

基于驾驶风险场的网联自主车辆跟驰行为建模

邵德栋^a, 曲大义^{b,*}, 陈意成^a, 杨子奕^a, 崔善柠^a

(青岛理工大学 a. 土木工程学院; b. 机械与汽车工程学院, 青岛 266525)

摘要: 驾驶风险场是评价网联自主车辆驾驶安全性和稳定性的有效方法。为了提高网联自主车辆跟驰行驶效率和驾驶安全性, 建立基于驾驶风险场的跟驰行为模型。首先构建了包含运动物体对应的风险场、静态环境要素对应的风险场以及动态交通控制信息对应的风险场, 系统刻画车辆在行驶过程中面临的风险特征; 然后将风险场叠加, 通过对跟驰车辆在交通环境中受到的风险合力建立跟驰模型, 此外, 在模型参数标定的过程中, 通过对 City Sim 数据集的数据进行拼接和筛选, 得到加速度和位移信息变化明显的跟车单元, 用于模型的标定和验证; 最后, 运用 SUMO 软件对网联自主车辆跟驰模型进行仿真验证分析, 将仿真结果和 City Sim 数据集及基础跟驰模型进行对比。结果表明: 该模型可以提前 2 s 感知到前车速度的变化, 而且 1/TTC 的波动更小, 且红绿灯时的驾驶行为更加温和, 驾驶环境更加安全。基于驾驶风险场预测网联自主车辆的跟驰行为, 可提高网联队列的跟驰效率和运行安全。

关键词: 驾驶风险场; 网联自主车辆; 跟驰模型; SUMO 仿真

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)01-0123-09

Following behavior modeling of connected autonomous vehicles based on driving risk field

SHAO Dedong^a, QU Dayi^{b,*}, CHEN Yicheng^a, YANG Ziyi^a, CUI Shanning^a

(a. School of Civil Engineering; b. School of Mechanical and Automotive Engineering,
Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Driving risk field is an effective method to evaluate the driving safety and stability of connected autonomous vehicles. In order to improve the driving efficiency and safety of connected autonomous vehicles, the following behavior model is established based on driving risk field. Firstly, risk fields corresponding respectively to moving objects, static environment features and dynamic traffic information are constructed to systematically describe the risk characteristics faced by vehicles during driving. Then these risk fields are superimposed and the following model is built by combining the risks that the following vehicle is subjected to in the traffic environment. In addition, in the process of parameter calibration, the data of City Sim data set are stitched and screened and the following unit with obvious changes in acceleration and displacement information is obtained for the calibration and verification of the model. Finally, SUMO software is used to simulate and verify the following model of con-

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(52272311)

作者简介: 邵德栋(1997—), 男, 山东济宁人。硕士, 研究方向为车路协同与安全控制。E-mail: sdd332024949@163.com。

* 通信作者: 曲大义(1973—), 男, 山东青岛人。博士, 教授, 主要从事车路协同与安全控制方面的研究。

E-mail: dayiqu@qut.edu.cn。

nected autonomous vehicles, and the simulation results are compared with the City Sim data set and the basic following model. The results show that the model can sense the speed change of the leading vehicle 2 s in advance, the fluctuation of $1/TTC$ is smaller, and the driving behavior at the traffic lights is milder and the driving environment is safer. Predicting the following behavior of connected autonomous vehicles based on driving risk field can improve the following efficiency and operation safety of connected vehicle platoon.

Key words: driving risk field; connected autonomous vehicles; following model; SUMO simulation

势场理论在交通流建模中的应用由来已久。21 世纪初,有学者提出势场的概念并应用到机器人路径规划中。随后,势场理论也逐渐被扩展到交通流研究领域,并取得了一些研究成果。WOLF 等^[1]提出了一组潜在的功能组件,由此产生的势场被构造为车道保持、道路保持、速度偏好以及车辆避让和超车等不同函数的叠加。LI 等^[2]从刺激-反应模式中推导出来一种基于势位的跟踪模型,该模型利用人工势场的概念,实现在不断变化的环境中进行精确、快速的交互操作。

