

基于贝叶斯博弈的网联自主车辆跟驰行为建模

陈意成^a, 王 韬^b, 杨宇翔^a, 邵德栋^a, 曲大义^{b,*}

(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: 伴随高级驾驶辅助技术的日益成熟, 网联自主车辆可以精确地感知复杂交通场景, 并自主做出驾驶行为决策, 但如何使网联车辆自主做出符合驾驶员习惯风格的行为决策, 尚需深度挖掘制约自主决策行为的内在机理。博弈论作为科学有效的理论工具, 合理分析行为策略的相互依存关系, 可直观解析驾驶员的决策过程; 基于贝叶斯博弈理论, 分析驾驶员决策机理, 结合加速度与安全裕度效用函数, 优化智能驾驶员模型 (IDM), 建立贝叶斯博弈跟驰模型。采用 CitySim 数据集的车辆运行数据, 使用深度学习对模型进行校准, 运用 SUMO 软件对建立的模型进行有效性验证分析。结果显示, 贝叶斯博弈跟驰模型所模拟的微观交互行为符合人类驾驶员的驾驶习惯, 可识别驾驶员的驾驶行为风格并模仿, 在一定程度上提高了驾驶的安全性; 在宏观角度可以重现单车道与多车道的交通流波动演变, 保障未来网联环境中自动驾驶车辆队列的稳态运行, 从而提高交通容量和交通效率。

关键词: 网联自主车辆; 驾驶风格; 交互关系; 贝叶斯博弈; 深度学习

中图分类号: U491.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)03-0133-08

Bayesian game-based modelling of the following behaviors of internet-connected autonomous vehicles

CHEN Yicheng^a, WANG Tao^b, YANG Yuxiang^a, SHAO Dedong^a, QU Dayi^{b,*}

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

Abstract: Along with the increasing maturity of advanced driver assistance technology, internet-connected autonomous vehicles can accurately perceive complex traffic scenes and make driving decisions autonomously. However, the intrinsic mechanism that constrains the autonomous decision-making behavior needs to be explored in depth so that internet-connected vehicles could make autonomous decisions in line with the driver's habitual style. As a scientific and effective theoretical tool, game theory can reasonably analyze the interdependence of behavioral strategies, and can intuitively analyze the driver's decision-making process. Based on the Bayesian game theory, this study intends to analyze the driver's decision-making mechanism. Combining the acceleration and safety margin utility function, it optimizes the IDM follow-up model and establishes the Bayesian game following model. Adopting the vehicle operation data from CitySim dataset, the established model is then calibrated by deep

收稿日期: 2024-01-01

基金项目: 国家自然科学基金(52272311)

作者简介: 陈意成(1999—), 男, 山东东营人。硕士, 研究方向为车路协同与安全控制。E-mail: cyc30144701@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等方面的研究。
E-mail: dayiqu@qut.edu.cn。

learning method, and the effectiveness of the established model is verified and analyzed using SUMO software. The results show that the micro-interaction behaviors simulated by the Bayesian game following model are in line with the driving habits of human drivers, and the model can identify and imitate the driving style of drivers, which improves the safety of driving to a certain extent. The evolution of the fluctuation of the traffic flow between single lane and multi-lane can be reproduced from the macroscopic point of view, which ensures the steady-state operation of the queue of autonomous vehicles in the future internet-connected environment and improves traffic capacity and efficiency.

Key words: internet-connected autonomous vehicles; driving style; interaction relationships; Bayesian games; deep learning

博弈论作为研究人类行为决策机理的工具,最早应用在经济领域,后因其可解释性,被广泛应用于各个学科。其原理可概括为,决策者在对手的特定策略下,实现收益的最大化^[1]。

道路上的车车交互关系可以视为一种非合作博弈,因此国内外学者将其应用于交通领域。WANG等^[2]基于差分博弈的控制理论,控制网联自主车辆的跟驰与博弈行为,探究了其对于交通流稳定性的影响;ZHANG等^[3]基于非合作博弈,估计交互车辆的侵略性,以应对复杂交通情况下的强制换道问题;戴守晨等^[4]基于混合博弈,针对信号交叉口上游路段的车辆换道行为,从不同位置和绿灯剩余时间等角度进行了验证分析;张可琨等^[5]基于完全信息的静态博弈,引入动态风险系数,对换道意图进行量化分析;孟奕名等^[6]设计稳态跟驰优化策略,对于提高驾驶安全性具有良好的效果;陈秀锋等^[7]建立了一种基于动态安全车距的改进全速度差跟驰模型,有助于提高车流稳定性;贾彦峰等^[8]建立安全势场模型,有效改善了网联车辆的跟驰安全性;曲大义等^[9]针对网联自主车辆与人工驾驶车辆混合流环境,解析异质车群之间的博弈关系,对网联自主车辆的换道控制进行建模。综上所述,国内外学者已经将多样化的博弈形式应用于交通领域,将纳什均衡作为非合作博弈中的最优解,为实现收益最大化,每个驾驶员都需要了解其他驾驶员的实际收益。但是先前的部分研究未在智能网联环境下进行,其是否能适应于目前复杂的道路交通环境有待重新考虑;部分以智能网联环境为背景的研究,未考虑到驾驶员的风险偏好和环境敏感性或未对其有具体的量化。本文基于贝叶斯博弈理论,依托于智能网联环境下信息感知的便利性,以实现在车辆跟驰博弈关系中的贝叶斯纳什均衡,使得驾驶员收益最大化,保障未来网联环境中自动驾驶车辆队列的稳态运行。

