Delta a_n(t) = \begin{cases} -\infty, & o_n(t) \notin o_n^*, x_n(t) \in [L_m, L_{\text{lim}}]; \\ +\infty, & o_n(t) \in o_n^*, x_n(t) \in [L_m, L]; \\ 0.1, & x_n(t) \in [0, L_m]. \end{cases} \quad (13)$$

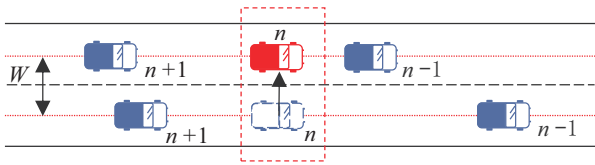
其中:  $o_n(t)$  表示车  $n$  所处车道,  $o_n^*$  表示车  $n$  的目标车道. 自由变道区的车辆专注于加速度,此时  $\Delta a_n(t) = 0.1$ <sup>[22]</sup>. 强制变道区的车辆专注于车道,不在目标车道时,  $\Delta a_n(t) = -\infty$ ; 在目标车道时,  $\Delta a_n(t) = +\infty$ 。

其次,本文对车辆的变道模型进行了改进. 大部分研究假设车辆变道是瞬时的<sup>[17-18]</sup>,忽略了实际变道过程对原车道产生的影响,如图4(a)所示. 本文考虑了变道的持续过程,如图4(b)所示,在时间  $t_c$  内,假设两条车道上同时存在相同的虚拟车辆  $n$  和  $n_1$ <sup>[19]</sup>. 图5显示了改进的持续性变道模型,有

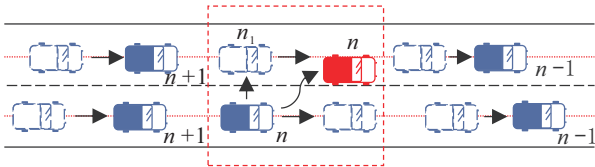
$$\Delta s_i = v_n(t) \tan \theta \Delta t, \quad (14)$$

$$\frac{W + w}{2} = \sum_{i=1}^m \Delta s_i, \quad (15)$$

$$t_c = \sum_{i=1}^m \Delta t. \quad (16)$$



(a) 不考虑变道过程的瞬时变道



(b) 考虑变道过程的持续性变道

图4 瞬时变道与持续性变道模型的对比

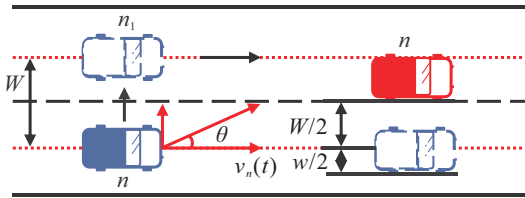


图5 改进的持续性变道模型

### 3 交通信号和车辆轨迹协同优化控制

本节将提出交通信号和车辆轨迹协同优化方法.二者存在相互迭代过程,进行信号优化时,关键输入为车辆到达路口的时间,输出为最优信号相序;进行轨迹优化时,关键输入为信号相序,输出为车辆轨迹.

#### 3.1 交通信号相序优化控制

为解决相位顺序和持续时间的最优选择问题,采用交通信号相序优化方法<sup>[10,18]</sup>,应用图6所示的动态规划预测车辆行驶状态,计算最优信号决策.  $s_p$ 表示从初始时刻到相位 $p$ 的总时长,  $x_p$ 表示相位 $p$ 的绿灯时长<sup>[23]</sup>,关系如下:

$$s_p = s_{p-1} + \begin{cases} 0, & x_p = 0; \\ x_p + r_p, & x_p \neq 0; \end{cases} \quad (17)$$

其中  $r_p$  代表黄灯时间.

优化目标是 minimized 通行延迟(实际通行时间和理想通行时间的差),即

$$Z = \min \sum_p f_p(s_p, x_p) = \min \sum_p \sum_n (t_n^{\text{travel}} - L/v_{\max}). \quad (18)$$

约束条件为

$$\begin{cases} x_p^{\min} \leq x_p \leq x_p^{\max}, & x_p \neq 0; \\ x_p = 0, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (19)$$

$$\sum_p (x_p + r_p) = C; \quad (20)$$

$$X_p(s_p) =$$

$$\begin{cases} 0, & s_p - s_{p-1} - r_p < x_p^{\min}; \\ \{x_p^{\min}, \dots, x_p^{\max}\}, & s_p - s_{p-1} - r_p > x_p^{\min}, \\ & C - s_{p-1} - r_p > x_p^{\max}; \\ \{x_p^{\min}, \dots, C - s_{p-1} - r_p\}, & C - s_{p-1} - r_p < x_p^{\max}. \end{cases} \quad (21)$$

该优化方法可以应用在不同形状的交叉口中,只需改变对应于该交叉口的信号灯结构即可.

