文章编号:1673-0291(2026)04-0165-13 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20250121

网联交通环境下交叉口人机混合驾驶车流分离控制方法

王 树[1],王华荣[2],蒋贤才[1]
(1.东北林业大学 土木与交通学院,哈尔滨 150040;2.中国交通运输协会,北京 100053)

摘 要:为提升网联交通环境下交叉口人机混合交通流的运行效率,缓解网联自动驾驶车(Connected and Automated Vehicle,CAV)与网联人工驾驶车(Connected Human-driven Vehicle,CHV)混行所引发的交通冲突,提出一种基于预信号的人机混合驾驶车流分离控制方法.首先,在交叉口进口道设置CAV专用车道、第二停车线、预信号及排队区,通过协调主信号与预信号的启闭时序,引导CAV优先进入主停车线前排队,实现CAV与CHV在时空上的分离排序;然后,以交叉口车均延误最小为优化目标,综合考虑信号周期、绿灯时长、车辆速度与加速度、跟驰安全距离、变道路径及主预信号协调约束,构建车辆轨迹与信号配时联合优化模型,并采用粒子群优化(Particle Swarm Optimization,PSO)算法进行求解,同时利用五次贝塞尔曲线规划CAV变道路径;最后,基于MATLAB开展不同交通需求条件下的仿真实验,并与定时信号控制、先到先服务(First In First Out,FIFO)策略及相位连续型排阵式交叉口(Phase Continuous Tandem Intersection,PCTI)控制方法进行对比.结果表明:在高流量条件下,所提方法相较于FIFO和PCTI的车均延误分别降低28.27%和19.4%,并可有效减少高风险变道状态、改善车辆停车特性.敏感性分析结果表明:CAV渗透率、排队区长度及通信延迟均对控制效果具有显著影响;CAV渗透率与车均延误呈非线性关系,排队区长度应根据交通需求动态设置,较低的通信延迟更有利于发挥CAV协同控制优势.研究成果可为人机混合交通环境下交叉口精细化组织与协同控制提供理论依据和技术支撑.

关键词:交通工程;人机驾驶分离;轨迹优化;信号配时;网联交通
中图分类号:U491.2 **文献标志码**:A

Separation control method for human-machine mixed traffic at intersections in connected traffic environment

Wang Shu[1], *Wang Huarong*[2], *Jiang Xiancai*[1]
(1.School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2.China Communications and Transportation Association, Beijing 100053, China)

Abstract: To improve the operational efficiency of human-machine mixed traffic at intersections in a connected traffic environment and mitigate conflicts arising from interactions between the Connected and Automated Vehicle (CAV) and the Connected Human-driven Vehicles (CHV), this study proposes a presignal-based separation control method. First, a CAV-dedicated lane, a secondary stop

收稿日期:2025-07-28;**修回日期**:2025-09-09
基金项目:黑龙江省自然科学基金(PL2024E012)
Foundation item: Natural Science Foundation of Heilongjiang Province(PL2024E012)
第一作者:王树(2001—),女,山东泰安人,硕士.研究方向为道路交通控制.**email**:Wshu2023@nefu.edu.cn.

引用格式:王树,王华荣,蒋贤才.网联交通环境下交叉口人机混合驾驶车流分离控制方法[J].北京交通大学学报,2026,50(4):165-177.
Wang Shu, Wang Huarong, Jiang Xiancai. Separation control method for human-machine mixed traffic at intersections in connected traffic environment[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(4): 165-177.(in Chinese)

line, presignals, and a queueing area are installed on each intersection approach. By coordinating the timing of the main signals and presignals, CAVs are given priority to enter the queue upstream of the main stop line, thereby separating and sequencing CAVs and CHVs in space and time. Second, a joint vehicle-trajectory and signal-timing optimization model is formulated to minimize average vehicle delay. The model incorporates the signal cycle, green time, vehicle speed and acceleration, safe car-following distance, lane-changing path, and coordination constraints between the main signals and presignals. Particle Swarm Optimization (PSO) is used to solve the model, and fifth-degree Bézier curves are used to plan CAV lane-changing paths. Finally, MATLAB simulations are conducted under different traffic-demand levels, and the proposed method is compared with fixed-time signal control, a First-In, First-Out (FIFO) strategy, and Phase-Continuous Tandem Intersection (PCTI) control. Under high traffic demand, the proposed method reduces average vehicle delay by 28.27% and 19.4% relative to FIFO and PCTI, respectively, while also reducing high-risk lane-changing states and improving stopping characteristics. Sensitivity analysis shows that CAV penetration, queueing-area length, and communication delay significantly affect control performance. The relationship between CAV penetration and average vehicle delay is nonlinear; the queueing-area length should be adjusted dynamically to traffic demand; and low communication delay is more conducive to realizing the benefits of coordinated CAV control. These findings provide a theoretical and technical basis for refined traffic organization and coordinated intersection control under human-machine mixed traffic conditions.

Keywords: traffic engineering; separation of human- and machine-driven vehicles; trajectory optimization; signal timing; connected traffic

网联自动驾驶车(Connected and Automated Vehicle, CAV)与网联人工驾驶车(Connected Human-driven Vehicle,CHV)在机动性和可控性上存在显著差异,二者混合通行难以体现CAV的优势,也不利于道路时空资源的挖掘.因此,如何实现CAV与CHV的高效协同,已成为智能交通领域研究的重要议题之一.特别是在交叉口,由于车流交织复杂,探索合理的分离策略以提升交通效率与安全性显得尤为关键.

预信号方法最早应用于公交优先控制,其核心思想是确保交叉口红灯阶段到达的公交车总能停在社会车辆前面.近年来,一些学者对公交预信号策略做了进一步改进,采取非常规交叉口(如排阵式交叉口、连续流交叉口、U-Turn交叉口等)的方法协调车辆运行,以缓解交叉口的通行压力.文献[1]通过协调主预信号配时和优化信号相位相序,提出了车辆在第二条停车线不用停车的优化控制策略.文献[2]建立了预信号干线交叉口交通信号控制双层优化模型,能有效提升交叉口车辆运行效率.文献[3]考虑了交通需求、饱和流率和运行车速3个影响因素,建立排阵式交叉口几何设计与信号控制协同鲁棒优化模型,提升了排阵式交叉口运行的稳定性.文献[4]对设置有公交专用道的交叉口进行重新设计,提出主预信号相位方案,解决了交叉口车流多路交织的问题.文献[5]针对快速路出口匝道衔接交叉口的车流交织问题,提出基于预信号的优化控制方法,实现了交织车流在时间上分离.文献[6]提出新增一个信号阶段和实时检测车辆需求的方案,动态调整预信号和主信号配时,提高了逆向车道的利用率.文献[7]针对交叉口普遍存在的机动车与自行车混行冲突问题展开研究,设计了4种差异化解决方案,通过仿真证明了方案可有效提升交叉口的通行效率.文献[8]对不同排阵式控制模式下的车道功能和信号控制协同优化方法展开研究,构建了排阵式交叉口车道功能-信号控制协同优化模型.

目前,针对交叉口人机混合驾驶车流分离控制,一般采用设置CAV专用道的方法.文献[9]最早提出在交叉口设置进口CAV专用车道的概念,将CAV与CHV在进口车道分离行驶,提升交叉口通行能力.文献[10]在不同CAV比例、进口道车道数、交通量和信号配时方案组合情况下,界定了交叉口进口CAV专用车道的动态设置条件.文献[11]考虑CAV渗透率的变化,提出一种动态CAV专用车道分配方法,以避免过度或低效使用CAV专用车道.文献[12]提出左转与直行CAV共享CAV专用车道的优化控制方法.文献[13]构建一种基于转换

指数的CAV共享车道配置方法,能根据交通需求的动态变化来决策CAV共享车道的设置时机,避免CAV共享车道的低效利用.文献[14]构建涵盖CAV通行能力、时间价值和能耗优势的出行成本函数,研究CAV专用车道在混合交通环境下的运行效益,为CAV专用车道的优化部署提供了理论依据.文献[15]提出一种基于动态CAV专用车道分配与信号协同优化的二维时空控制方法,结果表明,CAV专用车道的动态设置与渗透率密切相关.文献[16]针对CAV低渗透率混合交通流,通过布设连续CAV专用车道和构建融合"无停顿通行"特性的信号优化模型,显著提升了CAV通行效率.文献[17]针对CAV混合交通流场景下的车道通行能力与道路阻抗函数开展了基础性研究,为混合交通流的运行机理分析提供了理论依据.

综上,现有关于预信号控制的研究主要集中于传统交通环境,且关于CAV专用车道的相关研究均证实了专用车道在较高CAV渗透率条件下的有效性.然而,针对低CAV渗透率场景下CAV与CHV的有效分离方法,目前研究仍较少.基于此,本文融合交通预信号控制理论,提出一种面向人机混合驾驶环境的交叉口车流分离方法.通过预信号控制,实现人机混合驾驶车流在交叉口的分离排序,从而提升交叉口时空资源利用效率.