1 基于贝叶斯博弈的跟驰模型设计

在当前交通环境下,将全部驾驶员按照驾驶风格偏好,分为激进型驾驶员与非激进型驾驶员。在可供选择的行动策略操作集(加速、减速、保持速度)相同的情况下,其采取各种操作的概率会因驾驶员类型而有所差异。比如激进型驾驶员可能会更频繁地加速或减速,且很少保持车速不变;而非激进型驾驶员可能会在长时间保持较低车速,避免频繁地加速或减速。在此基础上,急加速/减速、急转弯、超速、频繁加速/减速等客观指标^[10]可作为判断依据,如表1所示。

综上,贝叶斯博弈概念模型可以表示为 $G = \{\xi_i, T_i, S_i, P_i, U_i\}$ 。

$$\delta_{A_i} = P(A) \cdot (\delta_{A_i})_A + P(N) \cdot (\delta_{A_i})_N \quad (1)$$

$$\delta_{D_i} = P(A) \cdot (\delta_{D_i})_A + P(N) \cdot (\delta_{D_i})_N \quad (2)$$

$$\delta_{M_i} = P(A) \cdot (\delta_{M_i})_A + P(N) \cdot (\delta_{M_i})_N \quad (3)$$

式中: ξ_i 为驾驶员个体, $i = 1, 2, 3, \dots, n$; T_i 为驾驶员驾驶行为类型, $T_i \in \{A, N\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, 其中 A 为激进型驾驶员, N 为非激进型驾驶员; S_i 为驾驶员 ξ_i 的一组行动策略, $S_i \in \{\delta_{A_i}, \delta_{M_i}, \delta_{D_i}\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, 其中 δ_{A_i} 为加速策略, δ_{M_i} 保持现有速度策略, δ_{D_i} 为减速策略; P_i 为概率函数, 表示 T_i 的概率分布集, 在只有 2 种驾驶行为类型的情况下, 假设驾驶员 i 的类型为激进型的概率为 $P(A) = p$, 则其为非激进型驾驶员的概率为 $P(N) = 1 - p$; U_i 为效用函数, $U_i(T_i, S_i)$ 即指定类型的驾驶员采取某种行动策略后将获得的收益。

贝叶斯博弈模型旨在探究在驾驶员驾驶风格偏好未确定的情况下,驾驶舒适度与安全裕度针对跟驰行为决策的作用机理,并建立相应的效用函数,使用基于贝叶斯纳什均衡的策略最大化所有驾驶员的效用,在此基础上优化传统智能驾驶员模型(IDM),以实现车辆跟驰舒适性、安全性和效率间的平衡。

1.1 驾驶效用函数

驾驶员正常道路环境状态下所做出的决策主要受2个因素的影响,首先是预估决策所产生的后果是否在自身可承受安全范围内,其次是考虑加速、减速对乘坐舒适度所带来的影响,最终将综合决策的过程量化为驾驶效用。而如何解析驾驶安全性、舒适性与驾驶效用间的非线性关系是探究车辆间博弈机理的重点。

目前针对车辆制动性能和舒适度的研究,周申培等^[11]将刹车过程中驾驶员的驾驶舒适度量化为制动加速度的值,驾驶舒适度的高低与制动加速度的值成反比,当车辆制动力超过一定阈值,将会对驾驶员的舒适度产生负面影响。结合车辆动力学模型,根据制动力、制动加速度与驾驶舒适度间的机理公式,建立减速效用函数,如式(4)(5)所示。

$$u_{\text{dec}} = \left[\left(\frac{-0.0067F_p + 1.0586}{0.8007} - 1 \right)^2 + \left(\frac{0.3167F_p - 11.2984}{0.2652F_p - 3.1462} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$a_{\text{dec}} = 0.0067F_p - 0.0795, (a_{\text{dec}} < 0) \quad (5)$$