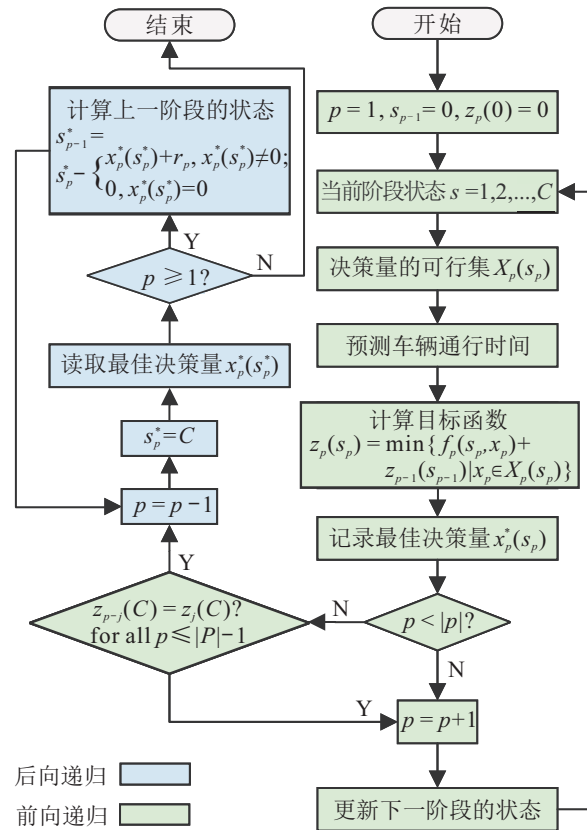


图6 动态规划求解最优信号相序流程

#### 3.2 车辆轨迹优化控制

本节提出车辆轨迹优化控制方法,主要考虑通行时间<sup>[24]</sup>和简化的油耗模型<sup>[25]</sup>.对于  $n \in \Omega_{\text{CAV}}$ ,目标函数为

$$\min J_n = \omega_\alpha (t_n^L - t_n^0) + \omega_\beta \int_{t_n^0}^{t_n^L} a_n^2 + v_n^2 dt. \quad (22)$$

其中:  $t_n^0$  和  $t_n^L$  表示车  $n$  到达  $[0, L]$  起点和终点的时间;  $\omega_\alpha$  和  $\omega_\beta$  表示通行效率和燃油效率的权重系数.约束条件为:

1) 路段起点约束

$$x_n(t_n^0) = 0, \quad (23)$$

车辆到达起点的时间  $t_n^0$  和速度  $v_n(t_n^0)$  见式(1)~(3).

2) 路段终点约束

$$x_n(t_n^L) = L, \quad (24)$$

$$\underline{t}_n^L \leq t_n^L \leq \overline{t}_n^L, \quad (25)$$

其中  $\overline{t}_n^L$  和  $\underline{t}_n^L$  代表车  $n$  离开控制区终点时间的上下限. 离开时间的下限值为

$$\underline{t}_n^L = \begin{cases} \widehat{t}_n^L, \text{mod}(\widehat{t}_n^L, C) \in ([s_{\lambda_1-1}, s_{\lambda_1}] \cup [s_{\lambda_2-1}, s_{\lambda_2}]); \\ \lfloor \widehat{t}_n^L / C \rfloor C + s_{\lambda_1-1}, \text{mod}(\widehat{t}_n^L, C) \in ([s_{\lambda_2}, C]); \\ \lfloor \widehat{t}_n^L / C \rfloor C + s_{\lambda_1-1}, \text{mod}(\widehat{t}_n^L, C) \in ([0, s_{\lambda_1-1}]); \\ \lfloor \widehat{t}_n^L / C \rfloor C + s_{\lambda_2-1}, \text{mod}(\widehat{t}_n^L, C) \in ([s_{\lambda_1}, s_{\lambda_2-1}]); \end{cases} \quad (26)$$

$$\widehat{t}_n^L = \max \left\{ t_n^0 + \frac{(v_{\max} - v_n(t_n^0))^2}{2a_{\max}v_{\max}} + \frac{L}{v_{\max}}, t_{n-1}^L + \tau_{\text{CAV}} + \frac{d_{\text{CAV}}^{\text{safe}}}{v_{\max}} \right\}. \quad (27)$$

其中  $\widehat{t}_n^L$  表示车  $n$  驶出路段的最短时间, 当前车  $n-1$  对其没有影响时, 该车处于自由驾驶状态; 否则, 车  $n$  需要和前车保持一定的安全距离. 此外, 式 (26) 保证了车辆以最短时间到达停止线时处于绿灯时间内. 离开时间的上限值  $\overline{t}_n^L$  为

$$\overline{t}_n^L = \min \left\{ G'(t_n^L), \underline{t}_n^L + \tau_{\text{CAV}} + \frac{d_{\text{CAV}}^{\text{safe}}}{v_{\max}} \right\}. \quad (28)$$

$$G'(t_n^L) = \begin{cases} \lfloor t_n^L / C \rfloor C + s_{\lambda_1}, \text{mod}(t_n^L, C) \in [s_{\lambda_1-1}, s_{\lambda_1}]; \\ \lfloor t_n^L / C \rfloor C + s_{\lambda_2}, \text{mod}(t_n^L, C) \in [s_{\lambda_2-1}, s_{\lambda_2}]. \end{cases} \quad (29)$$