1　研究场景与优化思路

定义L为交叉口所有车道组的集合,B_l为车道组l中全部车道的集合,$B_{\mathrm{cav},l}$和$B_{\mathrm{mix},l}$分别为车道组l中CAV专用车道和混合驾驶车道的集合.$H_{b,l}$为车道组l中车道b($b\in B_{\mathrm{mix},l}$)上的全部CHV集合,$A_{b,l}$为车道组l中车道b($b\in B_{\mathrm{mix},l}$,$B_{\mathrm{cav},l}$)上的全部CAV集合.当车辆进入车道组l的交叉口通信范围n_0时,若为CHV车辆j进入通信范围的时刻记作$t_{j,b,l}$;若为CAV车辆i进入通信范围边界的时刻记作$t_{i,b,l}$.

优化思路如下:①将紧邻左转车道的直行车道设置为CAV专用车道,除该车道外,其他所有车道均设置第二停车线和预信号;主停车线与第二停车线之间的区域为CAV变道区和排队区.利用预信号将路段上混行的CAV与CHV在交叉口进口车道分离.②预信号红灯期间,无论左转CHV还是直行CHV,均在第二停车线后排队等待,而左转与直行CAV则通过CAV专用车道进入主停车线前的相应车道排队;预信号直行绿灯期间,直行车道中位于第二停车线后的CHV车队驶入排队区,后续到达的直行CAV与左转CAV共享CAV专用车道;左转绿灯期间的放行原则与此相同.③有别于公交预信号,CAV专用车道在预信号红灯和绿灯期间均可由左转CAV与直行CAV共享;有别于排阵式交叉口,本文中第二停车线前后车道的功能固定不变,如均保持左转或直行功能.基于预信号的人机混合驾驶车流分离控制见图1.图1中:Δt_1为预信号绿灯较主信号绿灯提前开启的时间,s;Δt_2为预信号绿灯较主信号绿灯提前关闭的时间,s;L_e为第二停车线与主停止线的距离;n_0为信号交叉口到通信范围边界的距离.

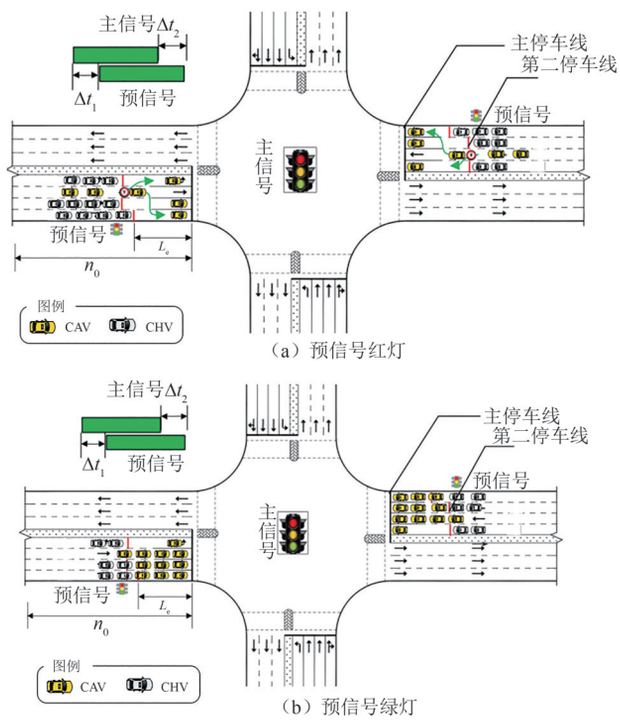


图1　基于预信号的人机混合驾驶车流分离控制示意

Fig. 1　Schematic of presignal-based separation control of human-machine mixed traffic

2　优化方法

2.1　优化目标

2.1.1　目标函数

以交叉口车均延误最小为优化目标,建立优化目标函数为

$$\min \bar{d}=\frac{\sum_{l\in L}\sum_{b\in B_{\mathrm{mix},l}}\sum_{i\in A_{b,l}} D_{i,b,l}^{\mathrm{cav}}}{\sum_{l\in L}\sum_{b\in B_{\mathrm{mix},l}}\sum_{i\in A_{b,l}} V_{i,b,l}^{\mathrm{cav}}}+\frac{\sum_{l\in L}\sum_{b\in B_{\mathrm{mix},l}}\sum_{i\in H_{b,l}} D_{j,b,l}^{\mathrm{chv}}}{\sum_{l\in L}\sum_{b\in B_{\mathrm{mix},l}}\sum_{i\in H_{b,l}} V_{j,b,l}^{\mathrm{chv}}}+\frac{\sum_{l\in L}\sum_{b\in B_{\mathrm{cav},l}}\sum_{i\in A_{b,l}} D_{i,b,l}^{\mathrm{cav}}}{\sum_{l\in L}\sum_{b\in B_{\mathrm{cav},l}}\sum_{i\in A_{b,l}} V_{i,b,l}^{\mathrm{cav}}} \tag{1}$$

$$D_{i,b,l}^{\mathrm{cav}}=t_{l,k,\mathrm{m}}+\tau_{\mathrm{cav}}+ih_{\mathrm{cav}}-t_{i,b,l}-n_0/v_{i,b,l}^{\max} \tag{2}$$

$$D_{j,b,l}^{\mathrm{chv}}=D_{j,b,l}^{\mathrm{chv,m}}+D_{j,b,l}^{\mathrm{chv,p}} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}D_{j,b,l}^{\mathrm{chv,m}}&=t_{l,k,\mathrm{m}}+\tau_{\mathrm{chv}}+ih_{\mathrm{cav}}+jh_{\mathrm{chv}}-t_{l,k,\mathrm{p}}-jh_{\mathrm{chv}}-\frac{L_{\mathrm{e}}}{v_{i,b,l}^{\max}}\\&=\Delta t_1+\tau_{\mathrm{chv}}+ih_{\mathrm{cav}}-\frac{L_{\mathrm{e}}}{v_{i,b,l}^{\max}}\end{aligned} \tag{4}$$

$$D_{j,b,l}^{\mathrm{chv,p}}=\begin{cases}t_{l,k,\mathrm{p}}+\tau_{\mathrm{chv}}+jh_{\mathrm{chv}}-t_{j,b,l}-\dfrac{n_0-L_{\mathrm{e}}}{v_{i,b,l}^{\max}}\\ \quad t_{j,b,l}+\dfrac{n_0-L_{\mathrm{e}}}{\bar{v}_{b,l}}\in\begin{bmatrix}t_{l,k-1,\mathrm{p}}+g_{l,k-1,\mathrm{p}},\\ t_{l,k,\mathrm{p}}+(j-1)h_{\mathrm{chv}}\end{bmatrix}\\ \quad 且(j-1)h_{\mathrm{chv}}<g_{l,k,\mathrm{p}}\\ t_{l,k,\mathrm{p}}+\tau_{\mathrm{chv}}+\sum(g_{l,k,\mathrm{p}}+I_{l,k,\mathrm{p}})+\\ \quad\left[j-\dfrac{g_{l,k,\mathrm{p}}}{h_{\mathrm{chv}}}\right]h_{\mathrm{chv}}-t_{j,b,l}-\dfrac{n_0-L_{\mathrm{e}}}{v_{i,b,l}^{\max}}\\ \quad t_{j,b,l}+\dfrac{n_0-L_{\mathrm{e}}}{\bar{v}_{b,l}}\in\begin{bmatrix}t_{l,k-1,\mathrm{p}}+g_{l,k-1,\mathrm{p}},\\ t_{l,k,\mathrm{p}}+(j-1)h_{\mathrm{chv}}\end{bmatrix}\\ \quad 且(j-1)h_{\mathrm{chv}}\geqslant g_{l,k,\mathrm{p}}\\ 0\end{cases} \tag{5}$$

式中：$\bar{d}$为交叉口所有车辆的平均延误，s；$D_{i,b,l}^{\mathrm{cav}}$为车道组l中车道b上第i辆CAV的延误，s；$D_{j,b,l}^{\mathrm{chv}}$为车道组l中车道b上第j辆CHV的延误，s；$V_{i,b,l}^{\mathrm{cav}}$为车道组l中车道b上CAV的总数量，veh；$V_{j,b,l}^{\mathrm{chv}}$为车道组l中车道b上CHV的总数量，veh；$t_{l,k,\mathrm{m}}$为l车道组第k周期主信号绿灯开启的时刻，s；τ_{cav}为CAV的启动损失时间，s；h_{cav}为CAV的饱和车头时距，s；$v_{i,b,l}^{\max}$为l车道组b车道第i辆CAV行驶的最大速度，m/s；$D_{j,b,l}^{\mathrm{chv,m}}$为主信号处车道组$l$中车道$b$上第$j$辆CHV的延误，s；$D_{j,b,l}^{\mathrm{chv,p}}$为预信号处车道组$l$中车道$b$上第$j$辆CHV的延误，s；$\bar{v}_{b,l}$为$l$车道组$b$车道的平均速度，m/s；$t_{l,k,\mathrm{p}}$为$l$车道组第$k$个信号周期预信号绿灯开启的时刻，s；$h_{\mathrm{chv}}$为CHV的饱和车头时距，s；$g_{l,k,\mathrm{p}}$为$l$车道组第$k$周期预信号绿灯开启的时长，s；$I_{l,k,\mathrm{p}}$为车道组$l$第$k$周期预信号的绿灯间隔时间，s；$\tau_{\mathrm{chv}}$为CHV的启动损失时间，s.

