

刘庆玲, 胥效文. 快速路行人穿越意图随机场景下车辆主动安全速度控制策略优化[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(6): 135-144.
LIU Qing-ling, XU Xiao-wen. Speed optimization for active-safety system of intelligent connected vehicles on expressways with crossing pedestrians[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(6): 135-144.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.06.013

快速路行人穿越意图随机场景下车辆 主动安全速度控制策略优化

刘庆玲, 胥效文

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对城市快速路路侧存在驻足伺机穿越的行人且其穿越意图随机的交通场景, 构建安全空间边界与车辆行驶速度联合优化模型及其近似模型, 通过优化求解实时获取车辆主动安全速度控制策略, 实现对车辆驾驶行为的引导。首先, 通过在驻足伺机穿越行人的上游设置安全空间, 提出基于安全空间的车辆主动安全控制机制以及安全空间上边界的确定方法; 其次, 基于最优控制理论构建安全空间边界与车辆行驶速度联合优化模型; 构建基于预定义函数的联合优化近似模型; 最后, 通过优化求解得到安全空间的上边界和车辆的速度控制策略, 并在 MATLAB 和 VISSIM 仿真平台上对基于安全空间的车辆主动安全控制机制和获取的车辆速度控制策略进行仿真验证。研究结果表明: 基于安全空间的车辆主动安全控制机制能够使上游快速行驶的车辆提前开始减速, 行驶到安全空间的上边界处进行二次观测后获取后续路段的驾驶行为决策, 该机制能够保证车辆与驻足伺机穿越行人的安全; 该场景下的车辆速度控制策略不但能够使上游快速行驶的车辆提前进行减速, 避免与伺机穿越的行人发生碰撞事故, 引导车辆以更加平滑的速度曲线从开始预警点行驶到行人的驻足观测点并安全地穿越, 而且还能够明显改善燃油经济性和不影响路段的通行效率。

关键词: 交通工程; 智能网联汽车; 速度策略优化; 快速路; 行人穿越意图

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1671-8879(2024)06-0135-10

Speed optimization for active-safety system of intelligent connected vehicles on expressways with crossing pedestrians

LIU Qing-ling, XU Xiao-wen

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

Abstract: Aim at the traffic scene that the crossing intention of wait-to-cross pedestrians at the roadside of urban expressways is random, a joint optimization model considering of the boundary of the safe space and the speed of vehicles as well as its approximate optimization model were proposed, and the vehicle's speed control strategy was obtained by optimization to guide vehicle's driving behaviors. First, an active control mechanism based on the safe space and how to define

收稿日期: 2024-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(11772264)

作者简介: 刘庆玲(1980-), 女, 山东临沂人, 讲师, 工学博士研究生, E-mail: qinglingliu_2017@126.com。

the boundary of the safe space were proposed, by setting up the safe space at the upstream of the pedestrians. Then, a joint optimization model considering of the boundary of the safe space and the speed of vehicles was proposed based on the optimal control theory. And then, the approximate optimization model was put forward. Finally, the boundary of the safe space and the vehicle's speed control strategy were obtained by optimization and further tested by MATLAB and VISSIM. The results show that the active control mechanism based on the safe space can make the upstream high-speed vehicles decelerate in advance and take a second look to take action, which can ensure the safety of the vehicle and the wait-to-cross pedestrians, and that the speed control strategy of the above mentioned traffic scene can not only make the vehicles decelerate in advance to avoid collision, with the wait-to-cross pedestrians and guide the vehicle to take a smoother speed curve from the start of warning point to the observation point of the pedestrians, but also save fuel consumption and not reduce the traffic efficiency. 2 tabs, 8 figs, 25 refs.

Key words: traffic engineering; intelligent connected vehicle; speed strategy optimization; expressway; crossing intention of pedestrian

0 引 言

随着城市路网规模的扩大,全球很多大城市均采用修建快速路的方法来均衡交通流量,通过主动脉带动整个城市路网的流通性。快速路里程在城市道路网络中占比不高,但交通负荷大且行车速度快^[1-3]。

快速路属于半封闭或不封闭的道路,随着城市布局规模的扩大,道路两侧均有大量的城市居民生活或工作,沿线两侧居民为了抄近道会冒着风险横穿快速路。行人横穿城市快速路的案例在中国居高不下;车与人的正面碰撞事故中,当车辆的行驶速度从 50 km/h 增加到 65 km/h 时,行人的死亡风险增加 4.5 倍。因此,快速路交通场景下车辆与行人冲突所带来的碰撞风险尤为严重^[4-6]。借助 V2X 技术的车辆主动安全控制技术能够有效减少快速路交通事故发生次数、减轻事故严重程度,并一定程度改善燃油经济性及驾乘舒适性^[7-15]。车辆与行人冲突主动安全控制涉及到行人运动轨迹检测与预测、车辆与行人冲突识别与评估以及车辆运动速度控制策略 3 个方面,目前该领域已经引起了国内外专家和学者的高度关注,并取得了一系列的研究成果。

在行人运动轨迹检测方面:Ben 等基于 V2X 技术集成路侧摄像头和车载摄像头的的数据,协同检测行人的运动轨迹,最终实现更远距离的车与人行防撞预警,该方法能够克服传统行人检测方法存在易受距离过远、有遮挡等限制的缺点^[16];