3) 时间约束

$$t_n^0 \leq t_n \leq t_n^L. \quad (30)$$

4) 速度约束

$$0 \leq v_n(t) \leq v_{\max}. \quad (31)$$

5) 加速度约束

$$a_{\min} \leq a_n(t) \leq a_{\max}. \quad (32)$$

6) 安全性约束

$$x_{n-1}(t) - x_n(t) \geq v_n(t)h_n^{\text{safe}}(t). \quad (33)$$

式 (22)~(33) 构成了一个高阶非线性优化问题, 为了进行数值求解, 采用伪谱法<sup>[26]</sup> 将其转化为非线性规划问题, 并利用 GPOPS 工具箱<sup>[27]</sup> 进行求解.

### 4 协同优化控制算法

当 CAV 经过控制区起点后, 会按规划的轨迹行驶. 但是车辆的变道行为可能会扰乱 CAV 当前的轨迹, 产生安全隐患. 此外, 信号更新后, 原轨迹可能无

法完全适配新的信号相序, 降低优化效率. 因此, 在起点的一次性轨迹规划无法完全确定其未来的行驶轨迹, 影响实际应用效果. Chen 等<sup>[17]</sup> 针对单车道交叉口中的车队轨迹优化提出了一种事件触发的分层算法, 每个车队的领头车在轨迹出现偏差时重新进行规划, 确保车队之间无轨迹干扰. 受该研究启发, 本文针对车辆的变道行为和信号灯的动态变化提出了一种应对机制. 当 CAV 的轨迹因前车插道而被干扰时, CAV 会判断间距是否足以重新规划轨迹, 若空间足够, 则采用新的轨迹; 若不满足, 则采用人为驾驶模式. 信号更新后, CAV 会根据新的信号相序重新规划轨迹, 以期在新的绿灯时间进入汇合区. 这种机制可以灵活应对车辆的频繁变道以及交通信号的动态变化, 以较低的计算量保证优化效率. 整体流程如图 7 所示.

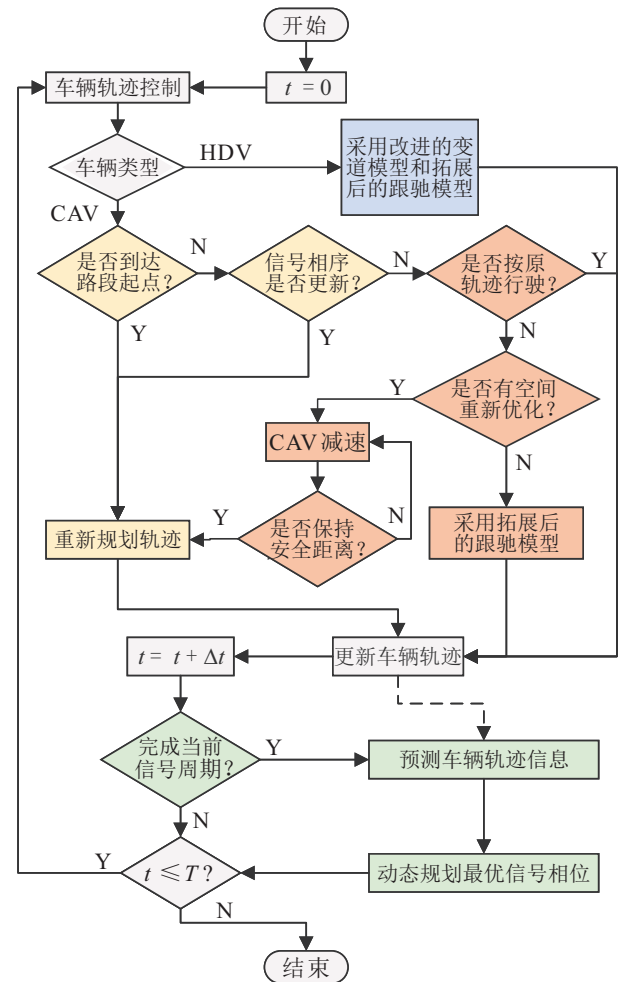


图 7 协同优化控制算法

### 5 数值仿真

本节应用 Matlab 搭建如图 1 所示的双车道十字型交叉口. 在不同控制框架下进行仿真, 仿真时间  $T = 700 \text{ s}$ . 表 1 显示了 5 种控制框架, 其中 Benchmark 表示采用瞬时变道的跟驰控制, CF 表示采用改进变道的跟驰控制, SO 表示交通信号优化控制, TO 表示

车辆轨迹优化控制, IO表示所提协同优化控制. 主要性能参数(数值越低, 性能越好)如下:

1) 平均驾驶舒适度<sup>[28]</sup>

$$\overline{RC} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{i=t_n^0/\Delta t}^{t_n^L/\Delta t} (\dot{a}_n [i])^2 \Delta t}{N}; \quad (34)$$