基于丰富的交通信息,提出了驾驶风险场,并推广了“势场”的概念,对驾驶风险进行数学描述。随着车载技术和通信技术的发展,驾驶风险领域的研究也逐步推进。贾彦峰等^[3]通过分子间作用力和车辆相互作用势场函数,将安全势场应用于网联自主车辆的跟驰决策中。NI 等^[4-6]使用场论作为框架,将现有的微观和宏观模型相互关联,并对提出的一些交通流模型进行了基准测试。WANG 等^[7-8]提出“驾驶安全领域”的概念,利用场论来表示由于驾驶员、车辆、道路状况和其他交通因素引起的风险因素,预测动态变化引起的驾驶安全趋势。在此基础上,LI 等^[9]建立了一个安全控制模型来评估驾驶员的驾驶风险。陈虹等^[10]提出了一种人工势场与模型预测控制相结合的方法,将虚拟力场与模型预测有机结合,将力场函数抽象化为优化目标。GEISLINGER 等^[11]以伦理学理论为基础,提出了“风险伦理”理论和路径规划的新框架。许多学者在跟车模型的基础上,考虑了信号交叉口的影响因素,开发了不同类型的信号交叉口跟车模型。SASAKI 等^[12]研究了单车道信号灯对交通流的影响。在此基础上,研究了不同信号控制策略下的交通流特性。HU 等^[13]提出了一种基于驾驶员风险场的类人驾驶行为模型,模型生成的预测与信号交叉路口实验中观察到的驾驶行为密切相关,并验证了该模型与类人驾驶行为模型具有较高的拟合度。李修海等^[14]考虑到交叉口车辆的聚集特性,建立了信号交叉口车辆聚集模型。TANG 和 YU 等^[15-16]将绿灯时驾驶员的跟车特征纳入到跟车模型中。ZHANG 等^[17]分析了不同信号状态下驾驶员的跟车行为,建立了分阶段跟车模型。李海洋等^[18]基于博弈论,综合多种因素,根据人-车博弈过程构建了混合策略、行人先行、车辆先行 3 类博弈模型,通过分析纳什均衡和不同情况下博弈双方收益,得出了行人和车辆在不同情况下的占优策略和策略选择情况。张可琨等^[19]通过系统相似性分析车辆与分子的相似性,引入分子相互作用势建立换道模型,系统分析自动驾驶汽车的换道决策行为特性,有效认知换道车辆的交通场景。孟奕名等^[20]针对网联混合车流所呈现的复杂动态特性,考虑驾驶人反应时滞和车辆跟驰过程中相邻车道车辆插入的影响,修正及拓展优化速度模型。

综上所述,诸多学者对车辆跟驰模型进行了研究,但是许多研究并不是在智能网联环境下进行的,考虑信号交叉口的跟驰模型没有很好地和势场理论相结合,更多的是车辆跟驰模型在传统环境下的适用性研究以及不同信号交叉口跟驰模型的研究。因此,本文提出一种基于驾驶风险场的网联自主车辆跟驰模型,通过构建运动物体对应的风险场、静态环境要素对应的风险场以及动态交通控制信息对应的风险场来分析各种交通因素的风险特征,并将信号交叉口和势场理论相结合,通过 SUMO 仿真与先进的 City Sim 数据集及基础的跟驰模型进行对比,评估模型的效果。

1 风险场的构建

整个交通环境对应的风险场难以直接构建,但可以分解为不同单要素对应的风险场。这些要素按其特点主要可分为 3 类:运动物体、静态环境要素和动态交通控制信息。因此,首先构造 3 种要素对应的风

险场,然后对这些风险场进行叠加。

1.1 运动物体对应的风险场

运动物体对应的风险场来源于道路上的车辆。一辆车辆形成的风险场强度由其定义的属性和运动状态决定,这些参数的详细信息总结如下。

1) 车辆属性:一般情况下,车辆的质量与其类型呈正相关。因此,本文将不考虑车型对车辆势场的影响。通过文献[7-8]的研究发现,即使质量相同的车辆,在不同的车速下,其行驶风险也是不同的。车辆在运动中的质量可以定义为一种等效质量,它与车辆当前的速度有关,反映了车辆在一定速度下的行驶风险程度。采用文献[7-8]中提出的等效质量数学表达式,定义为

$$M_i = m_i \cdot (1.566 \times 10^{-14} \cdot v_i^{6.687} + 0.3345) \quad (1)$$

式中: M_i 为当前车辆 i 的等效质量; m_i 为当前车辆 i 的实际质量; v_i 为当前车辆的速度。

可以看出,等效质量随着速度的增加而增加,即目标车辆在高速时的安全风险远大于低速时的安全风险。

2) 车辆运动状态:在目标车辆的行驶风险势场中,车辆会经历不同的场强,这和车辆与目标车辆的相对位置有关。场强表示目标车辆当前对车辆造成的安全风险程度。当目标车辆处于不同的运动状态时,其行驶风险势场强度会有所不同。其中最主要的影响因素是车辆的速度 v 和加速度 a 。

3) 车辆间的距离:一般在势场平面内,任意点的场强与目标车辆的距离有关。距离越小,场强越大,最大值为车辆质心位置。将目标车辆质心的空间坐标定义为 (x_0, y_0) ,空间中任意点 (x, y) 到车辆质心的距离 l 可以表示为

$$l = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (2)$$

如果用 $1/l$ 直接表示距离与场强的负相关关系,可以发现无论车辆与目标车辆在同一车道还是在另一车道,在等距点处的场强都是相同的,但是车辆的侧身方向没有速度分量,车辆的侧身风险并不明显。因此,为了更好地描述安全场强度与距离之间的关系,使车辆能与前车始终保持最小的安全距离,对车辆侧身方向的距离 l 进行改进并表示为

$$|l'| = \sqrt{\left[(x - x_0) \frac{l_0}{\exp(\omega v)} \right]^2 + [(y - y_0) l_0]^2} \quad (3)$$

