

基于势场理论的路口区域车辆群体安全模型

武彪¹, 朱西产¹, 马志雄¹, 林瑜²

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 上海金桥智能网联汽车发展有限公司, 上海 201206)

摘要: 群体安全是车路协同环境下智能网联汽车研究的重要组成部分。在具有强结构和弱规则特性的路口区域, 车辆行驶的群体安全表征可以提高路口区域安全性。首先, 基于势场理论构建车辆势能场模型, 通过边界势能、车辆势能、速度势能对单一车辆行为进行安全泛化表征; 然后, 通过势能场密度等高线分布特性构建群体车辆安全特征参数和边界范围; 最后, 采用自然驾驶数据进行虚拟仿真, 结果显示, 路口区域直行、左转、右转等场景下的车辆群体安全势能阈值为 2 500, 并且安全势能周期性变化规律与交通信号相位变化规律一致, 表明所建模型可以准确表征路口区域群体车辆的行为和安全状态, 从而验证了路口区域车辆群体安全模型的正确性与有效性。

关键词: 智能网联汽车; 群体安全; 自然驾驶; 势场理论

中图分类号: U471.3

文献标志码: A

Intersection Vehicle Group Safety Model Using Potential Field Theory

WU Biao¹, ZHU Xichan¹, MA Zhixiong¹, LIN Yu²

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Jinqiao Intelligent Connected Automobile Development Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: Group safety is an important part of intelligent connected vehicle research in the vehicle-infrastructure cooperation environment. In the intersection area with strong structure and weak rule characteristics, the group safety characterization of vehicle driving can improve the safety of the intersection area. Firstly, the vehicle potential field model is constructed based on potential field theory, and the safety generalized characterization of individual vehicle driving behaviors in the intersection area is represented by boundary potential energy, vehicle potential energy, and speed potential energy; then the parameters and boundary range of group vehicle safety characteristics in the intersection area are constructed based on contour distribution characteristics of the

potential energy field density; finally, through the simulation of natural driving data, the results indicate that the threshold value of the safety potential energy of the vehicle group in the straight forward, left turn, right turn scenarios is 2500, and the periodic change law of group safety potential energy is consistent with the phase change law of traffic signals, indicating that the model can accurately represent the behavior and safety state of the intersection vehicles, thus verifying the correctness and effectiveness of the intersection vehicle group safety model.

Key words: intelligent vehicle; group safety; natural driving study; potential field theory

与其他道路设施相比, 由于复杂的交通环境、频繁的交通信号和无法预期的交通违法行为, 路口区域被认为是道路交通环境最危险的区域^[1-2]。根据美国国家公路交通安全治理局(NHTSA)的统计数据, 美国每年超过 30% 上报的交通事故和 50% 的人员致命及受伤交通事故发生在路口区域^[3-4]。车辆路口区域通行包含两大挑战: 首先, 由于路口区域的交通共享驾驶特性, 无法在现实路口区域为每一个通行车辆规划物理车道线^[5]; 其次, 路口区域的驶入车道和驶离车道的数量通常不一致^[6], 使车辆在路口区域大概率通过切入操作以保证通行顺从, 进而导致自动驾驶汽车轨迹规划难度增加, 尤其是在交通拥堵时段。因此, 针对路口区域交通优化问题, Rinaldi 等^[7]采用基于次优滑模型引导方案, 使自动驾驶汽车自动调节速度和航向角, 实现路口区域自动驾驶汽车跟车行驶; 蔡建荣等^[8]通过粒子群优化算法对可变车道混合双层规划模型进行优化, 提高路口区域主干交通流方向上的道路通行能力; Mao 等^[9]通过构建智能协同车辆基础设施系统开发实时动态可

收稿日期: 2023-03-10

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2501201)

第一作者: 武彪(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能网联汽车安全分析。E-mail: biao.wu@tongji.edu.cn

通信作者: 马志雄(1978—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为智能网联汽车主被动安全测试评价。mzx1978@tongji.edu.cn

逆车道方案,降低路口区域车辆的延误时间;Ma等^[10]提出新的基于交通流后端压力的信号优化方法,最大限度地提高路口区域交通网络吞吐量并保证交通网络的稳定性。

车联网(V2X)通信技术在提高道路安全和交通效率方面具有巨大潜力,因此被认为是构建智能交通系统(intelligent transport system, ITS)的关键技术^[11-12],其中包含车对车(V2V)、车对行人(V2P)、车对基础设施(V2I)车路协同感知、决策、控制等技术。针对车路协同环境下路口区域交通安全研究,Lefevre等^[13]通过模拟不同的路口区域交通场景,研究了隐私策略对路口区域防撞(intersection collision avoidance, ICA)系统的影响。Zhang等^[14]采用了基于交通信号优先(transit signal priority, TSP)控制策略的V2X技术来提高单一路口区域交通系统的反馈速度及可靠性。Wu等^[15]用可靠性框图(reliability block diagram, RBD)分析了ICA系统中基于V2X网联协同驾驶的可靠性。