2) 平均通行延迟<sup>[17]</sup>

$$\overline{DT} = \frac{\sum_{n=1}^N (t_n^{\text{travel}} - L/v_{\max})}{N}; \quad (35)$$

3) 平均油耗<sup>[20]</sup>

$$\overline{FC} = \frac{\sum_{n,i} e^{\left\{ \sum_{j_1=0}^3 \sum_{j_2=0}^3 \kappa(v_n[i])^{j_1} (a_n[i])^{j_2} \right\}} \Delta t}{N}; \quad (36)$$

4) 平均安全性能<sup>[9]</sup>

$$\overline{SS} = \frac{\sum_{n,i} \max \left\{ 0, \frac{v_n[i] - v_{n-1}[i]}{x_{n-1}[i] - x_n[i] - l} \right\} \Delta t}{N}. \quad (37)$$

表1 交叉口的5种控制框架

框架	跟驰模型	变道改进	信号优化	轨迹优化
Benchmark	✓			
CF (Car Following)	✓	✓		
SO (Signal Optimization)	✓	✓	✓	
TO (Trajectory Optimization)	✓	✓		✓
IO (Integrated Optimization)	✓	✓	✓	✓

首先,对改进变道模型的作用进行验证. 采用跟驰驾驶策略 Benchmark 和 CF, 此时 CAV 占比率为 0, 在 4 种交通需求量(360、720、1080 和 1440 veh/h/lane) 下进行仿真. 表 2 显示了系统性能对比, 可见, 引入改进变道模型会降低系统性能, 且随着需求量的增加, 这种影响愈加明显. 而对于饱和状态的交通流量, 这种不利影响有所降低. 原因在于当流量较低时, 车辆变道更频繁, 变道过程会迫使两车道上的跟随车辆持

续性减速, 造成加速度和速度上的额外波动, 降低性能. 而在高饱和度下, 车间距离较近, 变道空间不足, 但是高饱和度下的变道行为会造成更严重的流量波动. 因此, 引入改进的变道模型能更真实地反映车辆的变道行为, 更符合真实驾驶情况.

表2 跟驰控制下引入改进变道模型前后系统性能对比

需求量	框架	性能指标			
		驾驶舒适度	通行延迟	油耗	安全性能
360	Benchmark	70.62	50.06	46.65	3.92
	CF	74.43	54.01	49.68	4.01
	Δ/%	-5.4	-7.9	-6.5	-2.3
720	Benchmark	119.43	93.28	104.86	4.51
	CF	127.91	101.96	113.46	4.77
	Δ/%	-7.1	-9.3	-8.2	-5.8
1080	Benchmark	150.21	156.92	169.53	4.94
	CF	163.43	175.12	190.72	5.26
	Δ/%	-8.8	-11.6	-12.5	-6.5
1440	Benchmark	186.49	211.38	255.52	5.72
	CF	196.93	223.43	267.27	5.91
	Δ/%	-5.6	-5.7	-4.6	-3.3

其次, 设置 CAV 占比为 50%, 在 4 种需求量下采用 CF、SO、TO 和 IO 框架进行仿真, 以 CF 为基准参考. 表 3 显示了 4 种框架下的系统性能, 可以看出, SO、TO 和 IO 均可降低通行延迟和油耗, 且随着交通需求量的增加, 改善效果逐渐明显. 在通行延迟方面, IO 可以比 CF (约 18% ~ 35%)、SO (约 11% ~ 15%) 和 TO (约 8% ~ 15%) 产生更多的增益; 在油耗方面, IO 也可以比 CF (约 22% ~ 31%)、SO (约 16% ~ 19%) 和 TO (约 11% ~ 13%) 产生额外的增益. 说明 IO 更优于单独优化框架 SO 和 TO, 这主要得益于协同优化过程, 使得车辆的轨迹更加平滑, “走停” 波动次数更少, 提高了交叉口的通行能力和信号灯的运行效率. 因此, 所提出框架在绿灯时间分配和交叉口容量利用方面都更具灵活性.

表3 不同控制框架下系统平均通行延迟和平均油耗对比

性能	框架	交通需求量/(veh/h/lane)			
		360	720	1080	1440
平均通行延迟/s	CF	52.51	99.14	161.74	213.66
	SO	48.69 (7.27%)	88.38 (10.85%)	137.74 (14.84%)	177.19 (17.07%)
	TO	46.93 (10.62%)	83.72 (15.55%)	132.55 (18.05%)	170.71 (20.10%)
	IO	42.85 (18.39%)	75.17 (24.18%)	113.82 (29.63%)	137.87 (35.47%)
平均油耗/mL	CF	48.27	109.25	173.71	257.18
	SO	45.83 (5.06%)	99.63 (8.81%)	156.30 (10.02%)	225.14 (12.46%)
	TO	43.19 (10.52%)	94.95 (13.09%)	146.19 (15.84%)	208.44 (18.95%)
	IO	37.80 (21.70%)	80.67 (26.16%)	124.83 (28.14%)	176.53 (31.36%)