式中: y 轴为车辆的纵向前进方向; x 轴为车辆的横向变道方向; ω 为待定系数; l_0 为停车最小安全距离。

在行驶过程中,对某一物体车辆的影响范围是有限的,即只会影响周围的几辆车辆。随着距离的增加,影响会迅速减小。在物理学中,可以把它看作是一种短程力。基于此,结合前文的影响因素分析,提出了运动物体风险场函数,可表示为

$$R_v = M_i \lambda \frac{\exp(a \cos \theta)}{|l'|} \cdot \frac{l'}{|l'|} \quad (4)$$

式中: R_v 为运动物体风险场函数; λ 为待定系数; θ 为目标车辆的任意点与车辆运动方向形成的顺时针夹角; a 为目标车辆当前运动状态的加速度。

1.2 静态环境要素对应的风险场

静态环境要素主要包括道路边缘和车道线,对周围车辆产生的风险几乎不随时间变化。其可保持车辆远离道路边缘和车道线,并在道路中心的位置行驶。因此,静态环境要素对应的风险场与运动物体对应的风险场类似,具有随相对距离变化的风险特征。

静态环境要素风险场 R_r 由道路边缘风险场 (R_{road}) 和车道线风险场 (R_{lane}) 组成,表示为

$$R_r = R_{road} + R_{lane} \quad (5)$$

道路边缘风险场的边界势能在道路边界处为无限大,以防止车辆离开主干道。指数函数可以通过调节曲率因子 k 来改变下降速率,与反比例函数相比,指数函数更平滑。因此车辆在边界车道行驶时具有较高的容错能力。因此,采用指数函数来模拟边界车道的势能

$$R_{road} = A_r \exp(-kx + x_j) \quad (6)$$

式中: A_r 为边界因子,决定了边界的最大势能; k 为曲率因子,决定了边界势能的上升、下降速率; x_j 为第

j 条道路的坐标。

车道线为虚线,能够防止车辆随意变道,同时又可以使车辆足够自由地移动,始终行驶在车道中心。采用高斯函数来模拟车道线的势能

$$R_{\text{lane}} = A_{\text{lane}} \exp \left[\frac{-(x - x_k)^2}{\eta_l^2} \right] \tag{7}$$

式中: A_{lane} 为车道标线类型,由交通法规规定的优先级决定,优先级越高, A_{lane} 越大; x_k 为第 k 个车道划分位置; η_l 为电势上升、下降速率。

图1为双向四车道的势能示意。

1.3 动态交通控制信息对应的风险场

动态交通控制信息主要是十字路口信号灯发出的信号,信号主要有2个特点:①在固定的区域内,按照一定的规则,定期将路权分配给交通参与者,以防止或允许车辆通过;②这些信号的变化对已经在交叉路口内的交通参与者的影响很小或没有影响。因此,信号所对应的风险场仅位于其控制区域的边界,并随时间变化。当一个方向禁止车辆通行时,在该方向的停车线处形成一个高风险区域。这个区域的风险函数类似于不可跨越的障碍物或实线的道路边缘,因为这个区域在空间上是允许的,但在交通规则上是禁止的。

以一个有4个出入口的信号交叉口为例,构建其相应的风险场。对于该交叉口各入口信号,坐标系的 x 轴为平行于停车线延伸方向, y 轴为垂直于停车线延伸方向。这个坐标系的原点位于停止线的中心。同一入口的不同车道在同一信号相位可能具有不同的通行权,这意味着可能需要分别构建各车道信号对应的风险场,如图2所示。

假设这些车道具有相同的优先权,定义入口信号对应的风险场函数 R_s 为

$$R_s = f_s(t) \cdot R_{\text{line}} \tag{8}$$

式中: R_{line} 为 R_{lane} 中实线对应的风险场函数; $f_s(t)$ 为反映信号周期内风险场变化的函数。

信号周期内 $f_s(t)$ 随时间的变化如图3所示,定义 $f_s(t)$ 为

$$f_s(t) = \begin{cases} 0 & n \cdot T < t \leq n \cdot T + t_g \\ \frac{t - (n \cdot T + t_g)}{t_y} & n \cdot T + t_g < t \leq n \cdot T + t_g + t_y \\ 1 & n \cdot T + t_g + t_y < t \leq n \cdot T + t_g + t_y + t_r \end{cases} \tag{9}$$