式中: u_{dec} 为减速效用舒适度; a_{dec} 为车辆制动加速度; F_p 为制动踏板力。

关于加速度与驾驶舒适度的关系,现有相关的研究文献也没有定论。HOBEROCK^[12]对公共交通舒适度的研究认为,可被大多数驾驶员接受的舒适加速度最有可能处于 $1.08 \sim 1.47 \text{ m/s}^2$ 的范围内,且大多数驾驶员不能接受高于 2.94 m/s^2 的加速度。KSANDER 等^[13]在此基础上结合冲击舒适模型和感知运动强度模型,解释了驾驶员的瞬态舒适响应机理:受加速度影响的驾驶舒适度近似以正弦函数趋势变化,在加速度处于 0.28 m/s^2 时舒适度最高,加速度达到 2.12 m/s^2 时驾驶员开始感到“可怕”,可接受加速度均值为 1.23 m/s^2 ,同时符合 HOBEROCK 对于上限范围的预期。将加速效用函数表述为

$$u_{\text{acc}} = \sin\left(\frac{2\pi a_{\text{acc}}}{7.36} + 1.331\right), (a_{\text{acc}} > 0) \quad (6)$$

式中: u_{acc} 为加速效用舒适度; a_{acc} 为车辆加速度。

在量化车辆跟驰安全性之前,必须了解目标车辆在给定的跟驰条件下是否处于危险状态。在交通密度较高的情况下,目标车辆企图换向更高速车道,通常会遇到被几辆车包围的情况,这就要求驾驶员在变道时应该更加关注交通环境以及周围车辆的动态,以保持安全的车距和速度,否则就有可能发生碰撞事故。由于不同的道路环境、车流状态与驾驶员特性,使得安全的车距和速度一直处于一种动态变化状态。为判断车辆是否处于安全状态,以及进一步量化风险,引入安全裕度。NILSSON^[14]将安全裕度描述为“令驾驶员感到威胁的距离”,安全状态判断函数如下:

$$P[x_i^0, x_i^i] = \begin{cases} \text{safe}, S_i(t) \geq 0 \\ \text{unsafe}, S_i(t) < 0 \end{cases}, (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

式中: x_i^0 和 x_i^i 分别为目标车辆和周围车辆 i 在 t 时刻的位置; safe 为目标车辆处于安全状态; unsafe 为目标车辆处于风险状态; $S_i(t)$ 为 t 时刻目标车辆与周围车辆 i 之间的安全裕度。

在评估跟驰风险的过程中,应首先计算目标车辆与周围每个车辆之间的安全裕度。但是车辆之间可能存在各种位置关系,如与前车和目标车道前车相比,目标车辆位于后方位置,而与后车和目标车道后车相比,目标车辆位于前方位置。用 F 和 R 2 个标签表示前方车辆和后方车辆,来解释复杂的相对关系。依照如上定义,目标车辆与周围每辆车的安全裕度可以描述为

$$S_i(t) = V_R(t) \cdot (\tau_1 + \tau_2) + \frac{[V_R(t)]^2}{2a_R(t)} - \frac{[V_F(t)]^2}{2a_F(t)} - D(t), (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

表1 判断激进型驾驶风格偏好客观指标

行为	描述
急加速/减速	车辆的加速度超过阈值(1.5, 3.5)或(-1, -5.5) m/s^2
急转弯	车辆速度超过 60 km/h 且车辆角速度在 $10 \sim 25$ ($^\circ$)/s
超速	车辆速度超过路段限速
频繁加速/减速	车辆加速度超过阈值 4 次, 阈值为 (0.25, 1.25) 或 (-0.25, -1.25) m/s^2

$$D(t) = x_F(t) - x_R(t) - L_F \quad (9)$$

式中: $V_R(t)$ 为在时间 t 时后车的速度; $V_F(t)$ 为在时间 t 时前车的速度; τ_1 为驾驶员响应时间; τ_2 为制动系统响应时间; $a_R(t)$ 为在时间 t 时后车的加速度; $a_F(t)$ 为在 t 时刻前车的加速度; $D(t)$ 为 2 辆车之间的相对间距; $x_F(t)$ 、 $x_R(t)$ 为前车和后车在 t 时刻的位置; L_F 为前车的长度。

制动系统响应时间也因制动踏板的力和速度的差异而有所不同,液压制动器的响应时间一般小于气压制动器。在分别研究了配备防抱死制动系统 (ABS) 和没有配备 ABS 的车辆制动参数后, SOKOLOVSKIJ^[15] 发现大多数日本和西方车辆的减速时间小于 0.2 s, 并保持在 0.1~0.2 s 的范围内。在紧急情况下, 驾驶员可能会快速而有力地踩制动踏板, 因此将 τ_2 设为 0.15 s。