Vishnu 等设计了一种基于车路协同的车与人主动防撞系统,该系统通过路侧端的视频处理确定是否存在车辆与行人冲突,借助 V2I 技术将危险信息发布给上游车辆,使驾驶人能够及时、有效应对紧急情况^[17];Borges 等通过路侧摄像头视频对行人进行检测并估计行人的位置,通过车载定位系统数据分析车辆的状态信息,采用路径预测算法估算车辆与行人的碰撞风险并进行安全预警,收到预警消息的上游车辆根据碰撞风险等级来采取相应制动减速措施^[18];Becker 等提出了一种集成分布式摄像头视频监控和 V2I 通信技术的车辆-行人主动防撞系统,该系统采用分布式摄像头并通过多源传感器信息融合技术实时估计车辆和行人的位置和路径信息,通过 V2I 技术进行危险预警信息的发送,并判断碰撞风险等级来实现安全预警^[19]。

在车辆与行人冲突识别与评估方面:Eizati 等提出了一个冲突风险评估模型用以评估行人与其他道路使用者之间的安全水平,替代安全指标测度冲突过程中道路使用者的时空接近性,研究结果表明,该模型有望被用于实时冲突风险评估、改善交通安全^[20];马艳丽等结合车辆-行人的相对位置、速度、加速度、车辆尺寸等信息,构建了过街行人与车辆冲突识别模型,确定了基于人与车间距的交通环境能见度测量方法,给出了车辆速度与能见度之间的关系模型,该模型能够对行人与车辆冲突进行有效识别,冲突识别准确率为 82.4%^[21]。

在车辆运动速度控制策略方面:Tran 等提出了一个基于场景的随机模型预测控制框架,该框架基于交互式多模型卡尔曼滤波并考虑多个行人轨迹及各自的概率,研究结果表明,与确定性单一场景的 MPC 相比,所提出控制器对共享道路驾驶具有非常自然的控制行为^[22];Gelbal 等提出了基于 V2X 技术的车辆与行人防碰撞预警和避碰系统,该系统中的车辆在收到预警信息后除了采取有效制动措施外,还可实时修改车辆运动轨迹来绕过行人,实现对行人的主动防碰撞功能^[23]。

实际快速路交通中因车辆的行驶速度相对较快,欲横穿快速路的行人则会驻足路侧伺机穿越,对于驻足路侧伺机横穿快速路的行人来讲,其穿越意图随机且难以通过传感器进行捕捉,这给上游快速行驶的智能网联车辆的运动速度控制策略优化带来了挑战:一方面,行人穿越意图的随机性使得前端传感器捕捉不到行人穿越起始时刻,进而行人的轨迹预测算法也难以奏效;另一方面,上游快速行驶车辆无法获取准确的行人信息,其行驶过程具有盲目性,其运动速度规划模型也无法正常工作。这些都给行人穿越意图随机下的车辆主动安全控制技术带来了挑战,也增加了车辆与行人碰撞事故的发生概率。

1 基于安全空间的车辆主动安全控制机制

为解决上述关键问题,本文首先提出基于安全空间的车辆主动安全控制机制,并设计出该机制的物理空间架构;然后通过分析该机制下车辆的运动特性,提出一种确定安全空间边界的方法。

1.1 控制机制的物理空间架构

驻足路侧伺机穿越行人的意图随机,难以用传感器进行捕捉,且无法通过行人运动预测模型提前获取行人的运动轨迹。在此情况下,上游快速行驶的车辆无法提前规划运动速度,易造成车辆与行人之间的冲突甚至发生碰撞交通事故。

因此,为了确保快速路交通中行人与车辆的安全,需要在路侧驻足行人的上游设计一个安全空间用以避免上游快速行驶车辆与伺机穿越行人发生碰撞交通事故。在该安全空间内,上游车辆可以先减速行驶到安全空间的上边界,其速度也减小到某值,此时进行二次观测、判断路侧驻足伺机穿越行人是否已经开始穿越并进行车辆运动速度决策:减速停止在行人上游的安全空间的下边界以避免冲突或者匀速运动直到伺机穿越行人所在位置,其物理空间架构示意如图 1 所示。

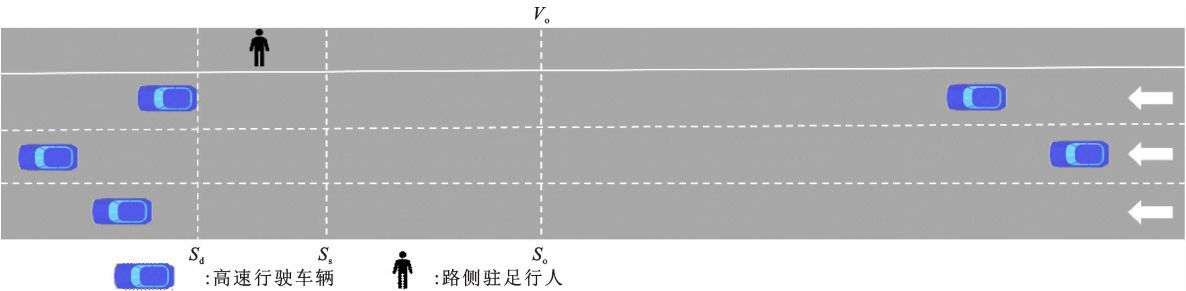


图 1 控制机制的物理空间架构示意

Fig. 1 Schematic of physical spatial architecture for control mechanism

从图 1 可以发现,共有 3 条直线与车辆行驶方向垂直相交,按照从左往右的顺序依次是:驻足路侧伺机穿越行人上游的车辆越过行人后重新加速行驶的起点,也是上游的车辆减速后保持匀速行驶的结束点 S_d 、驻足路侧伺机穿越行人上游的车辆减速行驶并安全地停车的停车点 S_s (安全空间的下边界),以及上游的车辆确认路侧驻足伺机穿越的行人是否突然穿越的二次观测点 S_0 (安全空间的上边界)。