式中: t_g 、 t_y 、 t_r 、 T 分别为第 j 个信号时绿灯、黄灯、红灯和信号周期的持续时间; n 为整数倍数。

当信号灯为绿灯时, $f_s(t)$ 为0,则相对应的风险场 R_s 也为0,即此时没有风险;而信号灯为红色时, $f_s(t)$ 为1,风险场 R_s 与 R_{line} 对应的风险场相同,这个风险区域可以理解为实线的导向车道线,在空间上是允许的,但在交通规则上是禁止的;当信号灯为黄色时,根据黄灯所剩的时间来判断相应的风险,时间越短则风险越大。

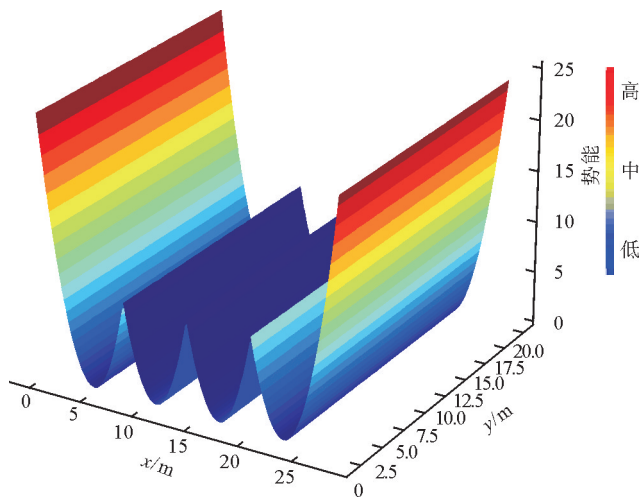


图1 双向四车道势能

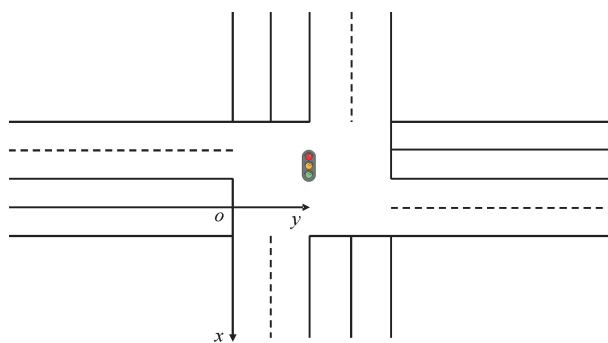


图2 信号交叉口坐标系统

通过以上分析,得出由运动物体对应的风险场 R_v 、静态环境要素对应的风险场 R_r 和动态交通控制信息对应的风险场 R_s 构成的交通环境对应的风险场 R 可以全面地刻画车辆在行驶过程中面临的动态风险。最终,整个交通环境对应的驾驶风险场模型可表示为

$$R = R_v + R_r + R_s \quad (10)$$

2 跟驰模型

交通环境因素会根据风险场影响驾驶员,包括跟驰过程中的前车、道路中的车道线以及交通动态信息等风险场。驾驶员要在各个风险区域的约束下,识别整体驾驶风险场约束下的最低势能点,来保证跟驰的安全。因此,通过求 R 的导数,可以得到基于驾驶风险场的跟驰模型表达式:

$$\dot{v}_n = \frac{\frac{\partial R_v}{\partial y} + \frac{\partial R_r}{\partial y} + \frac{\partial R_s}{\partial x}}{M_i} \quad (11)$$

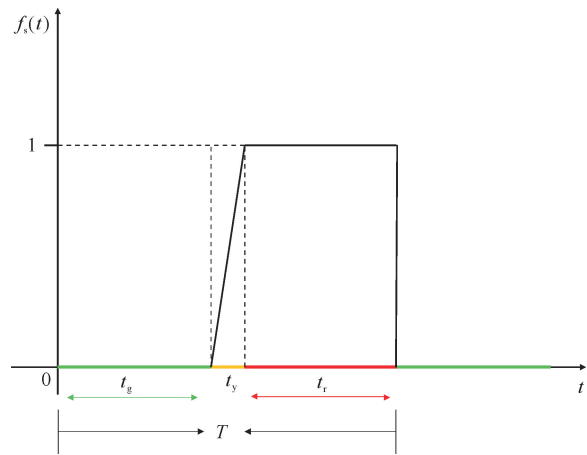


图3 不同信号灯的风险值

— 绿灯时长; — 黄灯时长; — 红灯时长; — $f_i(t)$

3 模型参数标定

在车路协同环境下,车辆能够实时获取自身的速度、加速度等动态信息,进而根据这些信息做出相应的行为决策。目前智能网联环境还没有完全达到,所以无法获取相应的车辆行驶数据用于模型的标定,因此选取传统环境下的场景数据,这是因为在传统的行驶环境中,领先车辆的加速度、速度发生明显变化,驾驶员对前方车辆行为决策的变化非常敏感,虽然无法实时获取速度、加速度的具体数值,但是可以根据前方车辆的变化做出瞬时决策。选取数据量最大、数据内容最丰富的无人机航拍 City Sim 数据集用于模型参数的标定。