关于驾驶员的感知制动反应时间, 当驾驶员完全了解制动信号的出现时间和位置时, 在识别信号后大约会在 0.70~0.75 s 将脚从油门移动至制动踏板; 对意料之外但常见的信号 (比如前车的刹车灯) 的响应时间约为 1.25 s; 而对于完全意外的事件的响应时间约为 1.5 s。这些时间在一定程度上还受到包括驾驶员的年龄、性别、认知能力和压力等其他因素的影响。本模型将 τ_1 设置为 1.25 s。综合式 (7)~(9), 将车辆交互效用函数表示为

$$u_{\text{mut}} = V_R(t) \cdot (\tau_1 + \tau_2) + \frac{[V_R(t)]^2}{2a_R(t)} - \frac{[V_F(t)]^2}{2a_F(t)} - D(t), \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

1.2 博弈跟驰模型建立

综合式 (1)~(10), 在跟驰驾驶场景中, 目标车辆与前车的驾驶效用函数表示为

$$U_i = z\sigma_{A_i}u_{\text{acc}} + w\sigma_{D_i}u_{\text{dec}} + v\sigma_{M_i}u_{\text{mut}}, \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (11)$$

式中: z 、 w 和 v 为驾驶员风格影响参数; σ_{A_i} 、 σ_{D_i} 和 σ_{M_i} 为博弈策略效用参数。

由于 IDM 模型在车辆受到干扰时, 仍然可以遵循速度限制和车距限制安全行驶, 故选择其作为车辆控制模型基础, 模型控制函数如下:

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = a_0 \left[1 - \left(\frac{v_i(t)}{v_c} \right)^\varphi - \left(\frac{s^*(v_i(t), \Delta v_i(t))}{s_a} \right)^2 \right] \quad (12)$$

$$s^*(v_i(t), \Delta v_i(t)) = s_0 + Tv_i(t) + \frac{v_i(t) \cdot \Delta v_i(t)}{2\sqrt{a_0 b}} \quad (13)$$

$$s_a = x_{i-1}(t) - x_i(t) - l \quad (14)$$

式中: a_0 为车辆最大加速度; $v_i(t)$ 为车辆 i 在 t 时刻的速度; v_c 为期望速度; φ 为加速度指数, 通常取 4; s_a 为车辆 i 与前车的实际间距; s^* 为车辆 i 与前车的理想间距; s_0 为在拥堵条件下车辆之间的最小安全距离; T 为安全车头时距; $\Delta v_i(t)$ 为车辆 i 与前车在 t 时刻的速度差; b 为舒适减速度; $x_i(t)$ 、 $x_{i-1}(t)$ 分别为车辆 i 、 $i-1$ 在 t 时刻的位置; l 为车辆长度。

为能使 IDM 模型更好地描述博弈过程, 在考虑前车的位置、速度、加速度的基础上, 引入车辆影响系数 m_j , 其中 $j=1, 2$, 表示多前车对目标车辆的不同影响程度, Δx_{i-j+1} 为相邻车辆间距, $v_{i-1}(t)$ 和 $v_{i-2}(t)$ 分别表示多辆前车在 t 时刻的速度。在 t 时刻, 多前车与目标车辆的间距 $S_{i-j+1}(t)$ 和速度差 $V_{i-j+1}(t)$ 可表示为

$$S_{i-j+1}(t) = \sum_{j=1}^2 m_j (x_{i-j+1}(t) - x_{i-j}(t)) - l = \sum_{j=1}^2 m_j \Delta x_{i-j+1}(t) - l \quad (15)$$

$$V_{i-j+1}(t) = \sum_{j=1}^2 m_j \Delta v_{i-j+1}(t) = [m_1(v_i(t) - v_{i-1}(t)) + m_2(v_{i-1}(t) - v_{i-2}(t))] \quad (16)$$

考虑到目标车辆与前车的博弈关系, 将前车加速度与效用函数的乘积作为目标车辆加速度修正值, 综合式 (1)~(16), 贝叶斯博弈跟驰模型如下:

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = a_0 \left[1 - \left(\frac{v_i(t)}{v_c} \right)^\varphi - \left(\frac{s_0 + Tv_i(t) + \frac{v_i(t) \cdot \sum_{j=1}^2 m_j \Delta v_{i-j+1}(t)}{2\sqrt{a_0 b}}}{\sum_{j=1}^2 m_j \Delta x_{i-j+1}(t) - l} \right)^2 \right] + U_i a_{i-1}(t) \quad (17)$$

2 实验验证

2.1 数据准备

为校准贝叶斯跟驰模型并验证模型有效性,选用 CitySim 数据集,该数据集来源于佛罗里达大学智能与交通安全实验室,项目通过对无人机航拍视频进行增强误差过滤,使用 Mask R-CNN 和 CRST 的集成算法针对车辆对象跟踪检测,保证轨迹数据提取质量。本实验对于跟驰行为数据的提取规则如下:目标车辆前方存在其他车辆,目标车辆与前方车辆车头间距不大于 150 m,目标车辆满足以上状态并持续时间不小于 20 s。共收集 1200 个跟驰片段,过滤除去无效数据,剩余有效数据 1132 段,选择 1002 个片段作为训练集,130 个片段作为验证集。使用神经过程(NP)对模型进行训练,训练过程在下节进行详细叙述。