点 S_d 通过驻足路侧伺机穿越行人的位置向下

游平移 1 个车头间距确定;点 S_s 通过驻足路侧伺机穿越行人的位置向上游平移 1 个车头间距确定;点 S_0 和交通效率、燃油经济性以及安全性等多个交通指标密切相关。在保证交通安全的前提下,兼顾其他指标来确定点 S_0 的位置至关重要。

1.2 安全空间边界的确定方法

上游车辆通过 V2X 系统的前端传感器能够提前发现下游路侧有驻足伺机穿越行人,于是开始减速行驶直到点 S_0 ,此时车辆速度降为 V_0 。在点 S_0 处,车辆需要进一步确认路侧驻足伺机穿越行人是

否已经开始穿越快速路。

根据上游快速行驶的车辆行驶到点 S_0 时路侧驻足伺机穿越行人的当前状态进行判断分析,车辆后续的运动状态可以分为 2 种情况:①如果驻足路侧伺机穿越的行人已经开始穿越,则上游车辆减速行驶到点 S_0 时,继续减速行驶到点 S_s 停车,以避免车辆与行人发生碰撞交通事故;②如果驻足路侧伺机穿越的行人依然驻足伺机穿越,则上游的车辆减速行驶到点 S_0 ,开始以匀速 V_0 行驶到点 S_d 后进一步加速行驶驶离。

如上所述,点 S_0 的位置与多个指标密切相关。一方面,点 S_s 与点 S_0 间的距离越长,则 V_0 越大;反之,则 V_0 越小。 V_0 越大,驻足路侧伺机穿越的行人则越不敢冒然穿越,且路段的交通效率越高; V_0 越小,则越容易引发路侧驻足伺机穿越的行人突然穿越,造成车辆与行人之间发生冲突甚至是碰撞交通事故,且路段的交通效率越低。由此可见, V_0 存在最大值和最小值(V_{0min} 、 V_{0max}),与车辆最大减速度以及驻足路侧伺机穿越的行人的可穿越边界速度 V_c 密切相关。当车辆速度大于 V_c 时,行人不敢穿越则车辆倾向高速穿过;当车辆速度小于 V_c 时,行人则倾向穿越而车辆则倾向减速让行。另一方面,驻足路侧伺机穿越行人看到上游较远处有车辆快速驶来的时候,会开始判断是否有足够穿越时间来穿越快速路。当上游的车辆从初始位置按照初始速度 v_0 行驶过来与正在穿越中的行人发生冲突时,此时得到点 S_0 的最大位置 S_{0max} ;当上游的车辆按照速度 V_0 行驶过来与正在穿越中的行人发生冲突时,此时得到点 S_0 的最小位置 S_{0min} 。与此同时,燃油经济性指标值也会随着点 S_0 位置的变化而变化。由此可见,点 S_0 位于 S_{0min} 和 S_{0max} ,而且与上游的车辆的行驶速度曲线密切相关。

因此,需要在保证交通安全的前提下兼顾多个指标,通过与车辆行驶速度曲线进行联合优化来获取安全空间的上边界。

1.3 机制的实现手段

提出的基于安全空间的车辆主动安全控制机制需要通过摄像头等前端的传感器来采集行人的相关信息,然后通过车联网的路侧端发送给车载端,车载端传输给车载电脑进行决策,然后通过车载主动安全系统来避免车辆与路侧伺机穿越行人的碰撞事故。

2 安全空间边界与车辆速度联合优化模型

2.1 目标函数

第 1 个子目标是控制第 n 辆车以尽可能低的油耗从开始预警点行驶到点 S_0 ,这一过程包括动态决策区内和从控制线位置到点 S_0 的总燃油消耗量,其成本函数 J_1 定义为

$$\min J_1 = \int_{t_n^0}^{t_n^c} C_n(t) dt + \int_{t_n^c}^{t_n^f} C_n(t) dt \quad (1)$$

式中: t_n^0 为第 n 辆车到达开始预警点的时刻; t_n^c 为第 n 辆车到达控制线的时刻; $C_n(t)$ 为第 n 辆车在 t 时的瞬时燃油消耗量; t_n^f 为第 n 辆车到达二次观测位置的时刻。

采用 VT-CPFM 燃油消耗计算模型^[24]来构建第 1 个子目标的成本函数。

第 2 个子目标是控制第 n 辆车尽可能快地通过开始预警点行驶到点 S_s ,其成本函数 J_2 定义为

$$\min J_2 = L_n / \hat{v}_n(t) \quad (2)$$

式中: L_n 为第 n 辆车自开始预警点到点 S_0 位移; $\hat{v}_n(t)$ 为第 n 辆车自开始预警点到点 S_0 在 t 时的平均速度。

综上所述,安全空间边界与速度联合优化模型的目标函数包括 2 个子目标函数 J_1 、 J_2 ,可归纳为

$$\min J = \lambda_1 \left[\int_{t_n^0}^{t_n^c} C_n(t) dt + \int_{t_n^c}^{t_n^f} C_n(t) dt \right] + \lambda_2 L_n / \hat{v}_n(t) \quad (3)$$