其中，式(1)为网联车的总延误，第1项为除CAV专用车道外，其他车道上CAV车辆在主信号处的平均延误；第2项为预信号处CHV车辆的平均延误；第3项为CAV专用道中CAV车辆的平均延误.式(2)为CAV车辆在主信号处的延误，用离开时间(前3项)减去进入时间(第4项)，再减去交叉口通信边界至主停车线这段距离以最大速度行驶所需的时间(第5项).式(3)为CHV延误，其中第1项为CHV在主信号的延误；第2项为CHV在预信号的延误.式(4)为CHV在主信号的延误.式(5)为CHV在预信号的延误，当车辆到达第二停车线时前方队列未消散，但在绿灯期间能通过，即式(5)第1种情况；当车辆到达第二停车线时前方队列未消散，且在绿灯期间不能通过，即式(5)第2种情况；车辆在绿灯时间到达第二停车线且前方队列已消散，即式(5)第3种情况.

2.1.2 约束条件

1)信号配时.

$$c_{\min}\leqslant c_{k,\mathrm{m}}=c_{k,\mathrm{p}}\leqslant c_{\max} \tag{6}$$

$$c_{k,\mathrm{m}}=\sum(g_{l,k,\mathrm{m}}+I_{l,k,\mathrm{m}}) \tag{7}$$

$$c_{k,\mathrm{p}}=\sum(g_{l,k,\mathrm{p}}+I_{l,k,\mathrm{p}}) \tag{8}$$

$$g_{\min}\leqslant g_{l,k,\mathrm{m}}\leqslant g_{\max} \tag{9}$$

$$g_{\min}\leqslant g_{l,k,\mathrm{p}}\leqslant g_{\max} \tag{10}$$

式中：$c_{k,\mathrm{m}}$为主信号的第k个周期时长，s；$c_{k,\mathrm{p}}$为预信号的第k个周期时长，s；$c_{\min}$为最小周期时长，s；$c_{\max}$为最大周期时长，s；$g_{l,k,\mathrm{m}}$为车道l第k周期主信号的绿灯时间，s；$I_{l,k,\mathrm{m}}$为车道组l第k周期主信号的绿灯间隔时间，s；$g_{\min}$、$g_{\max}$为车道组l的最大、最小绿灯时长，s；$c_{k,\mathrm{m}}$、$c_{k,\mathrm{p}}$、$g_{l,k,\mathrm{m}}$、$g_{l,k,\mathrm{p}}$为决策变量.

其中，式(6)为周期时长约束；式(7)、式(8)分别为主、预信号第k周期时长计算方法；式(9)、式(10)分别为车道l第k周期主、预信号的最小、最大绿灯时长约束.

2)车辆轨迹.

车辆速度和位置的更新需遵循基本的运动方程，此外，CHV采用Panwai[18]等改进的跟驰模型，CAV采用智能驾驶模型(Intelligent Driver Model，IDM模型).

$$v_{q,b,l}(t+\Delta t)=v_{q,b,l}(t)+a_{q,b,l}(t)\Delta t \tag{11}$$

$$x_{q,b,l}(t+\Delta t)=x_{q,b,l}(t)+v_{q,b,l}\Delta t+\frac{1}{2}a_{q,b,l}(t)(\Delta t)^2 \tag{12}$$

$$v_{\min}\leqslant v_{q,b,l}(t)\leqslant v_{\max} \tag{13}$$

$$-a_{\mathrm{dec}}\leqslant a_{q,b,l}(t)\leqslant a_{\mathrm{acc}} \tag{14}$$

$$a_{i,b,l}(t)=a_{\mathrm{acc}}\times\left\{1-\left(\frac{v_{i,b,l}(t)}{v_{\mathrm{cross}}}\right)^4-\left\{\frac{s^*\left[v_{i,b,l}(t),\Delta v_{i,b,l}(t)\right]}{s_{i,b,l}(t)}\right\}^2\right\} \tag{15}$$

$$s_{i,b,l}(t)=\Delta x_{i,b,l}(t)-d_{i-1} \tag{16}$$

$$\Delta x_{i,b,l}(t)=x_{i-1,b,l}(t)-x_{i,b,l}(t) \tag{17}$$

$$s_{i,b,l}^*(t)=d_{\mathrm{ck}}+T_{\mathrm{cav}}v_{i,b,l}(t)+\frac{v_{i,b,l}(t)\Delta v_{i,b,l}(t)}{2\sqrt{a_{\mathrm{acc}}a_{\mathrm{des}}}} \tag{18}$$

$$\Delta v_{i,b,l}=v_{i,b,l}(t)-v_{i-1,b,l}(t) \tag{19}$$

$$a_{j,b,l}(t)=\alpha_1\left[v_{j-1,b,l}(t)-v_{j,b,l}(t)\right]+\alpha_2\left\{\left[x_{j-1,b,l}(t)-x_{j,b,l}(t)-d_{j-1}\right]-d_{\mathrm{g}}-\tau_{\mathrm{chv}}v_{j,b,l}(t)\right\} \tag{20}$$

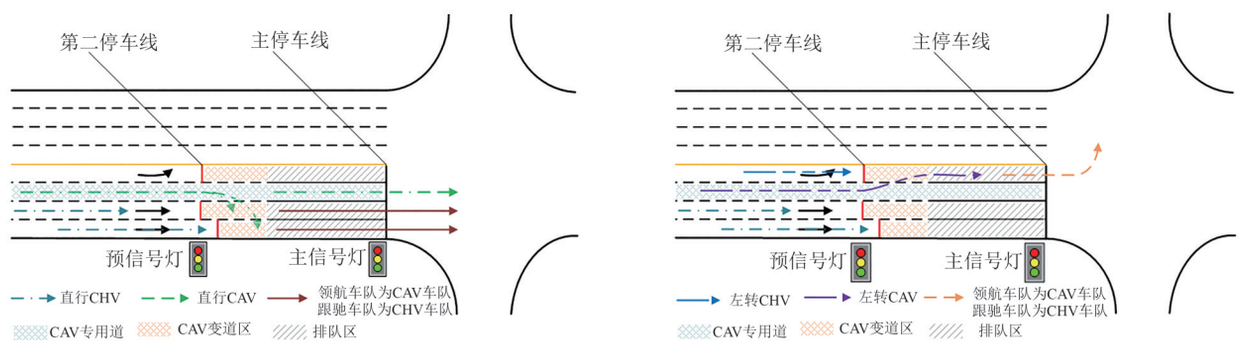
$$x_{q-1,b,l}(t)-x_{q,b,l}(t)\geqslant d_{q-1}+d_{\mathrm{s}}+T_q v_{q,b,l}(t) \tag{21}$$

式中:q为网联车辆编号,i为CAV编号,j为CHV编号;$x_{q,b,l}(t)$、$v_{q,b,l}(t)$、$a_{q,b,l}(t)$分别为时刻t车道组l中b车道上第q辆网联车的位移、速度和加速度,单位依次为m、m/s、m/s^2;$v_{\min}$和$v_{\max}$分别为车辆的最小限速和最大限速,m/s;$\Delta v_{i,b,l}(t)$和$\Delta x_{i,b,l}(t)$分别为跟驰车辆与前车的速度差和位移差;a_{acc}和a_{dec}分别为网联车的最大加速度和最大减速度的绝对值,m/s^2;v_{cross}为CAV在交叉口控制区域内的期望行驶速度,m/s;$s_{i,b,l}(t)$和$s^*_{i,b,l}$分别为第i辆CAV与前车之间的实际净间距和期望动态间距,m;d_{ck}为阻塞排队状态下的最小间距,m;T_{cav}为CAV的期望时间头距,s;a_{des}为CAV的期望减速度的绝对值,m/s^2;d_{i-1}、d_{j-1}和d_{q-1}为第i、j、q辆跟驰车辆前车的车长,m;d_{g}为CHV跟驰时的最小安全距离,m;a_1和a_2分别为速度差反应系数和间距偏差反应系数,单位分别为s、s^2;d_{s}为车辆跟驰时的静态安全距离,m;T_q为第q辆车的期望时间头距,s.

其中,式(11)和式(12)为车辆轨迹更新模型;式(13)和式(14)分别为速度、加速度约束;式(15)~式(19)为IDM跟驰模型;式(20)和式(21)为CHV跟驰模型.

2.2　主、预信号优化设计

主、预信号优化设计包括第二停车线的位置和主、预信号的协调关系两方面,交通流的组织模式见图2.



(a) 直行车流　　(b) 左转车流

图2　交通流组织模式

Fig. 2　Traffic flow organization mode

1) 车道配置.

除与左转车道相邻的直行车道外,其他所有进口车道在停车线后设置第二停车线,并安装交通信号灯,以将路段上混行的CAV和CHV在交叉口进口道分离.此外,进口道左转、直行车道数量须以每车道承担的CAV的交通量均衡为原则进行配置,当进口道f的车道数不少于3条时,交叉口进口车道的分配方法为

$$b_{f,l}=b_{f,l,\mathrm{s}}+b_{f,l,\mathrm{z}}+b_{f,l,\mathrm{cav}} \tag{22}$$

$$\frac{V_{f,l}^{\mathrm{cav,s}}}{b_{f,l,\mathrm{s}}}\approx\frac{V_{f,l}^{\mathrm{cav,z}}}{b_{f,l,\mathrm{z}}} \tag{23}$$

2) 第二停车线位置.