2.2 实验过程

超参数设置:采样点数 N 为 5000,最大迭代次数 M 为 500,确定接受样本阈值 ϵ 为 0.01,拟合检验分布的最小接受样本数 n_{\min} 为 100,确定收敛的接受样本百分比为 95%。

NP 架构与训练设置如图 1 所示,由于 NP 中的编码器包含确定性路径和潜在路径,因此相应定义确定性编码器和潜在编码器。确定性编码器包含 3 个隐藏层,其中每层都有 128 个神经元,2 个输出层,每层具有 5 个神经元;潜在编码器包含 2 个隐藏层和 2 输出层,2 个隐藏层各有 5 个神经元,2 个输出层各有 1 个神经元,分别输出一维的潜在变量 μ 和 σ 。解码器包含 3 个隐藏层,其中每层都有 128 个神经元,2 个输出层,每层有 1 个神经元。在训练过程中,选择 Adam 作为优化器,学习率初始化为 0.001,每迭代 50 次学习率下降 90%,训练迭代数设置为 200。

2.3 模型效果评价

为了验证本模型的可行性,采用 SUMO 微观交通流模拟程序。模拟道路为双车道城市道路,总长度为 1000 m,限速设置为 120 km/h。针对所选择的每个跟驰车对,使前车以与数据集相同的速度行驶,目标车辆以基于贝叶斯博弈跟驰模型生成的加速度行驶,采样时间间隔设定为 0.1 s。在交通风险量化的相关研究中,碰撞时间(TTC)是一种经典的风险指标,解释为:2 辆车以当前的速度行驶,将会发生碰撞的时间,数值越大表示越安全。与其他传统风险指标相比,TTC 具有计算相对简单而且应用广泛的优势,故本实验将其作为其中一项验证指标。

如图 2,棕色虚线表示的是目标车辆的实际情况,蓝色虚线表示的是目标车辆经过贝叶斯博弈跟驰模

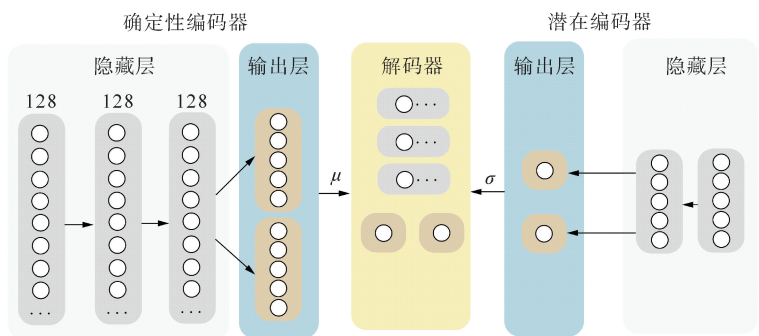


图1 神经过程架构

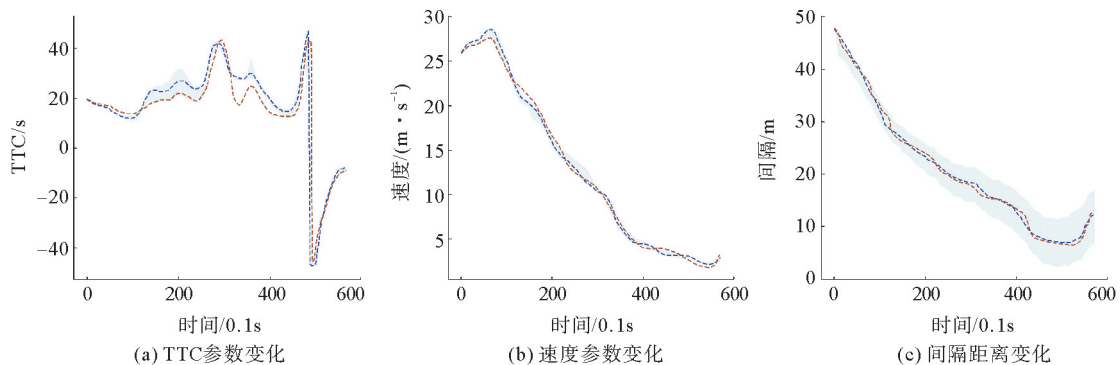


图2 跟驰模型与实际情况对比

--- 模型; --- 实际

型选择的模拟行驶情况,蓝色区域表示的是由博弈行为集合形成的行驶情况域。需要解释的是,由于篇幅有限,只选择一对具有跟驰关系的车辆(ID为9953与10021)进行说明,为了更好地展示图像细节将TTC值限制在 $-50\sim 50$ s,即当TTC大于50 s时,令TTC为50 s;当TTC小于 -50 s时,令TTC为 -50 s。从图3中模型与实际情况在TTC、速度、与前车间距三方面的行驶情况对比中可以看出,贝叶斯博弈跟驰模型所模拟的跟驰行为符合人类驾驶员的驾驶习惯。如表2所示,对于TTC,模型模拟与实际情况的平均值分别为6.736与6.118。为了验证结果的准确性,使用曼-惠特尼-威尔科克森(MWW)方法检验,结果表明置信水平为0.5%,可以认为,贝叶斯博弈跟驰模型适应于驾驶员对于驾驶安全性的一般需求。