由于原始 City Sim 数据集不仅包含车辆的跟驰数据,也包括车辆的变道信息和其他数据,因此在进行标定之前,需要对原始的跟车单元进行数据拼接。

首先,为了研究跟驰行为,利用 City Sim 数据集提供的前车 ID 和跟车 ID,通过简单的数据连接处理就可以得到需要的跟车信息。根据数据集中的车辆位置、速度、加速度等信息,使得每个跟车的行为信息在可研究范围。图 4 为数据拼接过程。

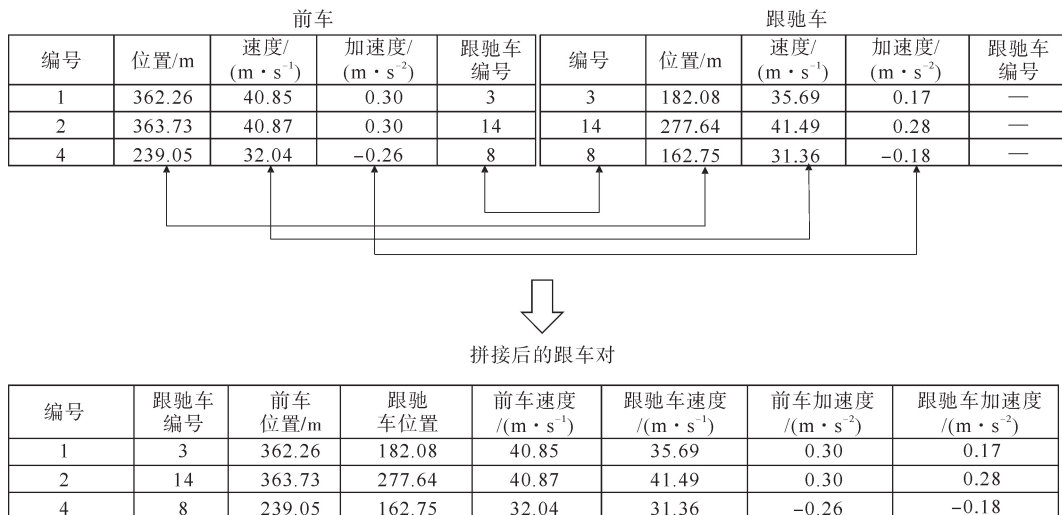


图 4 数据拼接过程

需要注意的是,在获得跟车单元数据后,需要对这些数据进行筛选,选择加速度和位置信息变化明显的跟车单元,以便更好地匹配上述跟车行为。最后得到 1480 组跟车单元的轨迹数据,随机选择 467 组和 1013 组数据分别作为标定集和验证集。标定结果如表 1 所示。

4 模型仿真分析

应用具有信号交叉口的三车道道路作为仿真试验台(图 5),道路长度为 500 m。由于在信号交叉口处存在导向车道线,因此不允许超车,仅模拟车辆的跟驰行为,只允许在十字路口通过。信号周期为 60 s,其中绿灯时间为 25 s,黄灯时间为 5 s,红灯时间为 30 s。在信号灯变为绿色时,第 1 辆车从原点进入道路,其余每辆车在原点的时间间隔是一个随机值,遵循威布尔分布,平均值为 4 s^[17]。对于每个模型,执行 100 次模拟以获得驾驶数据,并删除时间间隔大于 10 s 或空间间距大于 110 m 的数据,仅过滤属于汽车跟驰场景的数据以进行后续分析。对仿真结果进行过滤后,选取 1069 组数据与 City Sim 数据集中 1013 组数据进行对比。

参数	参数标定值
ω	0.035
l_0	2.280
λ	0.560
A_r	23.760

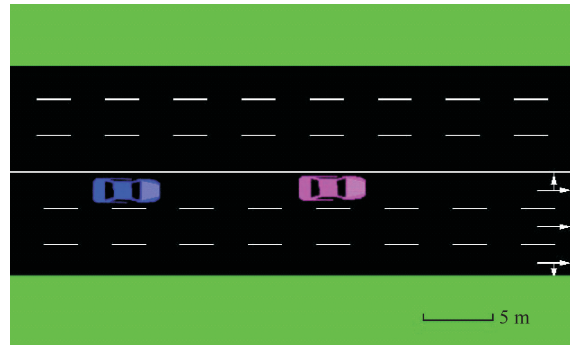


图 5 仿真场景

1) 为了突出对比结果,在这项工作中,选择速度、加速度和需求安全距离 3 个指标对比仿真和数据集的效果,结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,仿真和数据集中车辆数量所占的比例趋势基本相同。从图 6(a)中可以看出,速度分布范围总体趋势没有太大变化,仿真和数据集的数量都基本分布在速度为 20~40 m/s。但存在 2 个特殊时刻,在速度为 20~25 m/s,仿真的数量远小于数据集的数量,而在 35~40 m/s,仿真的数量却远大于数据集的实际量。这是因为在仿真过程中,车辆在起步过程中没有考虑驾驶员的驾驶风格和行为习惯(如未及时跟车、起步缓慢等特殊行为),因此车辆在跟驰过程中速度较高,所以会导致数量增加。从图 6 (b)(c)中可以看出,仿真与数据集中加速度和需求安全距离没有特殊的变化,都维持在一个相对稳定的区间。综上所述,所建的网联自主车辆跟驰模型具有适用性和安全性,能够很好地应用于网联自主车辆跟驰过程,且能够适当地缩小需求安全距离提高跟车效率。