第二停车线距主停车线的距离L_{e}见图3,应满足

$$L_{\mathrm{e}}=L_{\mathrm{w}}+L_{\mathrm{v}} \tag{24}$$

$$L_{f,l,\mathrm{s}}=\frac{\dfrac{V_{f,l}^{\mathrm{cav,s}}}{3\,600/\bar{c}}\times(d_{\mathrm{cav}}+d_{\mathrm{s}})}{b_{f,l,\mathrm{s}}} \tag{25}$$

$$L_{f,l,\mathrm{z}}=\frac{\dfrac{V_{f,l}^{\mathrm{cav,z}}}{3\,600/\bar{c}}\times(d_{\mathrm{cav}}+d_{\mathrm{s}})}{b_{f,l,\mathrm{z}}} \tag{26}$$

$$L_{\mathrm{w}}=\max(L_{f,l,\mathrm{s}},L_{f,l,\mathrm{z}}) \tag{27}$$

$$L_{\mathrm{v}}=v_{\mathrm{r}}\cos\theta\cdot\sqrt{\frac{2b_{f,l}W}{a_{\mathrm{r}}\sin\theta}} \tag{28}$$

式中:$b_{f,l}$为第f进口道l车道组中的车道总数;$b_{f,l,\mathrm{s}}$为

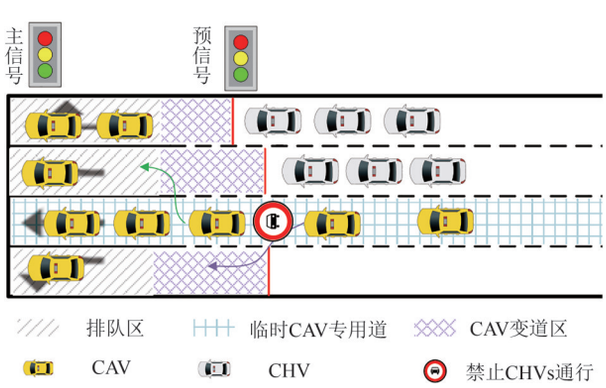


图3　L_{e}的构成(预信号绿灯时)

Fig. 3　Composition of L_{e} (presignal green)

第f进口道主停车线处l车道组中直行的车道数；$b_{f,l,z}$为第f进口道主停车线处l车道组中左转车道数，$b_{f,l,s}$和$b_{f,l,z}$均不包含CAV专用车道且$b_{f,l,s}\geqslant 1$，$b_{f,l,z}\geqslant 1$；$b_{f,l,cav}$为第f进口道l车道组中CAV专用车道的数量，设置为1；$V_{f,l}^{cav,s}$为第f进口道l车道组中直行CAV的高峰小时交通量，pcu/h；$V_{f,l}^{cav,z}$为第f进口道l车道组中左转CAV的高峰小时交通量，pcu/h；L_w为排队区的长度，m；L_v为CAV变道区的长度，m；$L_{f,l,s}$为第f进口道l车道组直行车道CAV排队所需的长度，m；$L_{f,l,z}$为第f进口道l车道组左转车道CAV排队所需的长度，m；$\bar{c}$为历史同时段平均信号周期时长，s；d_{cav}为CAV车长，m；v_r为车辆变道时的速度，m/s；a_r为变道时的加速度，m/s^2；W为一条车道的车道宽度，m；θ为车辆变道时与路段所形成的夹角，°.

其中，式(25)、式(26)为单个直行、左转车道中CAV最大排队队长的计算方法；式(27)为第f进口道l车道组排队区长度确定方法；式(28)为CAV变道区长度的计算方法.

3) 主、预信号协调关系.

在主、预信号周期时长相同的情况下，为减少主信号绿灯损失并避免主信号绿灯结束时第二停车线与主停车线间有CHV滞留，预信号绿灯须比主信号绿灯早开启Δt_1秒，早断开Δt_2秒，见图4、图5.

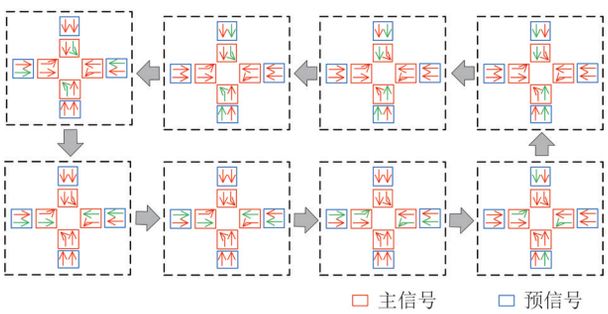


图4 主、预信号相位图

Fig. 4 Phase diagram of main signals and presignals

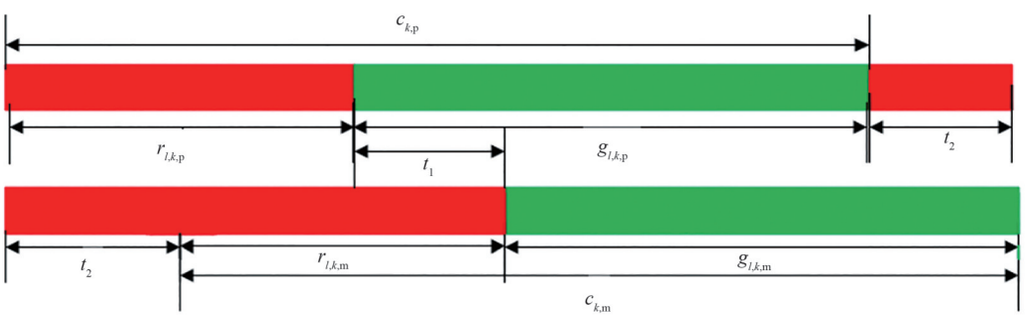


图5 主、预信号关系

Fig. 5 Timing relationship between the main signals and presignals

$$\Delta t_1=\frac{v_{cross}}{2a_2}+\frac{L_e}{v_{cross}} \tag{29}$$

$$\Delta t_2=\frac{L_e}{v_{cross}} \tag{30}$$

$$t_{l,k,m}^{s}=t_{l,k,p}^{s}+\Delta t_1 \tag{31}$$

$$t_{l,k,p}^{z}+g_{z,p}=t_{l,k,m}^{s} \tag{32}$$

式中：a_2为车辆的平均加速度，m/s^2；$t_{l,k,m}^{s}$为l车道组第k周期主信号直行绿灯开启时刻，s；$t_{l,k,p}^{s}$为l车道组第k周期预信号直行绿灯开启时刻，s；$g_{z,p}$为预信号左转绿灯的时长，s；$t_{l,k,p}^{z}$为l车道组第k周期预信号左转绿灯开启时刻，s.

2.3 车辆变道与轨迹优化

2.3.1 CAV变道模型

当CAV进入交叉口通信范围时，信号控制器为CAV规划其进入排队区的轨迹.为保证车道能充分利用，CAV在变换车道时，优先向最外侧车道变道，避免内侧车道排队过长造成外侧车道浪费的现象.同时为保证交通流的均衡性并最大化利用绿灯时间，同一流向车道的排队长度应尽可能相等.

在网联交通环境下，贝塞尔曲线换道模型[19]相比传统的五次多项式换道模型，具备更高的平滑性、更低的计算成本、更强的可控性，同时适用于实时动态环境.因此，本文采用五次贝塞尔曲线进行换道路径规划，其表达式为

$$\begin{cases} x_{i,b,l}(u)=x_0(1-u)^5+5x_1(1-u)^4+\\ 10x_2(1-u)^3u^2+10x_3(1-u)^2u^3+\\ 5x_4(1-u)u^4+x_5u^5\\ y_{i,b,l}(u)=w\left[10(1-u)^2u^3+5(1-u)u^4+u^5\right] \end{cases} \tag{33}$$

式中：$x_{i,b,l}(u)$，$y_{i,b,l}(u)$为车道组l中车道b的第i辆CAV换道行驶过程中的纵向位移和横向位移，m；x_I(I=0,1,…,5)为换道期间选取的各点的坐标信息；w为车辆在换道过程中沿y方向的最大位移量，m；u为曲线参数，$u\in[0,1]$.

2.3.2　轨迹优化

CAV不仅可以向信号控制器发送自己的位置、速度等信息,还可接收来自信号控制器的指令,调整其行驶轨迹.因此,可规划部分本应在预信号绿灯开启后到达第二停车线的CAV加速驶入排队区,使尽可能多的CAV车辆形成CAV车队,以提升主信号绿灯期间的通行效率.