为了更直观反应所提出框架 IO 的作用, 在 CAV 占比为 50%, 交通需求量为 720 下的交叉口中采用 4 种控制框架进行仿真. 图 8 显示了 4 种框架下同

一车道的车辆轨迹, 其中红线表示 CAV, 蓝线表示 HDV. 对比图 8 中 (a) 和 (b), 在 CF 框架的某些周期中, 部分绿灯被浪费, 而 SO 框架会根据车辆信息自适应

地调整信号序列, 高效利用绿灯时间. 对比图 8 中 (a) 和 (c), CF 框架下车辆会在红灯时滞留在路口, 而 TO 框架下车辆会提前减速, 与后方车辆形成紧凑的车队, 在绿灯时间段内到达路口. 图 8(d) 表明, IO 同时具有 SO 和 TO 的优点, 既可以提高绿灯利用率, 也可以避免车辆在路口的滞留, 消除了车辆重启损失时间, 同时车辆通行轨迹更加平滑, 提高了交叉口通行效率.

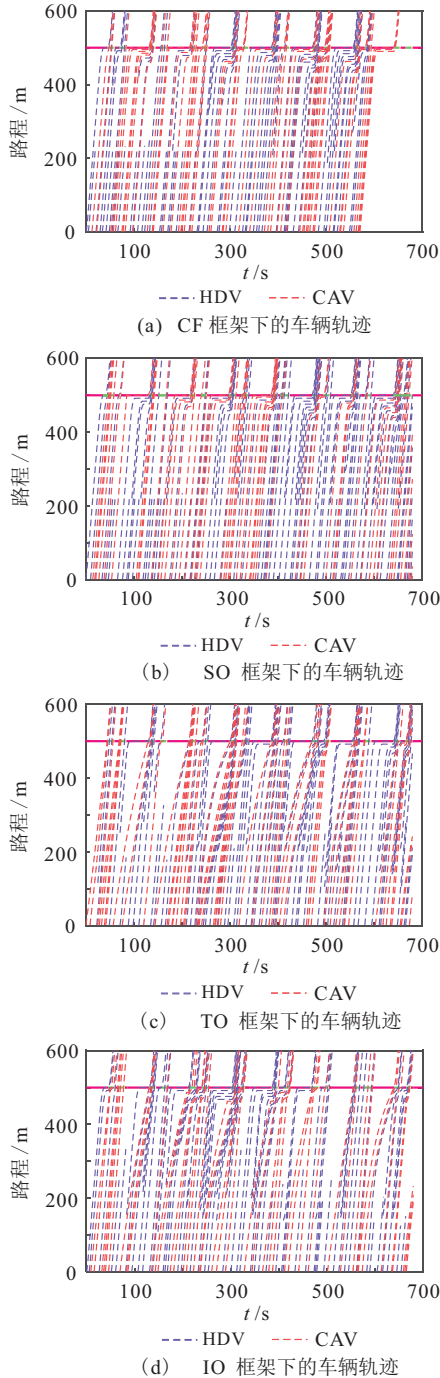


图 8 4 种框架下的车辆轨迹

为了详细展示 IO 框架提升交叉口容量的效果, 在 CAV 占比为 50%, 需求量较高时采用 SO 和 IO 框架进行仿真. 图 9 显示了两种框架下的车辆轨迹. 由图 9(a) 可以看出, 当需求量较高时, 仅通过信号控制仍

然会使交叉口处于过饱和状态, 道路存在严重的拥堵和“走停”波动现象. 由图 9(b) 可知, 额外引入轨迹优化后, 道路会保持明显的空隙, 见图中黑框. 这表明在高需求量的车道下, 面对车辆的随机变道过程, 道路不会出现过饱和现象. 因此, 所提出框架在高需求下仍然具有良好的效果, 能够应对由车辆变道导致的拥堵, 更高效发挥出混合交通流中 CAV 的关键引导作用. 此外, 由图 8 和图 9 中的车辆轨迹可知, 当 CAV 的轨迹因信号更新或前车插队而变更时, 车辆轨迹仍然保持稳定, 车流仍能平滑行驶.