式中: λ_1 、 λ_2 均为模型系数。

2.2 约束条件

第 1 个约束条件是车辆行驶过程中的安全性约束,即

$$\begin{cases} 0 \leq x_n(t_n^f) \leq S_0 \\ 0 \leq v_n(t_n^f) \leq V_0 \\ a_n(t_n^f) \leq a_0 \end{cases} \quad (4)$$

第 2 个约束条件是车辆行驶过程中的时间约束,即

$$\begin{cases} 0 \leq t_n^0 \\ t_n^0 < t_n^c < t_n^f \end{cases} \quad (5)$$

第 3 个约束条件是车辆行驶过程中的速度约束,即

$$V_0 \leq v_n(t) \leq v_{max} \quad (6)$$

第4个约束条件是车辆行驶过程中的加速度约束,即

$$a_{\min} \leq a_n(t) \leq 0 \quad (7)$$

第5个约束条件是点 S_o 位置的约束,即

$$V_o T \leq S_o \leq v_o T \quad (8)$$

第6个约束条件是 V_o 的约束,即

$$V_c \leq V_o \leq v_0 \quad (9)$$

第7个约束条件是 V_c 的约束,即

$$V_{\min} \leq V_c \quad (10)$$

第8个约束条件是行人避碰安全约束,即

$$\frac{v_o^2}{2a_{\min}} \leq |(S_o - S_s)| \quad (11)$$

第9个约束条件是位移约束,即

$$L_n = v_o(t_n^c - t_n^0) + \int_{t_n^c}^{t_n^f} v_n(t) dt \quad (12)$$

第10个约束条件是车辆间的安全距离约束,即

$$x_n(t) - x_{n-1}(t) - l_{n-1} \geq \alpha v_n(t) + \beta \quad (13)$$

式中: $x_n(t)$ 为车辆 n 在 t 时的位移; $v_n(t)$ 为车辆 n 在 t 时的速度; $a_n(t)$ 为车辆 n 在 t 时的加速度; a_o 为车辆在二次观测位置的期望加速度,是一个速度规划周期的车辆末态加速度,因为上游快速行驶的车辆达到点 S_o 时,需要匀速行驶并二次观测路侧驻足伺机穿越的行人的状态,来进一步决策下一阶段的运动过程,所以 $a_o = 0 \text{ m/s}^2$; v_{\max} 为路段的最大限速; α_{\min} 为车辆的最大减速度; T 为驻足路侧伺机穿越的行人的穿越时间; l_{n-1} 为第 $n-1$ 辆车的长度; α 为两车的动态间距系数; β 为最小停车间距。

3 联合优化近似模型

对基于最优控制原理构建的安全空间边界与车辆速度联合优化模型进行分解的过程中,目标函数形式并未发生变化,只是对运动过程进行近似。因此,目标函数同式(3)。

3.1 近似运动过程

上游快速行驶车辆的运动过程描述如下:车辆在到达控制线之前均以恒定速度 v_o 在决策区内行驶,并通过求解联合优化模型得到最优速度曲线,当车辆到达控制线时,开始跟踪最优速度曲线并通过当前路段到达点 S_o 后,此时进行二次观测并进行进一步运动决策,然后安全地行驶停止到点 S_s 或者以速度 V_o 穿越点 S_s 与点 S_d 间的路段。

在实际预警过程中,当驾驶人在二次观测点

发现驻足路侧伺机穿越行人开始穿越快速路时,则会采取紧急制动停车来避免碰撞交通事故的发生,制动过程中的燃油消耗量为0;当驾驶人在二次观测点发现驻足路侧伺机穿越行人尚未穿越快速公路时,则会以速度 V_o 穿越点 S_s 与点 S_d 间的路段,此时车辆在单位时间内的燃油消耗量为固定值。

和安全空间边界与车辆速度联合优化模型对应的车辆运动过程包含2个阶段:匀速巡航运动和减速运动,故构造一个两阶段的预定义函数来逼近原来的最优控制问题,具体如下:

第 n 辆车的速度曲线定义为

$$v_n(t) = \begin{cases} v_o & t_n^0 \leq t \leq t_n^c \\ (v_o - V_o) \tanh[-\mu(t - t_n^c) + 8] + V_o & t_n^c < t < t_n^f \end{cases} \quad (14)$$

第 n 辆车的加速度曲线定义为

$$a_n(t) = \begin{cases} 0 & t_n^0 \leq t \leq t_n^c \\ -\mu(v_o - V_o) \{1 - \tanh[-\mu(t - t_n^c) + 8]\} & t_n^c < t < t_n^f \end{cases} \quad (15)$$

第 n 辆车的位移曲线定义为

$$x_n(t) = \begin{cases} v_o(t_n^c - t_n^0) & t_n^0 \leq t \leq t_n^c \\ -[(v_o - V_o)/\mu] \ln \{ \cosh[-\mu \cdot (t - t_n^c) + 8] \} + V_o(t_n^f - t_n^c) & t_n^c < t < t_n^f \end{cases} \quad (16)$$