1)当CAV以当前速度匀速行驶至排队区时,若预信号仍处于红灯状态,则无需对该CAV进行轨迹优化,其判定条件为

$$t_{i,b,l}+\frac{n_0-L_e}{v_{i,b,l}}\leqslant t_{l,k,p} \tag{34}$$

2)当CAV以当前速度匀速行驶至排队区时,预信号已变成绿灯,若以当前速度先加速到最大限速后匀速,之后再减速到达排队区,此时预信号仍为红灯,则对这部分CAV进行轨迹优化,定义t_i^{cav}为该三段式行驶模式下车辆抵达排队区的总行驶时间,表达式为

$$t_i^{cav}=\frac{n_0-L_e-\dfrac{v_{max}^2-(v_{i,b,l})^2}{v_{max}}-\dfrac{v_{max}^2-v_r^2}{|a_{des}|}}{v_{max}}+\frac{v_{max}-v_{i,b,l}}{a_{acc}}+\frac{v_{max}-v_r}{|a_{des}|} \tag{35}$$

CAV优化范围见图6.若满足$t_{i,b,l}+t_i^{cav}\leqslant t_{l,k,p}$且$t_{(i+1),b,l}+t_{i+1}^{cav}>t_{l,k,p}$,则车辆$i$为轨迹优化的最后一辆车;而优化范围外的CAV,即使以最大速度运行,也无法在预信号绿灯开启前进入排队区,此时保持进入速度匀速行驶即可.

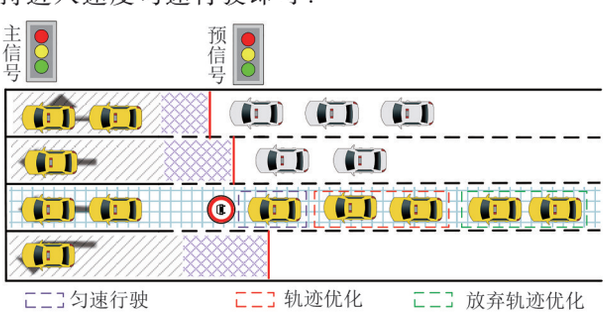


图6　CAV优化范围示意

Fig. 6　Schematic of CAV trajectory-optimization region

基于匀加减速策略对CAV轨迹进行优化,如图7所示,优化方法为

$$a_{i,b,l}(t)=\begin{cases}0 & t\in[t_{i,b,l},t_3]\\ a_{acc} & t\in(t_3,t_4]\\ 0 & t\in(t_4,t_5]\\ a_{des} & t\in(t_5,t_6]\\ 0 & t\in(t_6,t_7]\end{cases} \tag{36}$$

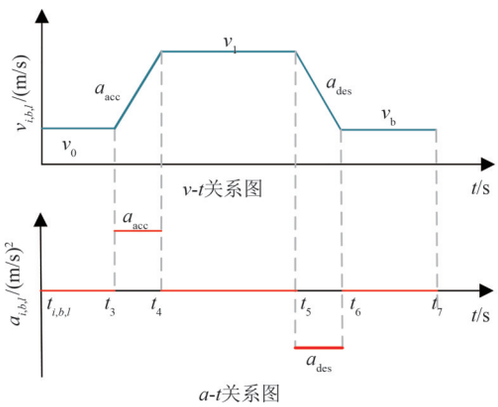


图7　CAV轨迹优化策略

Fig. 7　CAV trajectory-optimization strategy

$$v_{i,b,l}(t)=\begin{cases}v_0 & t\in[t_{i,b,l},t_3]\\ v_0+a_{acc}(t-t_3) & t\in(t_3,t_4]\\ v_1 & t\in(t_4,t_5]\\ v_1-a_{des}(t-t_5) & t\in(t_5,t_6]\\ v_b & t\in(t_6,t_7]\end{cases} \tag{37}$$

式中:t_3为车辆加速初始的时刻,s;t_4为车辆加速结束的时刻,s;t_5为车辆匀速结束的时刻,s;t_6为车辆减速结束的时刻,s;t_7为车辆驶入排队区的时刻,s;v_0为车辆进入通信边界的初速度,m/s;v_1为车辆匀加速结束的速度,m/s;v_b为车辆进入排队区时的速度,m/s.

2.4　模型求解

粒子群算法也称鸟群觅食算法或粒子群优化算法,是一种基于群体智能的随机搜索优化算法,通过模拟鸟群觅食行为,利用个体历史最优和群体历史最优信息迭代更新粒子的位置与速度,从而搜索最优解.假设在一个M维的搜索空间中,第κ次迭代时的种群$S^{(\kappa)}=\{\xi_1^{(\kappa)},\xi_2^{(\kappa)},\cdots,\xi_{N_{SW}}^{(\kappa)}\}$,由$N_{SW}$个粒子组成,第$r$个粒子的位置$\xi_r^{(\kappa)}=[\xi_{r,1}^{(\kappa)},\xi_{r,2}^{(\kappa)},\cdots,\xi_{r,M}^{(\kappa)}]^T$表示一个$M$维向量,其物理含义是第$r$个粒子在$M$维搜索空间的位置,同时也是该优化问题的一个可行解.根据目标函数即可计算出每个粒子位置$\xi_r^{(\kappa)}$对应的适应度值.第r个粒子的速度为$\zeta_r^{(\kappa)}=[\zeta_{r,1}^{(\kappa)},\zeta_{r,2}^{(\kappa)},\cdots,\zeta_{r,M}^{(\kappa)}]^T$.粒子群算法中粒子的迭代公式为

$$\xi_r^{(\kappa+1)}=\xi_r^{(\kappa)}+\zeta_r^{(\kappa+1)} \tag{38}$$

$$\zeta_r^{(\kappa+1)}=\varpi\zeta_r^{(\kappa)}+\lambda_1\varepsilon_1(\rho_r^{(\kappa)}-\xi_r^{(\kappa)})+\lambda_2\varepsilon_2(\varphi^{(\kappa)}-\xi_r^{(\kappa)}) \tag{39}$$

式中:ϖ为惯性权重;λ_1、λ_2为加速常数,一般取2;ε_1、ε_2为[0,1]间的随机数;$\rho_r^{(\kappa)}$为第κ次迭代时第r个粒子的局部历史最优值;$\varphi^{(\kappa)}$为κ次迭代时粒子群的全局历史最优值;$\xi_r^{(\kappa)}$为第κ次迭代时第r个粒子的位置;$\zeta_r^{(\kappa+1)}$为第$\kappa+1$次迭代时第r个粒子的速度.

算法实现分为5个步骤.

步骤1:粒子群初始化.给定加速度因子$\lambda_1=\lambda_2=2$,惯性权重$\varpi=0.8$,ε_1、ε_2随机数均为1,初始化粒子$\boldsymbol{\xi}_1^{(0)}=\left[g_{1,l,\mathrm{m}},g_{2,l,\mathrm{m}},g_{3,l,\mathrm{m}},g_{4,l,\mathrm{m}}\right]^{\mathrm{T}}$,即主信号第1个周期每相位绿灯时长组成的向量组$g_{1,l,\mathrm{m}}$由主信号第1个信息周期内各相位的绿灯时长构成,用于初始化粒子1的绿灯响应数值.初始化粒子种群$N_{\mathrm{SW}}=30$,最大迭代次数$\kappa_{\max}=300$.根据式(6)~式(19)、式(29)~式(37)计算第r个粒子的初始速度$\zeta_r^{(0)}$为

$$\zeta_{r,\mu}^{(0)}=\left[\frac{\xi_{r,\mu}^{(0)}}{\sigma_\mu N_\mu^{\mathrm{lane}}}-\max\left(Q_{v,\mu}^{\mathrm{sat}}\right)\right]\sigma_\mu \tag{40}$$

式中:$\xi_{r,\mu}^{(0)}$指第r个粒子中第μ个相位的绿灯时长;σ_μ为第μ相位的饱和车头时距;N_μ^{lane}为第μ相位包含的车道数;$Q_{v,\mu}^{\mathrm{sat}}$为第μ相位中第v条车道能够形成饱和队列的车辆数.

步骤2:粒子适应度计算.计算每个粒子的适应度$E_r^{(\kappa)}$.本文的优化目标为车均延误,希望越小越好.而粒子群算法的适应度函数是越大越好,因此将目标函数的倒数作为适应度函数,其表达式为

$$E_r^{(\kappa)}=\frac{1}{d} \tag{41}$$

步骤3:极值更新.根据步骤2更新粒子群的群体极值$\varphi^{(\kappa)}$和个体极值$\rho_r^{(\kappa)}$.

步骤4:速度和位置更新.根据当前位置$\xi_r^{(\kappa)}$与最优解位置$\rho_{r\ i}^{(\kappa)}$的距离差距以及当前位置$\xi_r^{(\kappa)}$与群体极值$\varphi^{(\kappa)}$的距离差值.根据式(39)更新粒子速度$\zeta_r^{(\kappa+1)}$,最后根据式(38)更新粒子位置$\xi_r^{(\kappa+1)}$.

步骤5:终止标准.设置粒子群最大迭代次数为300次,判断是否满足结束条件.若不满足条件,则转为步骤2,并令迭代次数$\kappa=\kappa+1$;若满足条件,则输出结果.

3 仿真设计

3.1 基本条件

采用MATLAB数值仿真验证本文提出方法的成效.

1)背景交叉口.