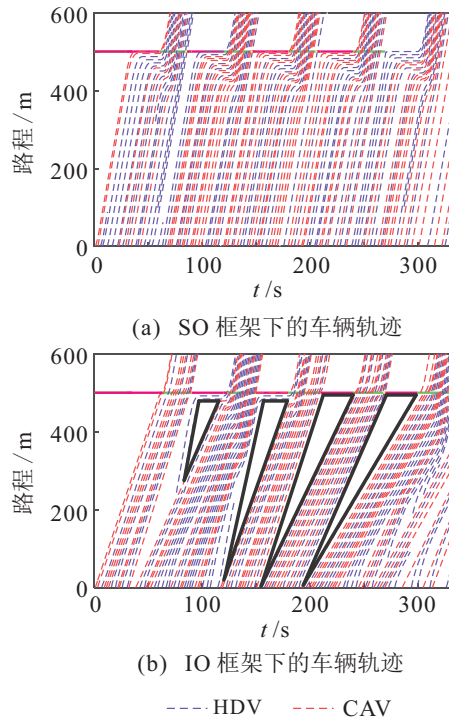


图 9 高需求量下 SO 和 IO 框架的车辆轨迹

为探寻变道应对机制的效果, 图 10 显示了某 CAV 的行驶轨迹. 其中: 蓝色线表示 HDV 变道后的轨迹, 黑色虚线表示 CAV 原轨迹, 黑色实线表示 CAV 新轨迹. 当 HDV 插道后, 若 CAV 仍采用原轨迹行驶, 则会发生碰撞; 若此时 CAV 直接采用人为驾驶, 则相当于将 CAV 降级为 HDV, 失去了优化作用. 因此, CAV 重新规划轨迹, 这种应对机制在保证行车安全的前提下, 能更好地发挥 CAV 的关键作用.

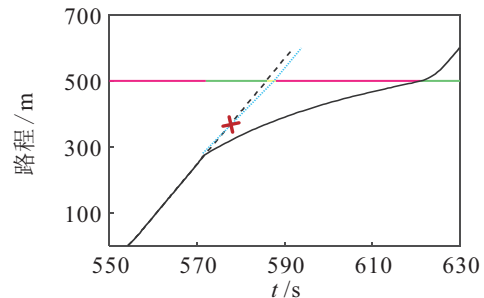


图 10 变道应对机制的效果

为了以个体车辆视角探寻所提出框架的优势,设置CAV占比为50%,需求量为720,分别对4种框架下的交叉口进行仿真.图11和图12显示了同一辆车在不同框架下的位置、速度和加速度.图11表明CF框架下该车会在路口滞留较长时间,而SO和TO会降低滞留时间,但没有完全消除.而IO则避免了该车的滞留过程,且能以最短的时间通过路口.图12(a)表明IO框架下速度波动的频率和幅度均小于其他框架,且该车长期保持高速行驶,状态较为稳定.图12(b)表明IO框架下加速度波动的持续时间低于其他框架,车

辆能迅速回到匀速行驶状态.综上,IO框架对个体车辆的作用优势明显,能够有效提高驾驶舒适度.