3.2 近似约束条件

根据上述定义的近似运动过程,将近似约束条件归纳为

$$\begin{cases} x_n(t_n^f) \leq S_o \\ x_n(t_n^f) \leq V_o \\ a_n(t_n^f) \leq a_o \\ 0 \leq t_n^0 \\ t_n^0 < t_n^c < t_n^f \\ V_o \leq v_n(t) \leq v_{\max}(t) \\ a_{\min} \leq a_n(t) \leq 0 \\ V_o T \leq S_o \leq v_o T \\ V_c \leq V_o \leq v_o \\ V_{\min} < V_c \\ V_o^2 / 2a_{\min} \leq |(S_o - S_s)| \\ L_n = v_o(t_n^c - t_n^0) - [(v_o - V_o)/\mu] \cdot \ln [\cosh(-\mu(t - t_n^c) + 8)] + V_o(t_n^f - t_n^c) \\ x_n(t) - x_{n-1}(t) - l_{n-1} \geq \alpha v_n(t) + \beta \end{cases} \quad (17)$$

4 速度控制策略验证

4.1 仿真参数设置与模型求解

选取陕西省西安市西三环主路鱼化桥至丈八立交间的路段为例,对上述获取的速度控制策略进行仿真验证。该路段沿线两侧分布多个居民区,极易出现行人横穿快速路的情况;该路段为双向八车道,车辆行驶速度较高,而且从漳浒桥以南开始出现道路弯曲会影响视距,一旦有违规行人

进入,极易产生冲突和发生交通事故。因此,该路段适合用于进行车联网环境下行人驻足路侧伺机穿越场景车辆主动安全速度控制策略的仿真验证。

仿真起点为陕西省西安市雁塔区科技西路处的红色标记点,即控制线的位置,亦为高速交通流的起始位置;行人的位置为陕西省西安市雁塔区西三环辅路处的绿色标记点,两者之间的相对距离为1.965 km,具体如图 2 所示。



图 2 仿真地点
Fig. 2 Simulation site

采用 MATLAB 遗传算法工具箱求解构造的预定义函数模型,得到智能车辆的期望速度曲线。为了简便,本文假设所有车辆都为 2011 款本田雅阁,生态驾驶模型的参数设置和燃油消耗模型的参数设置分别参照文献[11]、文献[24]。将 VISSIM 系统中的速度控制策略记为方案 A,优化获取的速度控制策略记为方案 B;智能网联汽车行驶过程中,路侧伺机穿越的行人突然穿越的场景记为场景 I,智能网联汽车行驶过程中,路侧伺机穿越的行人尚未穿越的场景记为场景 II。

4.2 运动速度特性分析

选取上游快速行驶交通流中的第 1 辆车为例,分别采用方案 A 和方案 B 来控制车辆行驶在场景 I 和场景 II 中,得到车辆的速度曲线分别如图 3 和图 4 所示。

从图 3 可以发现:在方案 A 控制下的车辆快速行驶直到突然发现下游有正在横穿快速路的行人,然后突然采取急减速的措施直至停车等行人穿越结束后继续启动加速行驶;在方案 B 控制下的车辆因为能够提前感知到路侧存在伺机穿越的行人,在基

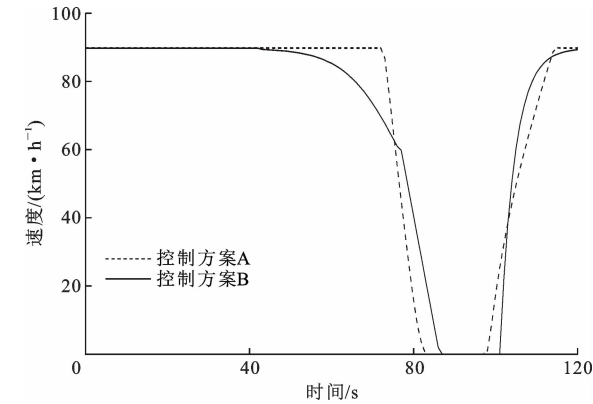


图 3 场景 I 中不同控制方案下的车辆速度曲线
Fig. 3 Vehicle speed curves from different control strategies in scene I

于安全空间的车辆主动安全控制机制和车辆运动速度优化模型的作用下提前减速到 60 km/h,并在此处进行二次观测到正在穿越快速路的行人,紧接着进行减速直至在行人穿越点前安全地停车等行人穿越结束后继续启动加速行驶。

从图 4 可以发现:在方案 A 控制下的车辆保持快速行驶直到突然发现下游路侧存在伺机穿越的行

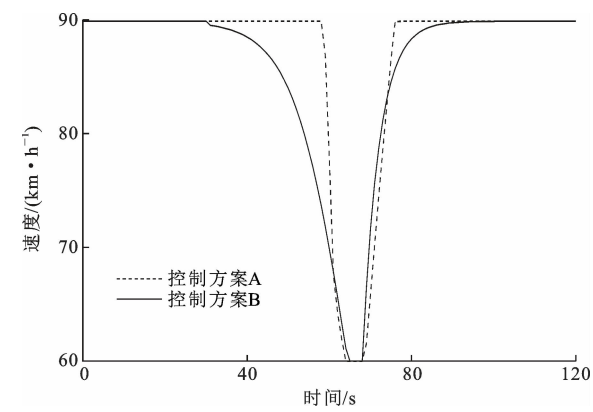


图 4 场景 II 中不同控制方案下的车辆速度曲线
Fig. 4 Vehicle speed curves from different control strategies in scene II