仿真交叉口车道配置:1条左转车道、1条CAV专用车道、2条直行及直右车道.设仿真交叉口的通信范围为200 m,CAV渗透率25%,第二停车线距主停车线45 m,高峰时段单车道CAV排队车辆8~9辆.

2)仿真参数.

为便于结果对比,参考文献[13],本文中相关参数的取值见表1,低、中、高小时交通流量见表2.

表1 仿真参数取值

Tab. 1 Simulation parameter values in this study

参数名称	取值
仿真时长/s	3 600
CAV、CHV车长d_{cav}、d_{chv}/m	4.5
排队时CAV之间的安全距离/m	0.5
排队时CHV之间的安全距离d_{g}/m	1.0
CAV-CAV的饱和车头时距T_{cav}/s	1
CHV-CHV/CAV-CHV饱和车头时距T_q/s	2
黄灯时间/s	3
CAV启动损失时间τ_{cav}/s	1
CHV启动损失时间τ_{chv}/s	3
交叉口期望车速v_{cross}/(m/s)	12
最小绿灯时间$g_{\min}$/s	12
最大绿灯时间$g_{\max}$/s	40
绿灯间隔时间$I_{l,k,\mathrm{m}}$、$I_{l,k,\mathrm{p}}$/s	3
最小速度$v_{\min}$/(m/s)	7
最大速度$v_{\max}$/(m/s)	15
期望加速度a_{acc}/(m/s^2)	2

表2 小时交通流量

Tab. 2 Traffic volumes per hour veh/h

进口道	左转			直行		
	低流量	中流量	高流量	低流量	中流量	高流量
东	87	114	143	456	684	902
西	85	123	139	444	664	904
南	81	117	151	426	696	898
北	89	119	145	454	722	918

3.2 仿真设计

本文设计了2组仿真对比实验,共包含5种仿真方案.对比实验1(方案1~3)旨在评估本文所提方法的优化效果.在该实验中,方案1采用无轨迹优化与定时信号控制,方案2采用定时信号控制但对车辆轨迹进行优化,方案3为本文所提优化方法.3种方案的差异见表3.

表3 实验1中3种方案差异

Tab. 3 Differences among 3 schemes in test 1

方案	轨迹与信号联合优化	轨迹优化	定时信号控制
方案1	—	—	√
方案2	—	√	√
方案3	√	—	—

对比实验2旨在验证本文提出方法的控制性能,即探讨优化方法的竞争力.在该实验中,将本文方法同先到先服务(First In First Out,FIFO)[20]和文献[8]提出的相位连续型全排阵式交叉口(Phase Continuous Tandem Intersection,PCTI)信号控制方法进行对比.

4　结果分析

4.1　仿真结果分析

为验证本文优化方案的成效,以及本文优化方法在不同交通状态下的性能,低、中、高流量下得到的仿真结果见表4和图8.

表4　实验1在不同交通需求下的平均延误

Tab. 4　Average delay in Experiment 1 under different traffic-demand levels　　s

方案	低流量	中流量	高流量
方案1	25.43	32.43	36.49
方案2	23.97	28.48	34.28
方案3	24.15	26.30	30.67

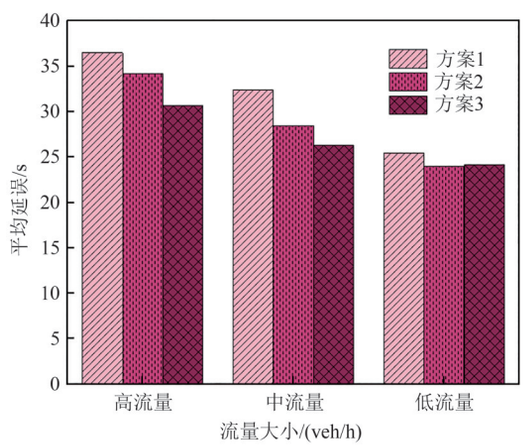


图8　延误对比

Fig. 8　Comparison of average delays

由表4及图8可知:①在低交通流量条件下,3种方案在车均延误方面差异不显著.其主要原因在于此时交叉口通行需求较低,多数车辆可在一个信号周期内通过,致使方案2和方案3中的优化策略难以发挥显著效果.②当交通流量处于中等水平时,3种方案在车均延误上的差异逐渐显现;随着交通流量的增加,交叉口排队车辆数上升,信号周期相应延长,优化策略的作用开始凸显.③在高流量条件下,方案3相较于方案1和方案2的车均延误分别降低18.97%和11.77%.这是因为方案3进行了车辆轨迹和交叉口信号配时的联合优化,使预信号红灯相位开启前,轨迹优化范围内的所有CAV加速驶入排队区,保证了在相同绿灯时间内更多车辆驶离交叉口,避免了频繁的启停,减少了停车延误.本文方法在一个信号周期内车辆的轨迹优化结果见图9.

由图9可知,尽管CHV早于CAV到达,但通过协调主、预信号的关系并对CAV进行轨迹和变道优化,后续到达的CAV能够排在CHV前,实现CAV与CHV分离调度,提升绿灯期间车道的饱和效率,进而提升交叉口的通行效率.

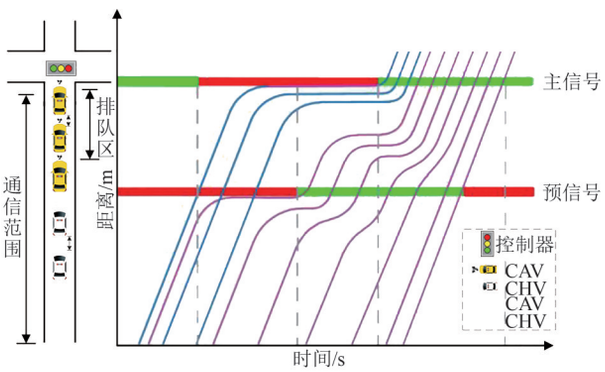


图9　一个信号周期内CAV与CHV的轨迹

Fig. 9　CAV and CHV trajectories within one signal cycle

4.2　优化方法性能验证

为验证本文所提方法的可行性,将仿真背景设定为路段长度200 m、CAV渗透率0.25.不同交通需求下本文方法与FIFO、PCTI的仿真结果对比见图10和表5.

由表5可知:①低流量下,本文方法相较FIFO延误增加了6.08%,与PCTI相比车均延误下降了1.24%,这是因为本文方法虽然通过信号与轨迹的联合优化提高了控制性能,但相较FIFO,本文方法需要在信号交叉口前增设第二停车线,导致了车辆更加频繁的停车和启动,增加了车辆在交叉口的滞留时间.②高流量下,与FIFO和PCTI相比,本文方法车均延误分别下降了28.27%、19.4%,这是因为本文方法引导CAV进入排队区,使得饱和车头时距较小的CAV能够形成队列,而饱和车头时距较大的CHV在CAV之后放行.这种编队方式确保在相同绿灯时间内,能够放行更多的车辆,从而降低了车均延误;而PCTI只对交通流向进行分类,允许直行和左转车辆交替进入排队区,但忽略了CAV高机动性和高可控性的优势.相较于FIFO,本文方法根据车辆类型进行分类,优化了车道利用,从而降低了车均延误.

为验证提出方法的运行风险,本文对不同速度与车距条件下PCTI与所提方法的变道风险进行对比分析,车辆在变道过程中的风险分布特征见图11.图11中:横轴为两车的欧氏距离;纵轴为目标车的速度;颜色表示风险程度.由图11可知:当车辆处于低速(1~4 m/s)且与相邻车辆距离不足3 m时,风险水平迅速升高,大量样本点落入图中红色区域,表明此时极易发生冲突;而所提方法在同样交通场景下车辆运行状态表现更为平稳,显著减少了在红色高风险区的分布,并更多集中于蓝色或绿色区域,说

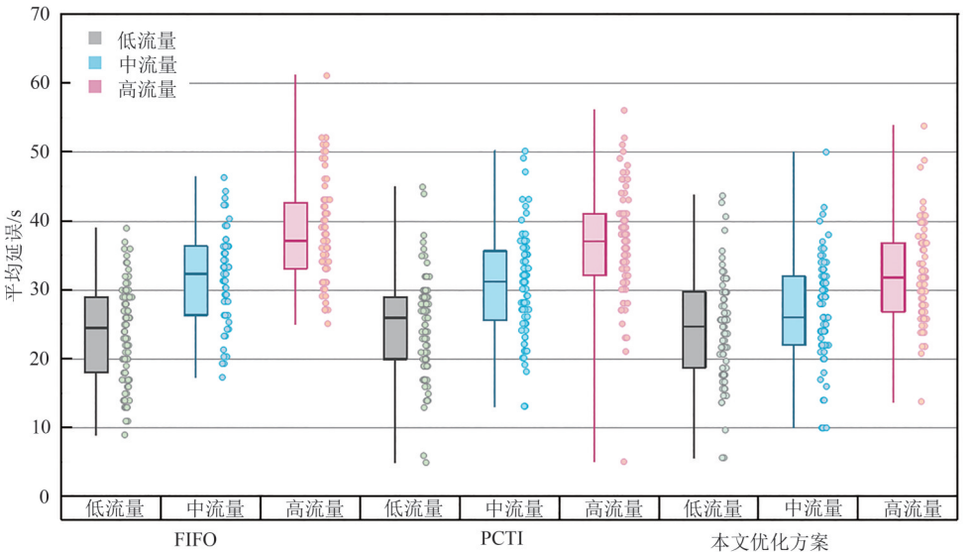


图 10　3 种方案控制效果对比

Fig. 10　Comparison of control performance among the three schemes

表 5　不同交通需求下 3 种方案的平均延误

Tab. 5　Average delays for the three schemes under different traffic-demand levels　　s

方案	低流量	中流量	高流量
FIFO	22.68	32.61	39.34
PCTI	24.45	30.56	36.62
本文方案	24.15	26.30	30.67

明优化方案通过合理调整变道时机与间距控制，有效降低了潜在的冲突风险.