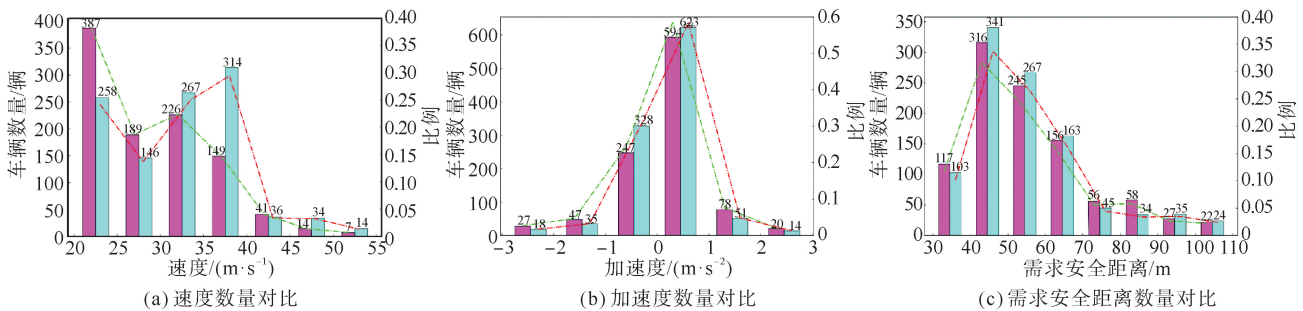


图 6 仿真数据集数量对比

■ 数据集数量; ■ 仿真数量; - - 数据集占比; - - 仿真占比

2) 为了评价所建跟驰模型的效果,将初始车辆间距设为 100 m,前车初始速度设为 18 m/s,跟驰车的初始速度设为 8 m/s,随后将 City Sim 数据集中的行驶过程应用到仿真中,得到的仿真响应曲线如图 7

所示。

由仿真结果可知,网联自主车辆跟驰模型整体效果更加平稳,图 7(a)可以看出,在与前车车头间距较大的情况下,仿真和数据集跟驰车都采取了加速行驶的决策;当检测到前车减速行驶的情况下,跟驰车也及时调整跟驰策略增加安全距离。具体来看,前车在 $t = 12\text{ s}$ 的时候开始减速,跟驰车所面临的风险逐渐增加,可以看出,仿真模型中跟驰车在 $t = 16\text{ s}$ 时首先减速,避免车头间距过小造成的风险迅速增加,进而增加与前车的安全距离;而数据集中跟驰车在仿真模型中跟驰车减速 2 s 之后才采取减速的决策(图 7(b))。随着时间的推移,在获取与前车的安全距离增大的情况下,所建的网联自主车辆跟驰模型比数据集提前减少安全距离,提高跟驰的效率(图 7(c))。综上所述,所建的网联自主车辆跟驰模型在跟驰过程中表现更好,在保证安全的前提下,适当地缩小安全距离提高跟驰的效率;在保证效率的同时,适当的增加需求安全距离保证跟车的安全。总的来说,所建的跟驰模型比数据集反应更迅速,行车更安全,跟车效率更高。