人,然后突然采取减速行驶的措施并从行人的伫立点旁边安全地穿越;在方案 B 控制下的车辆因为能够提前感知到路侧存在伺机穿越快速路的行人,进行二次观测到驻足路侧伺机穿越的行人并未穿越快速路,于是继续保持匀速行驶直至从行人的伫立点旁边安全穿越。

不难发现,基于安全空间的车辆主动安全控制机制和车辆运动速度优化模型在场景 I 和场景 II 中起到了相同作用,也就是说,不管路侧伺机穿越快速路行人在车辆行驶的过程中是否突然开始穿越,所获取速度控制策略都可以使上游快速行驶的车辆提前减速到一定速度,并进行二次观测和进一步的驾驶行为决策,能够平滑车辆的运动速度曲线,避免交通事故。

4.3 安全性能分析

选取场景 I 中的交通流进行安全性能测试,以上游快速交通流中的第 1 辆车为例,得到不同控制方案下的车辆运动曲线,如图 5 和图 6 所示。

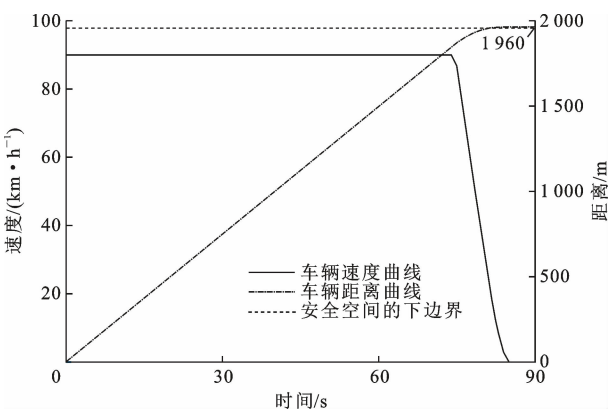


图 5 方案 A 控制下的车辆运动曲线
Fig. 5 Vehicle motion curves from strategy A

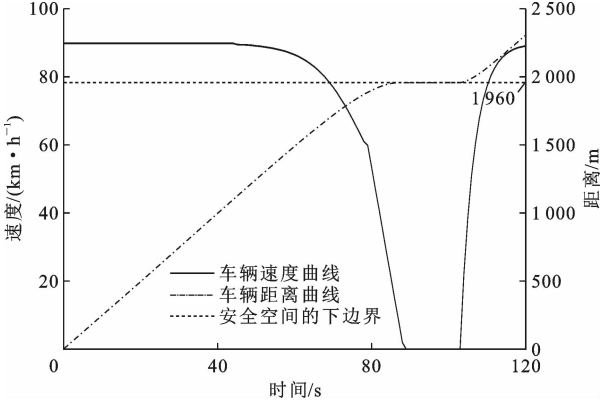


图 6 方案 B 控制下的车辆运动曲线
Fig. 6 Vehicle motion curves from strategy B

从图 5 可以发现,在方案 A 控制下的交通流中,车头队车在 82~83 s 时间段内,其位置与穿越快速路行人的位置有交点且前者的值快速大于后者的,而其运动速度为 8.170~15.886 km/h,这说明车辆到达行人穿越位置时的速度仍大于 0,会与正在穿越快速路的行人发生碰撞交通事故。

从图 6 可以发现,在方案 B 控制下的交通流中,车头队车在 79 s 时将车速减至 60 km/h,然后在 89 s 时将车速减为 0,此时车辆的位置为 1 960 m,与行人的穿越位置之间的距离为 5 m,这说明所获取速度控制策略能够使上游快速行驶的车辆提前减速,并避免车辆与穿越意图随机且在车辆行驶过程中突然开始穿越快速路的行人之间发生碰撞交通事故。

进一步地,分析场景 I 和场景 II 中车流的速度离散性,来揭示所获取速度控制策略对上游交通运行安全性的影响,以速度标准差来表征车流速度的离散性,得到方案 A 和方案 B 控制下上游交通流中的前 10 辆车(第 1 辆车编号为 0)的实时速度的标准差曲线,如图 7 和图 8 所示。

从图 7 和图 8 可以发现:在方案 A 控制下,上游交通流实时速度标准差呈先减小后增加,总体上基本平稳的规律;在方案 B 控制下,上游交通流实时速度标准差呈递减的规律;总体而言,不管是在场景 I 中还是在场景 II 中,方案 A 控制下的上游交通流的实时速度标准差始终要大于方案 B 控制下的,这说明所获取速度控制策略能够减小车辆行驶速度的波动幅度,在对快速交通流有致稳作用的同时,还能够明显提升驻足路侧伺机穿越且穿越意图随机交通场景下,快速路上游交通流的安全性^[25]。