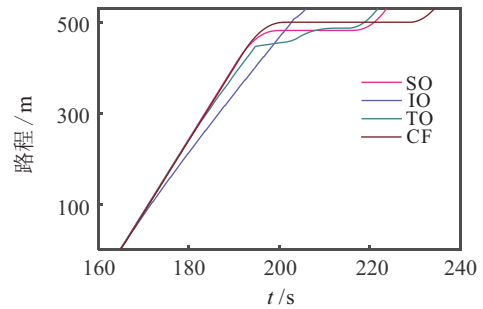


图11 不同框架下同一车辆的路程对比

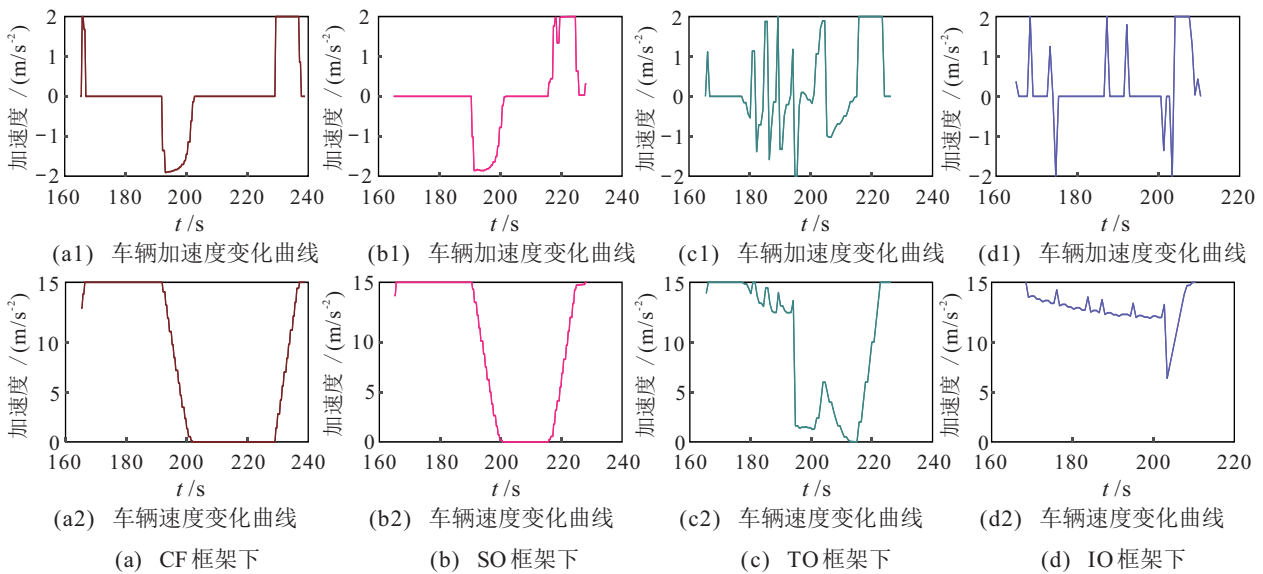


图12 不同框架下同一车辆的速度和加速度对比

为探究CAV占比的影响,设置交通需求量为720,CAV占比以10%为增量从10%递增至100%,采用4种框架进行仿真.图13显示了性能随CAV占比的变化情况.其中:纵坐标表示相比CF产生的增益,紫色实线表示IO,绿色实线表示TO,红色虚线表示SO.图13表明4种性能在3种框架下的收益均随着CAV占比的增加而增大.当CAV占比较低时,车道中HDV占据主导地位,CAV的作用效果相对较弱,此时IO和TO的优化效果较差.随着CAV占比的增加,SO的优化效果提升并不明显,因为这种信号优化框架不会对车辆轨迹直接进行控制,优化效果不会随CAV

占比的增加而有明显的改善.TO和IO的性能变化相似,但IO的优化效果始终高于TO.因为相比单独优化轨迹,协同优化框架下的车辆轨迹更加平滑,速度和加速度的波动更低.具体来讲,相比TO和SO,IO可以额外产生至多16%和45%的驾驶舒适度增益、10%和16%的油耗增益、15%和35%的通行延迟增益、16%和50%的安全性增益.然而,当CAV占比过低时,IO和TO在通行延迟方面的增益是负的,因为此时TO和IO对CAV的作用效果不明显,HDV为了提升驾驶效率而变道,导致交叉口通行能力下降.当CAV占比升高时,优化效果逐渐增强,进而改善通行

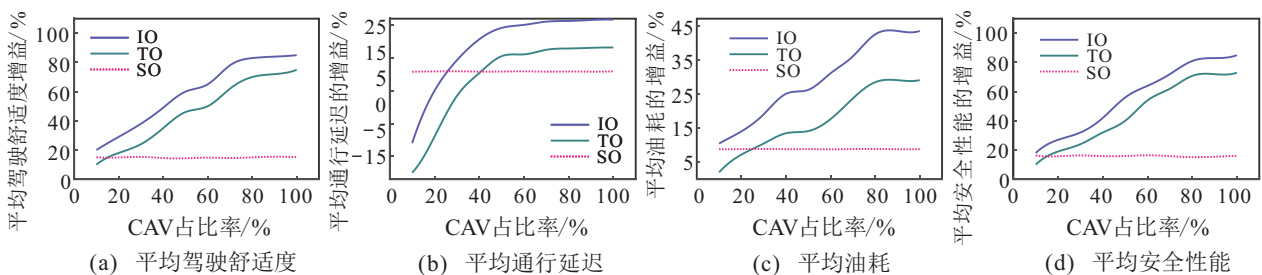


图13 不同占比下性能增益对比

延迟方面的性能.

## 6 结论

针对多车道信号交叉口,本文在混合交通流环境下提出了交通信号和车辆轨迹协同优化控制框架.首先,将车辆跟驰模型和变道模型进行了改进,更符合真实交通情况,同时能更好地适应交通信号的动态变化;其次,结合油耗和通行延迟,提出了交通信号和车辆轨迹协同优化控制方法,实现了自适应信号灯控制下的车辆轨迹平滑;然后,设计了一种协同优化控制算法,保障了协同优化控制框架的应用效率;最后,通过一系列数值仿真验证了所提出优化控制框架的有效性.结果表明,所提出协同优化控制框架同时具有TO和SO的优势,且在通行延迟、油耗、安全性能和驾驶舒适度方面均能产生更多的增益.

在实际应用中,通过道路传感器和网联车辆的通讯功能,中央控制器能够实时获取车辆的行驶信息,进而实现孤立交叉口中交通信号和车辆轨迹的协同优化.虽然本文主要研究对象是孤立交叉口,但本文所做研究验证了所提出优化框架在改善孤立交叉口性能中的潜力.通过额外构建不同交叉口之间交通信号的协同优化方法,可以将其拓展到多交叉口场景.研究连续多交叉口组成的干线交叉口中交通信号和车辆轨迹协同优化问题,更具有现实意义.另外,本文做出的一些假设可能会对实际应用产生影响,例如通讯延迟、道路车辆的异构性、驾驶员行为的随机性等,未来可以针对假设的条件展开研究.