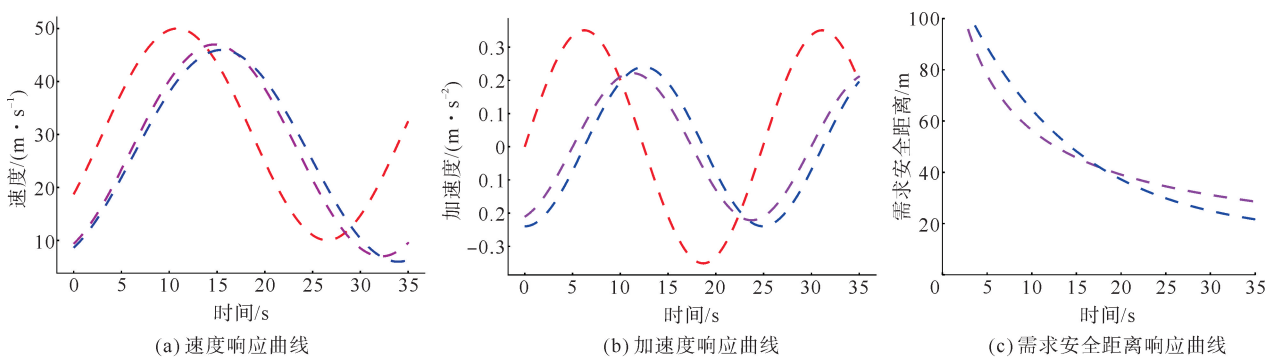


图7 仿真数据集响应曲线对比

—前车;—仿真;—数据集

3) 当使用碰撞时间(Time To Collision, TTC)指标量化交通风险时,由于数据集中出现较大的 TTC 值,因此本文使用 $1/TTC$ 来确保数值的有效性。选取跟驰过程中加速度变化明显的车辆数据构建 $1/TTC$ 的图像,图 8 显示了所建跟驰模型 $1/TTC$ 与数据集 $1/TTC$ 图像的对比效果,仿真中所有车辆的 $1/TTC$ 在 $0 \sim 0.2$ 波动,由此可见,本文提出的跟驰模型的 $1/TTC$ 波动更小,更加稳定。

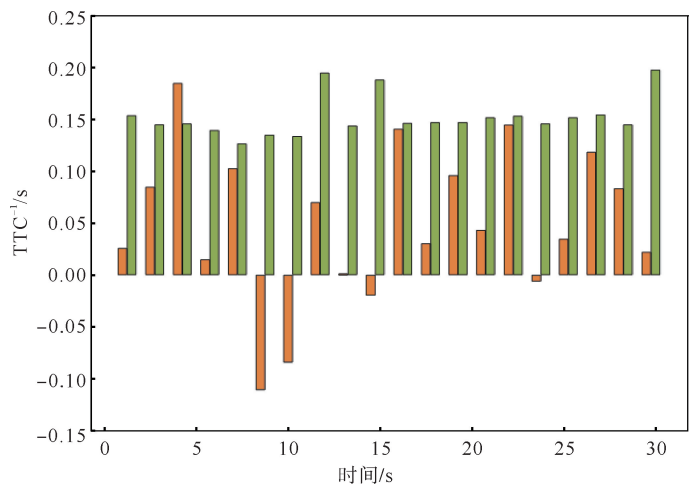


图 8 仿真数据集 $1/TTC$ 对比

■ 仿真; ■ 数据集

4) 将本文建立的网联自主车辆跟驰模型与基础跟驰模型进行对比。从图 9 中可以看出,所建跟驰模型在红绿灯时的驾驶行为比较温和,因此形成了更加安全的驾驶环境;相比基础跟驰模型来说,通过红绿灯的车辆更多,延误更少,通行效率更高。

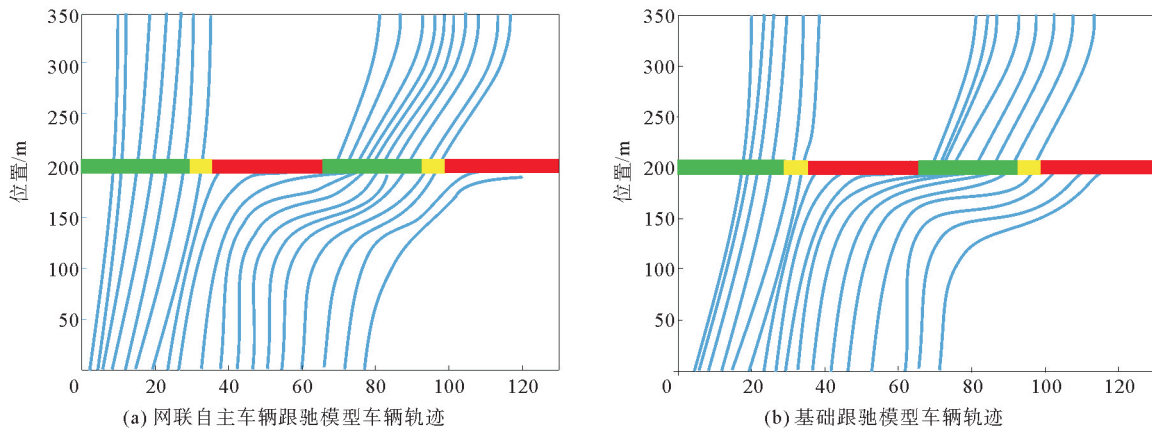


图9 车辆轨迹对比分析

■ 绿灯时长; ■ 黄灯时长; ■ 红灯时长; — 车辆轨迹

5 结论

1) 将驾驶风险场理论应用到网联自主车辆跟驰过程,提出了一个驾驶风险场模型来量化运动物体、静态环境要素和动态交通控制信息对车辆运动的风险约束。驾驶风险场模型可以全面分析交通环境对车辆的约束,并对交通环境中的约束进行分解研究。

2) 从实验结果来看,建立的网联自主车辆跟驰模型对前车信息变化表现更加明显,响应曲线更加平滑、 $1/TTC$ 更加稳定,能够动态地改变跟驰过程中速度、加速度和需求安全距离,提高网联队列的跟驰效率和运行安全。