同时，本文通过仿真模拟不同交通流量下 3 种方案的停车次数分布情况，以探讨交通量对停车次数的影响，不同交通流量下的 CHV 停车次数见图 12.

由图 12 可知：①在低流量下，本文优化方案的 CHV 停车次数最多，尤其是 2 次停车的车辆占比最高，这是因为部分 CHV 在预信号红灯时到达预停车线后排队，当预信号绿灯亮起时，前方的 CAV 车队还未消散，此时到达排队区的 CHV 车辆再次停车等待通行，从而造成了较大的停车延误.②在高流量下，0 次停车的车辆数较多，这是因为通过主预信号的协调，预信号绿灯期间到达的 CHV 可以不停车进入排队区，同时 CAV 车辆在交叉口停车线前也已经形成较稳定的车流队列，主信号绿灯开启时，CAV 车队带领 CHV 车队一起通过交叉口，从而减少了 CHV 的停车次数.

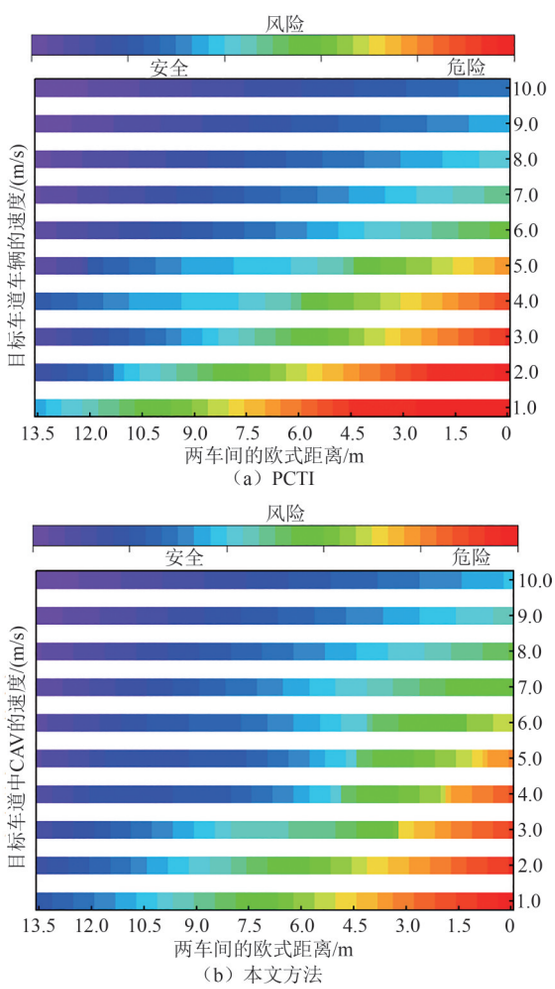


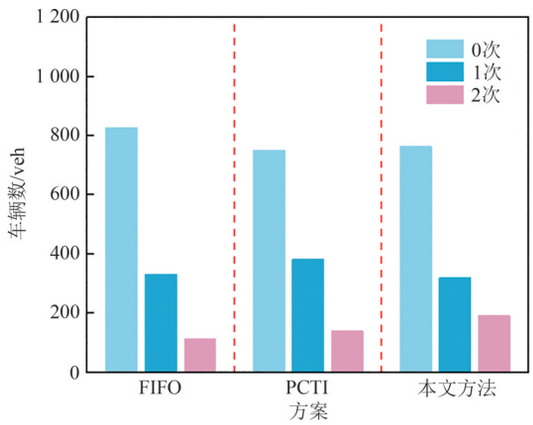
图 11　PCTI 与本文方法风险程度对比

Fig. 11　Comparison of risk levels for PCTI and the proposed method

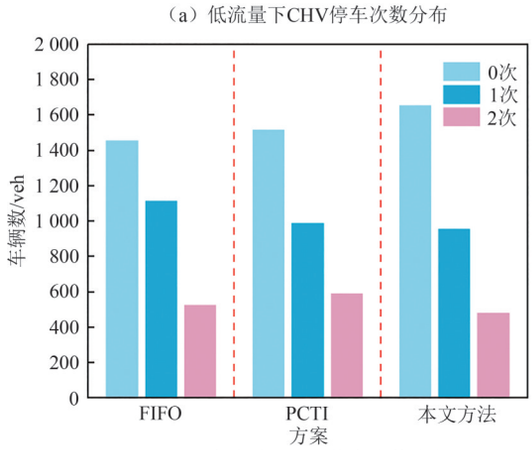
4.3　敏感性分析

4.3.1　CAV 渗透率对车均延误的影响

保持路段长度 200 m、排队区长度 45 m、中等交通量不变，CAV 渗透率从 0.05 增加到 0.3，仿真结果见图 13.



（a）低流量下CHV停车次数分布



（b）高流量下CHV停车次数分布

图 12　不同交通流量下的 CHV 停车次数

Fig. 12　Number of CHV stops under different traffic-demand levels

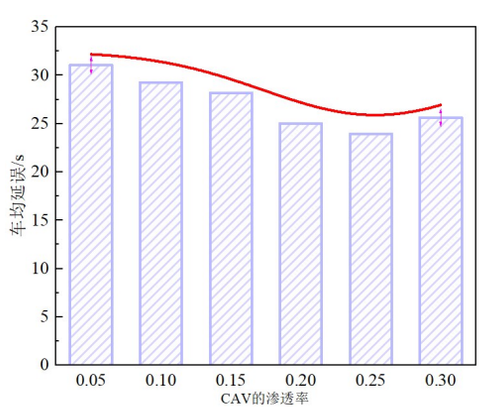


图 13　不同 CAV 渗透率对车均延误的影响

Fig. 13　Effect of CAV penetration on average vehicle delay

由图 13 可知:随着 CAV 渗透率的提升,车均延误呈现先下降后略有回升的趋势;在渗透率由 0.05 提升至 0.25 的过程中,车均延误逐渐下降,表明在中低渗透率阶段,CAV 的引入能够显著改善队列运行效率;然而,当渗透率进一步提升至 0.30 时,车均延误略有上升,出现“非单调”变化趋势,这源于中高渗透率下 CAV 与 CHV 之间在行为决策和车间协调机制上的差异,导致局部交通冲突的增加,进而对整体通行效率产生抑制效应.

4.3.2　排队区长度对车辆延误的影响

根据表 2 中直行与左转车道的交通流量数据,选择交通量最大的车道作为分析对象,以进行排队区长度的计算.依据式(24)~式(28),通过输入相应的交通流量参数,首先计算出排队区的初步长度.为进一步提高计算结果的精确度,并考虑实际应用中可能出现的变动,以 10 m 为单位对初步计算结果进行适当的增减调整,从而获得一组排队区长度的估算值.基于此估算值,进一步分析排队区长度与车均延误间的关系.在此过程中,保持路段长度 200 m、渗透率 0.25 以及中等交通量不变的前提下,将排队区长度从 20 m 逐步增加至 60 m,相关的仿真结果见图 14.

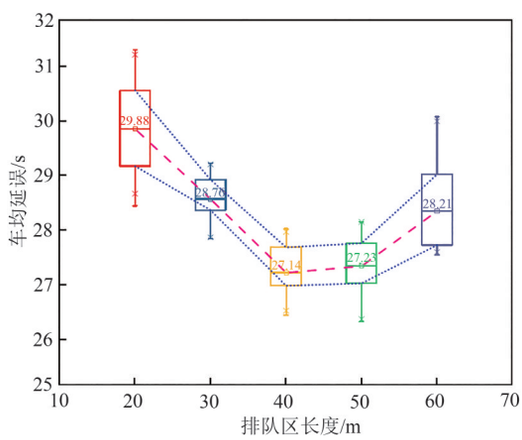


图 14　排队区长度对车均延误的影响

Fig. 14　Effect of queueing-area length on average vehicle delay

由图 14 可知:①车均延误随排队区长度的变化呈现出先下降后上升的趋势,这是因为当排队区长度较短时,排队区空间不足,无法容纳足够数量的车辆,导致 CAV 在进入专用车道时发生拥堵,部分 CAV 被迫在专用车道内等待,进而影响整体通行效率;当排队区长度达到 40 m 时,车均延误达到最低值;40 m 的排队区长度能够容纳并引导车辆进入 CAV 专用车道,优化了交通流的空间利用率;当排队区长度超过 40 m 时,过长的排队区会导致道路资源的浪费,此时延长排队区无法进一步提升通行效率,反而导致车辆在排队区内的行驶时间增加,从而降低空间资源的利用率.