## 参考文献(References)

- [1] Taiebat M, Brown A L, Safford H R, et al. A review on energy, environmental, and sustainability implications of connected and automated vehicles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(20): 11449-11465.
- [2] Contreras-Castillo J, Zeadally S, Guerrero-Ibanez J A. Internet of vehicles: Architecture, protocols, and security[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(5): 3701-3709.
- [3] 马万经, 李金珏, 俞春辉. 智能网联混合交通流交叉口控制: 研究进展与前沿[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(2): 22-40.  
(Ma W J, Li J J, Yu C H. Intersection control in mixed traffic with connected automated vehicles: A review of recent developments and research frontiers[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(2): 22-40.)
- [4] 郭戈, 许阳光, 徐涛, 等. 网联共享车路协同智能交通系统综述[J]. *控制与决策*, 2019, 34(11): 2375-2389.  
(Guo G, Xu Y G, Xu T, et al. A survey of connected shared vehicle-road cooperative intelligent transportation systems[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(11): 2375-2389.)
- [5] Shaikh P W, El-Abd M, Khanafer M, et al. A review on swarm intelligence and evolutionary algorithms for solving the traffic signal control problem[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(1): 48-63.
- [6] Feng Y H, Head K L, Khoshmagham S, et al. A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 55: 460-473.
- [7] Chen S K, Sun D J. An improved adaptive signal control method for isolated signalized intersection based on dynamic programming[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2016, 8(4): 4-14.
- [8] Lin H F, Han Y H, Cai W W, et al. Traffic signal optimization based on fuzzy control and differential evolution algorithm[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(8): 8555-8566.
- [9] Ma J Q, Li X P, Zhou F, et al. Parsimonious shooting heuristic for trajectory design of connected automated traffic part II: Computational issues and optimization[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 95: 421-441.
- [10] Feng Y H, Yu C H, Liu H X. Spatiotemporal intersection control in a connected and automated vehicle environment[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 89: 364-383.
- [11] Zhao W M, Ngoduy D, Shepherd S, et al. A platoon based cooperative eco-driving model for mixed automated and human-driven vehicles at a signalised intersection[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 95: 802-821.
- [12] 王云鹏, 郭戈. 城市交叉口车辆速度与交通信号协同优化控制[J]. *控制与决策*, 2019, 34(11): 2397-2406.  
(Wang Y P, Guo G. Joint optimization of vehicle speed and traffic signals at a signalized intersection[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(11): 2397-2406.)
- [13] Yu C H, Feng Y H, Liu H X, et al. Integrated optimization of traffic signals and vehicle trajectories at isolated urban intersections[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 112: 89-112.
- [14] Jiang Y S, Zhao B, Liu M, et al. A two-level model for traffic signal timing and trajectories planning of multiple CAVs in a random environment[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021: 9945398.
- [15] Jiang Z T, Yu D X, Luan S L, et al. Integrating traffic signal optimization with vehicle microscopic control to reduce energy consumption in a connected and automated vehicles environment[J]. *Journal of Cleaner Production*,

- 2022, 371: 133694.
- [16] Wang J W, Zheng Y, Xu Q, et al. Controllability analysis and optimal control of mixed traffic flow with human-driven and autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(12): 7445-7459.
- [17] Chen C Y, Wang J W, Xu Q, et al. Mixed platoon control of automated and human-driven vehicles at a signalized intersection: Dynamical analysis and optimal control[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 127: 103138.
- [18] Yao Z H, Zhao B, Yuan T F, et al. Reducing gasoline consumption in mixed connected automated vehicles environment: A joint optimization framework for traffic signals and vehicle trajectory[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 265: 121836.
- [19] Lv W, Song W G, Liu X D, et al. A microscopic lane changing process model for multilane traffic[J]. Physica A Statistical Mechanics and Its Applications, 2013, 392(5): 1142-1152.
- [20] Yao H D, Li X P. Lane-change-aware connected automated vehicle trajectory optimization at a signalized intersection with multi-lane roads[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 129: 103182.
- [21] Gipps P G. A behavioural car-following model for computer simulation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1981, 15(2): 105-111.
- [22] Treiber M, Kesting A. Traffic flow dynamics: Data, models and simulation[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 983-1000.
- [23] Sen S, Head K L. Controlled optimization of phases at an intersection[J]. Transportation Science, 1997, 31(1): 5-17.
- [24] Yao H D, Li X P. Decentralized control of connected automated vehicle trajectories in mixed traffic at an isolated signalized intersection[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 121: 102846.
- [25] Kamal M A S, Mukai M, Murata J, et al. Model predictive control of vehicles on urban roads for improved fuel economy[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(3): 831-841.
- [26] Elnagar G, Kazemi M A, Razzaghi M. The pseudospectral Legendre method for discretizing optimal control problems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(10): 1793-1796.
- [27] Patterson M A, Rao A V. GPOPS-II: A MATLAB software for solving multiple-phase optimal control problems using hp-adaptive Gaussian quadrature collocation methods and sparse nonlinear programming[J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2014, 41(1): 1-37.
- [28] Wang Y P, Cai P L, Lu G Q. Cooperative autonomous traffic organization method for connected automated vehicles in multi-intersection road networks[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 111: 458-476.

### 作者简介

王立夫(1980—),男,副教授,博士,从事交通网络、复杂网络等研究, E-mail: wlfkz@qq.com;

刘一铄(2000—),男,硕士生,从事网联车辆协同优化控制、智能交通系统等研究, E-mail: 1391554076@qq.com;

孔芝(1979—),女,副教授,博士生导师,从事决策分析、智能优化算法等研究, E-mail: kongz@neuq.edu.cn;

郭戈(1972—),男,教授,博士生导师,从事网联车辆协同控制、智能交通系统等研究, E-mail: geguo@yeah.net.