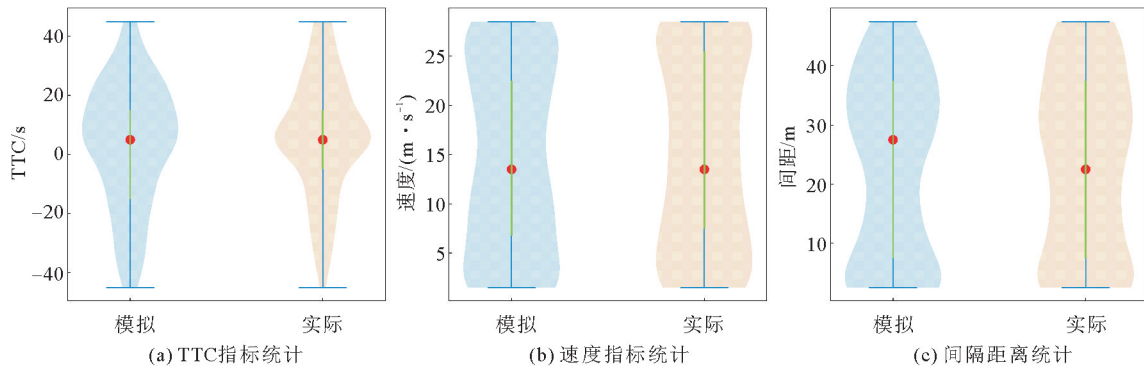


图3 跟驰模型与实际情况指标统计对比

● 中位数; — 四分间距

表2 指标统计对比结果

项目	TTC/s		速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		间距/m	
	模拟	实际	模拟	实际	模拟	实际
均值	6.736	6.118	14.638	15.026	22.882	23.462
中值	5.628	4.325	13.452	13.988	27.351	22.692
标准差	21.283	20.130	9.575	9.645	15.253	15.253

图4展示了模型中不同驾驶行为风格驾驶员的驾驶情况与实际驾驶情况对比。激进型驾驶员的速度较为不稳定,尤其在模拟过程前期,斜率明显大于实际情况与非激进型驾驶员。由于激进型驾驶员在模拟过程中速度较高,因此当前车减速时,间距小于另外两种情况。此外还发现由于速度较高,激进型驾驶员的TTC普遍小于非激进型驾驶员。可以看出较大的加速度、较小的间距、较小的TTC是激进型驾驶员的普遍特征,且贝叶斯博弈跟驰模型可以识别驾驶员的驾驶行为风格并模仿。