4.3.3　CAV 间的通信延迟对车均延误的影响

保持路段长度 200 m、排队区长度 45 m、中等交通量不变,CAV 间的通信延迟从 0 ms 增加到 450 ms[21-22],CAV 间的通信延迟对车辆延误的影响见图 15.

由图 15 可知:随着 CAV 间通信延迟的增加,车辆平均延误呈现显著上升趋势;在低延迟区间(0~

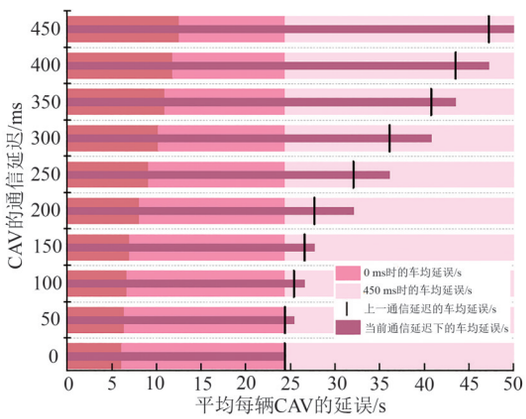


图 15 通信延迟对车均延误的影响

Fig. 15 Effect of communication delay on average vehicle delay

100 ms)，延误增幅较为缓和，表明CAV在该范围内仍具备较强的稳定性与协调性；然而，当延迟超过200～300 ms时，平均延误开始显著攀升，并在450 ms时达到峰值，显示通信滞后已对整体交通效率造成严重削弱．根源在于：一方面，通信延迟使得CAV获取的环境与协同信息存在滞后，从而导致控制响应精确性下降；另一方面，信息更新不足削弱了CAV车队间的协同控制效果，破坏了交通流的稳定性并放大其波动性．因此，CAV对通信延迟具有高度敏感性，低延迟条件有助于充分发挥其在交通效率与稳定性方面的优势，而高延迟则显著抑制甚至抵消了其潜在效益．

5 结论

1）以交叉口车均延误作为评价指标，建立基于预信号的交叉口人机混合驾驶车流分离控制模型，该模型通过设置CAV专用车道、预信号和排队区，协调CAV和CHV在交叉口进口车道的分离、变道及排队．

2）基于MATLAB对本文方法进行仿真验证的结果表明，在高流量下，与FIFO和PCTI相比，本文方法车均延误下降了28.27%、19.4%，验证了优化策略的有效性．

3）在敏感性分析方面，CAV渗透率与排队区长度对本文方法的控制成效影响显著．当CAV渗透率为0.25、排队区长度为40 m时，本文方法的车均延误最小．

本文所提方法在延误指标上取得了较好的效果，但在低流量下CHV停车次数有所增加，说明单一目标优化会带来能耗等其他性能的损失．未来研究可进一步引入多目标优化方法，综合考虑延误、能耗与舒适性等指标，并探索适应不同交通流条件的动态权重分配机制，以实现更为均衡和实用的优化效果．

参考文献(References)：

[1] 胡晓伟，宋浪，杨璐．全设置连续流交叉口信号配时及延误模型[J]．中国公路学报，2022，35(5)：189－201.
Hu Xiaowei，Song Lang，Yang Lu. Signal timing and delay model for full continuous flow intersections[J]. China Journal of Highway and Transport，2022，35(5)：189－201.(in Chinese)

[2] 李岩，史旋，南斯睿，等．设置排阵式预信号的干线交通信号协调控制优化[J]．交通运输工程学报，2024，24(2)：243－253.
Li Yan，Shi Xuan，Nan Sirui，et al. Optimization of arterial traffic signal coordinated control with tandem pre-signal[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2024，24(2)：243－253.(in Chinese)

[3] 赵靖，陈凯佳，周溪召．排阵式交叉口几何设计与信号控制协同鲁棒优化[J]．中国公路学报，2021，34(11)：296－305.
Zhao Jing，Chen Kaijia，Zhou Xizhao. Joint robust optimization of layout design and signal control for tandem intersections[J]. China Journal of Highway and Transport，2021，34(11)：296－305.(in Chinese)

[4] 安实，宋浪，王健，等．借用公交专用道左转的主预信号控制方案优化[J]．中国公路学报，2020，33(4)：115－125.
An Shi，Song Lang，Wang Jian，et al. Main and pre-signal control scheme optimization of turning left by using bus lanes[J]. China Journal of Highway and Transport，2020，33(4)：115－125.(in Chinese)

[5] 吴场建，任刚，曹奇，等．基于预信号的快速路出口匝道衔接交叉口控制优化方法[J]．中国公路学报，2023，36(10)：269－280.
Wu Changjian，Ren Gang，Cao Qi，et al. An optimal control method of intersection with an upstream freeway off-ramp using pre-signals[J]. China Journal of Highway and Transport，2023，36(10)：269－280.(in Chinese)

[6] Wu J M，Liu P，Qin X，et al. Developing an actuated signal control strategy to improve the operations of contra-flow left-turn lane design at signalized intersections[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2019，104：53－65.

[7] Zhao J，Yan J C，Wang J W. Analysis of alternative treatments for left turn bicycles at tandem intersections[J]. Transportation Research Part A：Policy and Practice，2019，126：314－328.

[8] 郑喆，袁见，安琨，等．排阵式交叉口车道功能-信号控制协同优化及效益分析[J]．中国公路学报，2023，

36(10): 238－250.
Zheng Zhe, Yuan Jian, An Kun, et al. Integrated optimization model of lane function and signal control for tandem intersections [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 238－250. (in Chinese)

[9] Rey D, Levin M W. Blue phase: Optimal network traffic control for legacy and autonomous vehicles[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 130: 105－129.

[10] 宗芳, 李宇暄, 贺正冰, 等. 基于混行跟驰仿真的CAV专用进口道动态设置方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 251－260.
Zong Fang, Li Yuxuan, He Zhengbing, et al. Dynamic layout design of connected and automated vehicle entrance lanes based on mixed-traffic car-following simulations [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(7): 251－260. (in Chinese)

[11] Jiang X C, Shang Q P. A dynamic CAV-dedicated lane allocation method with the joint optimization of signal timing parameters and smooth trajectory in a mixed traffic environment [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(6): 6436－6449.

[12] Ma W J, Li J J, Yu C H. Shared-phase-dedicated-lane based intersection control with mixed traffic of human-driven vehicles and connected and automated vehicles[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 135: 103509.

[13] 蒋贤才, 程国柱. 网联交通环境下交叉口进口车道动态配置方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(5): 55－66.
Jiang Xiancai, Cheng Guozhu. Dynamic configuration method for approach lanes at intersections in connected traffic environment [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(5): 55－66. (in Chinese)

[14] Dai R J, Ding C, Wu X K, et al. Coupling control of traffic signal and entry lane at isolated intersections under the mixed-autonomy traffic environment [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(10): 10628－10642.

[15] 郝威, 张兆磊, 吕能超, 等. 考虑自动驾驶专用车道的混合交通分配模型[J]. 中国公路学报, 2023, 36(10): 317－327.
Hao Wei, Zhang Zhaolei, Lyu Nengchao, et al. Mixed traffic assignment model based on autonomous driving lanes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 317－327. (in Chinese)

[16] Xu L, Jin S, Li B L, et al. Traffic signal coordination control for arterials with dedicated CAV lanes[J]. Journal of Intelligent and Connected Vehicles, 2022, 5(2): 72－87.

[17] 李同飞, 赵梦晴, 熊杰, 等. 面向网联自动驾驶混行场景的车道通行能力与路阻函数研究[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(6): 146－156.
Li Tongfei, Zhao Mengqing, Xiong Jie, et al. Lane capacity and cost function for the mixed traffic scenario with connected and autonomous vehicles [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(6): 146－156. (in Chinese)

[18] Panwai S, Dia H. Comparative evaluation of microscopic car-following behavior [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2005, 6(3): 314－325.

[19] Chen L, Qin D F, Xiu X, et al. A path and velocity planning method for lane changing collision avoidance of intelligent vehicle based on cubic 3-D Bezier curve [J]. Advances in Engineering Software, 2019, 132: 65－73.

[20] Yu C H, Sun W L, Liu H X, et al. Managing connected and automated vehicles at isolated intersections: From reservation-to optimization-based methods [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 122: 416－435.

[21] 王江锋, 齐崇楷, 罗冬宇, 等. 通信时延下考虑行驶状态时空价值的编队安全控制[J]. 中国公路学报, 2025, 38(3): 13－30.
Wang Jiangfeng, Qi Chongkai, Luo Dongyu, et al. Safety platoon control considering spatiotemporal value of traveling state under communication delays[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(3): 13－30. (in Chinese)

[22] 王静, 雷利利, 熊晓夏, 等. 考虑通信延迟的智能车队纵向控制[J]. 交通运输工程与信息学报, 2024, 22(4): 37－51.
Wang Jing, Lei Lili, Xiong Xiaoxia, et al.Longitudinal control of intelligent fleet considering communication delay[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2024, 22(4): 37－51. (in Chinese)