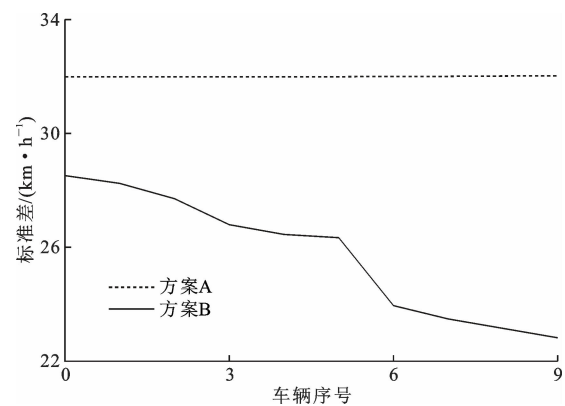


图 7 场景 I 中不同方案控制下的车流车速离散性曲线
Fig. 7 Velocity dispersion curves from different control strategies in scene I

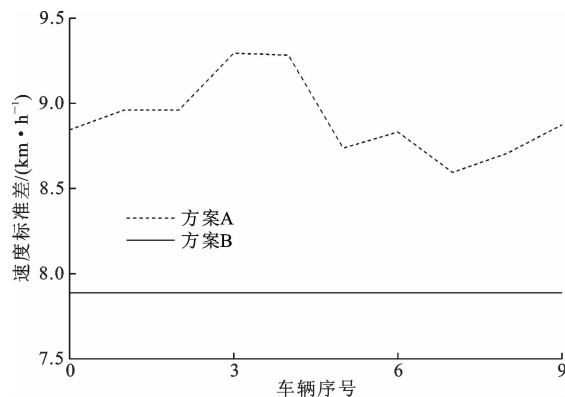


图 8 场景 II 中不同方案控制下的车流车速离散性曲线
Fig. 8 Velocity dispersion curves from different control strategies in scene II

4.4 燃油经济性分析

进一步测试所获取的速度控制策略对交通流系统燃油经济性的影响,采用 VT-CPFM 燃油消耗模型估算场景 I 和场景 II 中,不同控制方案下的上游快速行驶交通流中前 10 辆车的总燃油消耗量,如表 1 所示。

表 1 不同交通场景和方案控制下车辆的总燃油消耗量
Tab. 1 Total fuel consumption from different control strategies in different scenes

场景	总燃油消耗量/ml		燃油减少量/ml	减少百分比/%
	方案 A	方案 B		
场景 I	509.972	482.200	27.773	5.45
场景 II	476.124	437.471	38.652	8.12

从表 1 可以发现:在场景 I 中,2 种控制方案控制下的总燃油消耗量差别明显,与方案 A 相比,方案 B 中的总燃油消耗量减少了 27.773 ml,减少了 5.45%;在场景 II 中,与方案 A 相比,方案 B 中的总燃油消耗量减少了 38.652 ml,减少了 8.12%;与场

景 I 相比,方案 B 在场景 II 中的效果更加明显。
因此,本文获取的速度控制策略不管是在场景 I 中还是场景 II 中,都能够提高快速路下游存在驻足路侧伺机穿越交通场景下路段上交通流的燃油经济性。

4.5 通行效率分析

选取场景 II 中上游快速行驶的交通流为例,分析所获取的速度控制策略对从开始预警点到点 S_d 路段上通行效率的影响,计算不同的交通流密度在不同控制方案下的路段平均行程时间以及 2 个方案之间的效果差异,如表 2 所示。

表 2 不同交通密度和控制方案下路段的平均行程时间
Tab. 2 Average travel time from different control strategies in different density

交通密度/ (veh · h ⁻¹)	平均行程时间/s		平均行程时间差异/s
	方案 A	方案 B	
100	88.212	88.207	-0.005
200	89.908	89.306	-0.602
400	90.680	90.670	-0.010
500	91.712	91.563	-0.149
800	94.180	94.185	0.005
1 200	107.199	107.215	0.015
2 000	138.348	138.510	0.162
3 000	153.397	153.456	0.059

从表 2 可知:方案 A 与方案 B 控制下,车辆平均行程时间随着交通流密度的增加逐渐增加,这与交通流特性相符合;不同交通密度下方案 A 与方案 B 控制的车辆平均行程时间差异很小,基本可忽略。

因此,本文策略能在基本不影响快速路下游存在穿越意图随机交通场景下路段上交通流的通行效率。

5 结 语

(1)本文针对快速路存在驻足路侧伺机穿越的行人且其穿越意图随机的交通场景,通过优化获取了该场景下的速度控制策略。仿真验证表明,该场景下的速度控制策略能够提前进行减速,避免与伺机穿越的行人发生碰撞事故,能够使场景 I 和场景 II 中的燃油消耗分别节省 5.45% 和 8.12%,改善交通流的安全性,且基本不影响快速路下游存在穿越意图随机交通场景下,路段交通流的通行效率。

(2)本文研究解决了如何在驻足路侧伺机穿越的行人在其穿越意图随机且难以通过传感器对其

进行捕捉的情况下,对上游快速行驶的车辆进行有效控制,以避免发生车辆与行人的碰撞事故问题。

(3)本文仅研究了高速公路上下游存在穿越意图随机场景下,智能车辆主动避碰运动速度优化模型,在实际的快速道路系统运行中,多人零散穿越多车道快速道路的交通场景十分常见,后续将进一步开展相关主题的研究。

参考文献:

References:

- [1] 高赫遥. 智能网联混合交通流环境下城市快速路可变限速控制方法研究[D]. 吉林:吉林大学,2024.
GAO He-yao. Research on variable speed limit control method of urban expressway under mixed traffic flow environment of intelligent network connection[D]. Jilin:Jilin University,2024.
- [2] 王顺超. 面向快速道路交通流震荡波的智能网联车辆驾驶行为优化控制[D]. 南京:东南大学,2023.
WANG Shun-chao. Optimal control of connected and automated vehicle driving behavior for expressway traffic oscillation[D]. Nanjing:Southeast University,2023.
- [3] 王文璇. 恶劣天气下快速道路智能网联车辆可变限速控制策略研究[D]. 上海:同济大学,2022.
WANG Wen-xuan. Research on variable speed limit control strategy of intelligent networked vehicles on expressway in bad weather[D]. Shanghai:Tongji University,2022.
- [4] 胡娟娟. 城市快速路安全服务水平评价理论与方法研究[D]. 北京:北京工业大学,2017.
HU Juan-juan. Study on theory and method of safety service level evaluation of urban expressway[D]. Beijing:Beijing University of Technology,2017.
- [5] 赵晶娅. 快速道路交织区交通事故风险与主动交通安全设计[D]. 南京:东南大学,2022.
ZHAO Jing-ya. Traffic accident risk and active traffic safety design in expressway interweaving area[D]. Nanjing:Southeast University,2022.
- [6] World Health Organization. Global status report on road safety 2018[R]. Geneva:WHO Press,2018.
- [7] 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,2017,95:421-441.
- [8] RAKHA H,KAMALANATHSHARMA R K. Eco-driving at signalized intersections using V2I communication[C]//IEEE. Proceeding of 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York:IEEE,2011:341-346.
- [9] KAMALANATHSHARMA R K,RAKHA H A. Leveraging connected vehicle technology and telematics to enhance vehicle fuel efficiency in the vicinity of signalized intersections[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems,2016,20(1):33-44.
- [10] 胡云峰,刘迪,赵靖华,等. 智能网联环境下车辆能耗与排放优化控制的研究现状与展望[J]. 中国公路学报,2022,25(3):1-14.
HU Yun-feng,LIU Di,ZHAO Jing-hua,et al. Research status and prospect of vehicle energy consumption and emission optimization control in intelligent network environment[J]. China Journal of Highway and Transport,2022,25(3):1-14.
- [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,2018,95:802-821.
- [12] WU G Y,BORIBOONSOMSIN K,ZHANG W B,et al. Energy and emission benefit comparison of stationary and in-vehicle advanced driving alert systems[J]. Transportation Research Record,2010(2189):98-106.
- [13] HE X Z,LIU H X,LIU X B. Optimal vehicle speed trajectory on a signalized arterial with consideration of queue[J]. Transportation Research Part C,2015,61:106-120.
- [14] WU X,ZHAO X M,XIN Q,et al. Dynamic cooperative speed optimization at signalized arterials with various platoons[J]. Transportation Research Record,2019(2673):528-537.
- [15] ZHANG J,TANG T Q,YAN Y D,et al. Eco-driving control for connected and automated electric vehicles at signalized intersections with wireless charging[J]. Applied Energy,2021,282:116215.
- [16] BEN K A,ALOUANI I,ALI M M,et al. A novel multi-view pedestrian detection database for collaborative intelligent transportation systems[J]. Future

- Generation Computer Systems,2020,113:506-527.
- [17] VISHNU S, RAMANADHAN U, VASUDEVAN N, et al. Vehicular collision avoidance using video processing and vehicle-to-infrastructure communication [C]//IEEE. Proceedings of 2015 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE). New York:IEEE,2015:387-388.
- [18] BORGES P V K, ZLOT R, TEWS A. Integrating off-board cameras and vehicle on-board localization for pedestrian safety[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2013,14(2):720-730.
- [19] BECKER D, SCHAUFLE B, EINSIEDLER J, et al. Vehicle and pedestrian collision prevention system based on smart video surveillance and C2I communication[C]//IEEE. Proceedings of 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York:IEEE,2014:3088-3093.
- [20] EZZATI A R, YANG K, ANTONIOU C. Development of a conflict risk evaluation model to assess pedestrian safety in interaction with vehicles[J]. Accident Analysis & Prevention,2022,175:106773.
- [21] 马艳丽,朱洁玉,张宿峰,等. 考虑能见度的无信号交叉口行人与车辆冲突识别[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(3):16-21,42.
- MA Yan-li, ZHU Jie-yu, ZHANG Su-feng, et al. Conflict identification between pedestrian and vehicle at non-signalized intersection considering visibility[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2021,40(3):16-21,42.
- [22] TRAN A T, MURALEEDHARAN A, OKUDA H, et al. Scenario-based stochastic MPC for vehicle speed control considering the interaction with pedestrians [J]. IFAC-Papers Online,2020,53(2):15325-15331.
- [23] GELBAL S Y, ARSLAN S, WANG H A, et al. Elastic band based pedestrian collision avoidance using V2X communication[C]//IEEE. Proceedings of 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York:IEEE,2017:270-276.
- [24] RAKHA H A, AHN K, MORAN K, et al. Virginia tech comprehensive power-based fuel consumption model:Model development and testing[J]. Transportation Research Part D,2011,16(7):492-503.
- [25] LIU G X, POPOFF A. Provincial-wide travel speed and traffic safety study in Saskatchewan[J]. Transportation Research Record,1997(1595):8-13.