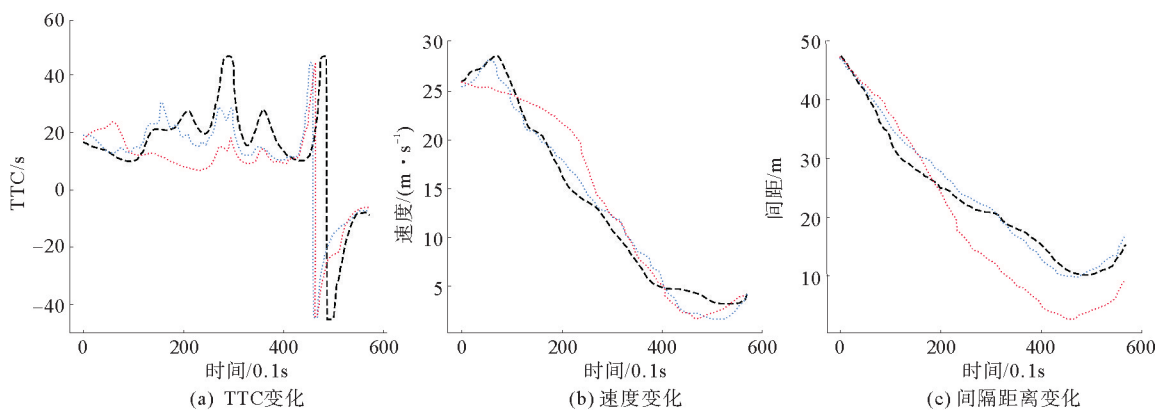


图4 不同驾驶风格对于跟驰模型的影响

--- 实际; 非激进型; 激进型

除了从微观角度进行相关参数分析外,还从宏观角度分析了交通流波动的演变,从而证明贝叶斯博弈跟驰模型的性能。图 5(a)为 CitySim 数据集中记录的交通波动,范围为 Freeway B 第二车道,距离为 5 km,时间为 100 s。贝叶斯博弈跟驰模型在模拟过程中,如图 5(b),较为准确地重现了此交通波动,此外模型还捕捉到了许多短暂的交通波动,其精度与微观角度分析水平一致,而传统的车辆跟驰模型很难达到这样的效果。为验证贝叶斯博弈跟驰模型是否可以模拟多车道车辆的跟驰行为,选择数据范围为 Freeway B 六车道,距离为 5 km,时间为 100 s,将数据集中六车道实际车辆轨迹(图 6(a))与模拟六车道跟驰轨迹(图 6(b))进行比较。可以看出模型在车辆轨迹-速度方面可以较好地拟合实际情况,且可以促进未来智能网联环境中 CAVs 队列的形成,从而提高交通容量和交通效率。

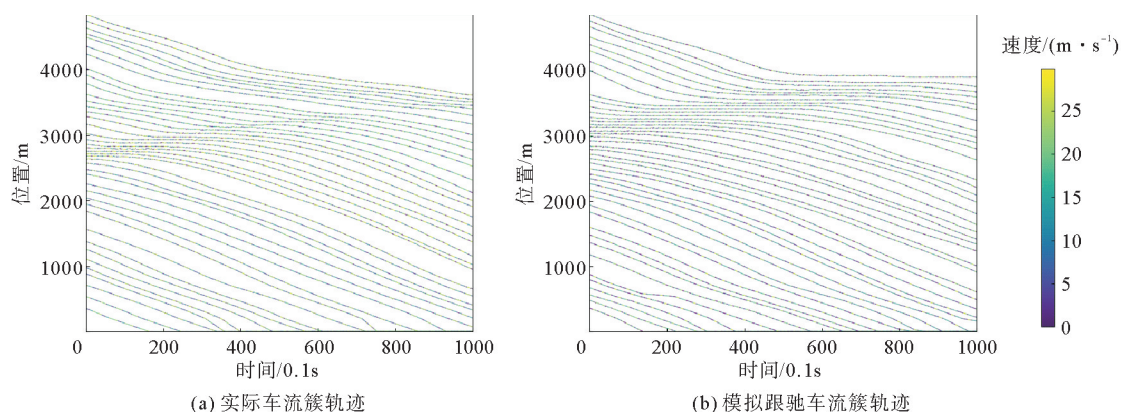


图5 车流簇轨迹

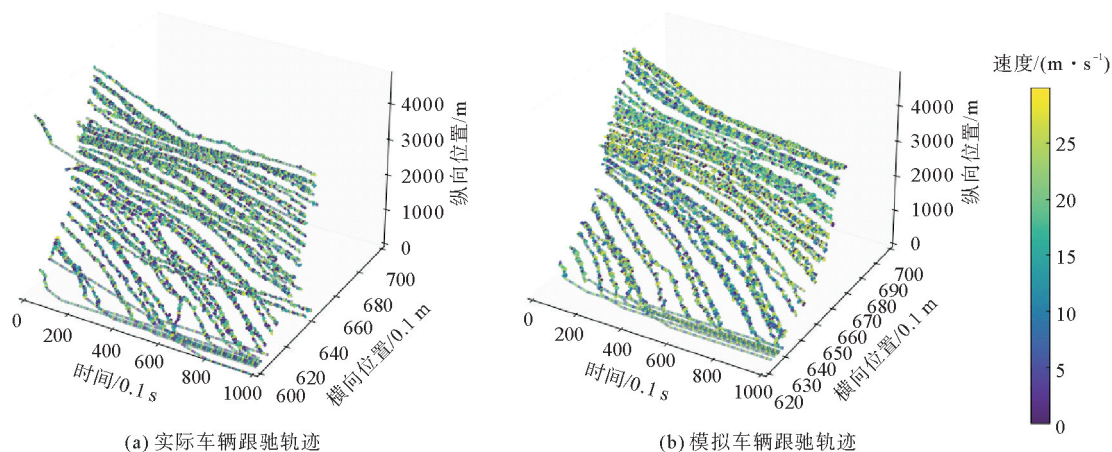


图6 多车道车辆跟驰轨迹

3 结束语

提出了一种基于贝叶斯博弈的车辆跟驰模型,有助于定义不同交通场景下驾驶员类型和动作概率分布对驾驶员效用的聚合影响。模型结合了驾驶舒适性、安全裕度等参数,分析驾驶员决策机理,结合加速度与安全裕度效用函数,优化 IDM 跟驰模型,建立贝叶斯博弈跟驰模型。在 CitySim 数据集的基础上,使用神经过程方法对模型进行校准,运用 SUMO 软件对建立的模型进行有效性验证分析。