3) 本文建立的驾驶风险场及跟驰模型能够应用于网联自主车辆跟驰过程,未来智能网联环境将会全面发展,交通环境更为复杂,考虑更加复杂的智能网联环境下的网联自主车辆行为决策建模是接下来需要重点进行的研究内容。

参考文献(References):

- [1] WOLF M T, BURDICK J W. Artificial potential functions for highway driving with collision avoidance[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2008: 3731-3736.
- [2] LI C G, JIANG X B, WANG W H, et al. A simplified car-following model based on the artificial potential field[J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 13-20.
- [3] 贾彦峰, 曲大义, 赵梓旭, 等. 基于安全势场的网联自主车辆跟驰行为决策及模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(1): 85-97. JIA Yanfeng, QU Dayi, ZHAO Zixu, et al. Car-following decision-making and model for connected and autonomous vehicles based on safety potential field[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(1): 85-97.
- [4] NI D. A unified perspective on traffic flow theory Part I: The field theory[C]//ICCTP 2011: Towards Sustainable Transportation Systems. Nanjing, 2011: 4227-4243.
- [5] NI D. A unified perspective on traffic flow theory Part II: The unified diagram[C]//ICCTP 2011: Towards Sustainable Transportation Systems. Nanjing, 2011: 4244-4263.
- [6] NI D, ZHANG C, WANG H. A unified perspective on traffic flow theory Part III: Validation and benchmarking[C]//ICCTP 2011: Towards Sustainable Transportation Systems. Nanjing, 2011: 4264-4286.
- [7] WANG J Q, WU J, LI Y. The driving safety field based on driver-vehicle-road interactions[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(4): 2203-2214.
- [8] WANG J Q, WU J, ZHENG X J, et al. Driving safety field theory modeling and its application in precollision warning system[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 72: 306-324.
- [9] LI M J, SONG X L, CAO H T, et al. Shared control with a novel dynamic authority allocation strategy based on game theory and driving safety field[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 124: 199-216.
- [10] 陈虹, 申忱, 郭洪艳, 等. 面向动态避障的智能汽车滚动时域路径规划[J]. 中国公路学报, 2019, 32(1): 162-172. CHEN Hong, SHEN Chen, GUO Hongyan, et al. Moving horizon path planning for intelligent vehicle considering dynamic obstacle

- avoidance[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(1):162-172.
- [11] GEISSLINGER M, POSZLER F, BETZ J, et al. Autonomous driving ethics: From trolley problem to ethics of risk[J]. *Philosophy & Technology*, 2021, 34(4):1033-1055.
- [12] SASAKI M, NAGATANI T. Transition and saturation of traffic flow controlled by traffic lights[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2003, 325(3/4):531-546.
- [13] HU W C, CHEN Y Y, XU W X, et al. Modeling human-like driving behavior at a signal intersection based on driver risk field model[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2024, 47:2-16.
- [14] 李修海,于少伟. 信号交叉口集聚车辆的跟驰行为分析与建模[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(2):102-108.
LI Xiuhai, YU Shaowei. Analysis and modeling for car-following behaviors on arrival traffic flow of signalized intersection[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(2):102-108.
- [15] TANG T Q, YI Z Y, ZHANG J, et al. Modelling the driving behaviour at a signalised intersection with the information of remaining green time[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2017, 11(9):596-603.
- [16] YU S W, SHI Z K. Analysis of car-following behaviors considering the green signal countdown device[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 82:731-740.
- [17] ZHANG J, TANG T Q, WANG T. Some features of car-following behaviour in the vicinity of signalised intersection and how to model them[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2019, 13(11):1686-1693.
- [18] 李海洋,曲大义,杨子奕,等. 无信号控制交通场景的人车博弈行为分析及决策建模[J]. *青岛理工大学学报*, 2023, 44(5):138-149.
LI Haiyang, QU Dayi, YANG Ziyi, et al. Analysis of human-vehicle game behavior and decision modeling for signal-free controlled traffic scenarios[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2023, 44(5):138-149.
- [19] 张可琨,曲大义,宋慧,等. 自动驾驶汽车换道决策行为分析及分子相互作用势建模[J]. *青岛理工大学学报*, 2023, 44(5):150-159.
ZHANG Kekun, QU Dayi, SONG Hui, et al. Analysis of lane-changing decision-making behavior and molecular interaction potential modeling for autonomous vehicle[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2023, 44(5):150-159.
- [20] 孟奕名,曲大义,杨子奕,等. 网联混合车流跟驰特性及稳态响应策略[J]. *青岛理工大学学报*, 2023, 44(3):104-112.
MENG Yiming, QU Dayi, YANG Ziyi, et al. Car-following characteristics and steady-state response strategy of networked hybrid traffic flow[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2023, 44(3):104-112.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)