结果显示,贝叶斯博弈跟驰模型所模拟的微观跟驰行为符合人类驾驶员的驾驶习惯,在宏观角度可以重现单车道与多车道的交通流波动演变,提高交通容量与交通效率。为后续网联新型混合车流的车辆轨迹规划相关研究提供理论基础。在此基础上,还需要在未来的研究工作中对驾驶风格进行更加详细地分类,以便探究驾驶风格和车辆之间的相互作用机理。

参考文献(References):

- [1] VON NEUMANN J, MORGENSTERN O. Theory of games and economic behavior[M]. Princeton; Princeton University Press, 1944.
- [2] WANG M, HOOGENDOORN S P, DAAMEN W, et al. Game theoretic approach for predictive lane-changing and car-following control[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 58: 73-92.
- [3] ZHANG Q Y, LANGARI R, TSENG H E, et al. A game theoretic model predictive controller with aggressiveness estimation for mandatory lane change[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020, 5(1): 75-89.
- [4] 戴守晨, 曲大义, 王其坤, 等. 信号交叉口上游路段网联车换道博弈特性及模型[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4408-4416.
DAI Shouchen, QU Dayi, WANG Qikun, et al. Characterization and model of connected and automated vehicles lane changing game on upstream sections of signalized intersections[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(10): 4408-4416.
- [5] 张可琨, 曲大义, 宋慧, 等. 自动驾驶车辆换道博弈策略分析及建模[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2023, 20(2): 60-67.
ZHANG Kekun, QU Dayi, SONG Hui, et al. Analysis and modeling for lane-changing game strategy of autonomous vehicles[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2023, 20(2): 60-67.
- [6] 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.
- [7] 陈秀锋, 赵凤阳, 王成鑫, 等. 基于动态安全车距的车辆跟驰模型及稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 2105-2110.
CHEN Xiufeng, ZHAO Fengyang, WANG Chengxin, et al. Car-following model and stability analysis based on dynamic safety distance[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(5): 2105-2110.
- [8] 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.
- [9] 曲大义, 黑凯先, 郭海兵, 等. 车联网环境下车辆换道博弈行为及模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(1): 101-109.
QU Dayi, HEI Kaixian, GUO Haibing, et al. Game behavior and model of lane-changing on the internet of vehicles environment[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(1): 101-109.
- [10] YIN J L, CHEN B H, LAI K H R. Driver danger-level monitoring system using multi-sourced big driving data[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation, 2019, 21(12): 5271-5282.
- [11] 周申培, 李浩然, 雷德明, 等. 基于驾驶舒适度的刹车策略[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2020, 34(5): 470-474.
ZHOU Shenpei, LI Haoran, LEI Deming, et al. Braking strategies based on driving comfort[J]. Journal of University of Jinan(Science and Technology), 2020, 34(5): 470-474.
- [12] HOBEROCK L L. A survey of longitudinal acceleration comfort studies in ground transportation vehicles[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1977, 99(2): 76-84.
- [13] KSANDER N D W, TUGRUL L, RIENDER H, et al. Standards for passenger comfort in automated vehicles: Acceleration and jerk[J]. Applied Ergonomics, 2023, 106: 103881.
- [14] NILSSON R. Safety margins in the driver[D]. Uppsala; Uppsala University, 2001.
- [15] SOKOLOVSKIJ E. Automobile braking and traction characteristics on the different road surfaces[J]. Transport, 2007, 22(4): 275-278.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)

(上接第86页)

- [14] 谢广录, 范卫东, 徐宾, 等. 天然气炭黑燃烧特性的热天平研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(5): 521-526.
XIE Guanglu, FAN Weidong, XU Bin, et al. Thermal balance study of carbon black combustion characteristics of natural gas[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(5): 521-526.
- [15] 肖立柏, 薛永强, 卢璋. 纳米碳酸钙的粒度对热分解活化能的影响[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(5): 469-472.
XIAO Libai, XUE Yongqiang, LU Zhang. Effect of particle size of nanosized CaCO₃ on the activation energy of the thermal decomposition[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2009, 40(5): 469-472.
- [16] CUI A S, LIU S S, GE B X, et al. Modified-FWO-Algorithm for complex "White-Box" thermal kinetic model: A case application on amphotericin residue incineration[J]. Applied Mathematics, Modeling and Computer Simulation, 2022, 30: 718-727.
- [17] QI Y F, GE B X, CAO Q, et al. Application of sectionalized single-step reaction approach (SSRA) and distributed activation energy model (DAEM) on the pyrolysis kinetics model of upstream oily sludge: Construction procedure and data reproducibility comparison[J]. Science of the Total Environment, 2021, 774: 145751.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)