上述研究更多关注的是V2X通信环境下路口区域交通系统的性能及可靠性,同时,V2X技术满足交通参与者的运动状态数据实时传输的需求,可用于分析和评估路口区域的群体安全。路口区域群体安全相关研究不仅在微观层面可以增强路口区域交通参与者的安全性,而且在宏观层面能够提升路口区域的交通通行效率,可实现车路协同环境下智能网联汽车创新应用的落地。现阶段缺少交通参与者群体安全的相关研究,交通参与者的安全研究基本采用切片式的场景进行分析评价,其中路口区域车辆安全根据场景分为跟车场景、编导场景、切入场景,通常由车辆的动态参数(速度、加速度、偏航率、制动压力等)和不同场景的特征参数(碰撞剩余时间(time to collision, TTC)、距离前车时间(time headway, THW)、车辆侵入时间差(estimating post encroachment time, EPET)等)来描述和估计,特征及参数复杂多样,缺乏具有通用性的路口区域群体安全表征模型。根据对交通系统相关的研究表明,势场理论可用于表征车辆群体行为。Michael等^[16]研究了车辆势场模型架构,用于协助自动驾驶汽车在包含匝道出入口的多车道交通密集高速公路上行驶。Ni等^[17]提出了一个交通势场理论,着眼于高速公路微观交通流量模型构建。王建强等^[18]从场论出发,构建了一个关于驾驶风险场的统一模型,用于表示由驾驶员、车辆、道路引起的驾驶风险。李林恒等^[19]利用安全势场理论,建立了网联自动驾驶汽车

(connected autonomous vehicle, CAV)在直线道路上的跟车和变道模型。

以上研究选择道路边界和行驶车道线来构建覆盖少量交通参与者的直道路段势场模型,并且由于路口区域非物理的车道线和周期变化的交通信号,上述研究的势场方法并不适合用于路口区域群体安全评价。因此,本研究基于势场理论提出路口区域安全势能场方法,构建安全势能场模型及边界阈值,综合真实的自然驾驶数据开展路口区域车辆群体安全评价研究。

1 研究方法

与直道区域相比,路口区域具有道路设施固定明确、通行轨迹复杂多样、交通信号周期复现等交通特征。路口区域交通冲突包括轨迹冲突和拥堵冲突,如图1所示:(a)轨迹冲突发生在不同车辆轨迹的汇合区域,(b)拥堵冲突发生在路口区域后方车辆超过前方低速行驶车辆的时刻。在没有物理车道线的情况下,路口区域的车辆通行受交通法规约束的限制较少,因此驾驶员可以在路口区域采取更激进的驾驶操作,特别是处于路口交通拥堵的时段。

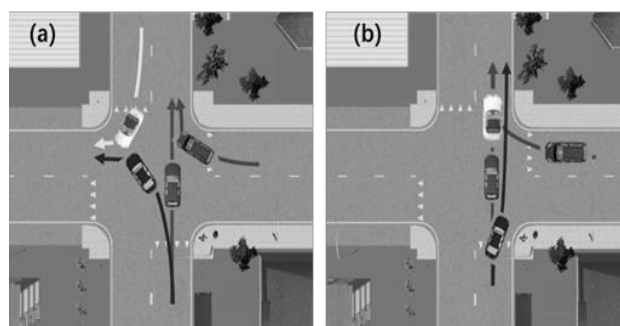


图1 路口区域车辆轨迹冲突(a)和拥堵冲突(b)

Fig.1 Intersection trajectory conflict (a) and congested conflict (b)

路口区域车辆正常通行过程中,车辆通行速度提高到目标速度(如限速),并跟随前车的轨迹行驶。当接近同一行驶方向的另一车辆时,如果前方车辆速度较慢且邻近区域无其他交通参与者,车辆会超越前方慢速车辆;或者车辆已接近限速或处于交通拥堵,将降低车辆速度以安全保持距离跟随前方慢速车辆。在任何正常驾驶情况下,车辆都不应该驶离路口区域道路边界或与其他车辆发生碰撞。

为路口区域普适性研究的需要,假设一个十字路口交叉路口区域,包括路口结构,车道布局,交通信号

周期以及所有车辆情况。

为了势能场模型构建需要建立一个路口区域坐标系。其中 y 方向与双向道路分界线对齐, x 方向与 y 方向垂直;路口区域坐标系的原点设置在停止线上。车辆驾驶方向、驶入车道和驶离车道的特征由参数 k 、 m 和 n 分别定义,如图2所示。

总势能 E 由边界势能、车辆势能以及速度势能组合而成,每个势能用于表征路口区域车辆通行的不同特征状态。其中, E_{boundary} 用于表征车辆距离路口区域边界状态, E_{vehicle} 用于表征车辆之间的距离状态, E_{velocity} 用于表征车辆的速度状态,如式(1)所示。

$$E = E_{\text{boundary}} + E_{\text{vehicle}} + E_{\text{velocity}} \quad (1)$$

1.1 路口区域动态地图

区别于基于智能传感器感知信息的自主式自动驾驶汽车,智能网联汽车采用本地动态地图(local dynamic map, LDM)实时获得车路协同环境下的交通参与者运动状态信息。LDM由欧洲电信标准协会制定标准,以实现对地图信息和车辆信息的综合管理,根据数据的特点将其划分为不同层次,从而管理ITS系统中包含的数据。

$$\begin{bmatrix} Li_1^1 & \cdots & Li_1^{m_1} & Ri_1 & \cdots & Li_k^1 & \cdots & Li_k^{m_k} & Ri_k \\ Ni_1^1 & \cdots & Ni_1^{m_1} & Nr_1 & \cdots & Ni_k^1 & \cdots & Ni_k^{m_k} & Nr_k \\ Lo_1^1 & \cdots & Lo_1^{n_1} & Ro_1 & \cdots & Lo_k^1 & \cdots & Lo_k^{n_k} & Ro_k \\ No_1^1 & \cdots & No_1^{n_1} & No_1 & \cdots & No_k^1 & \cdots & No_k^{n_k} & No_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: Li 和 Lo 代表驶入车道和驶离车道; Ri 和 Ro 表示驶入车道和驶离车道的边界; Ni 和 No 为驶入车道和驶离车道的停止线节点, k 表示路口区域交汇道路的数量, m 和 n 表示驶入车道和驶离车道的车道

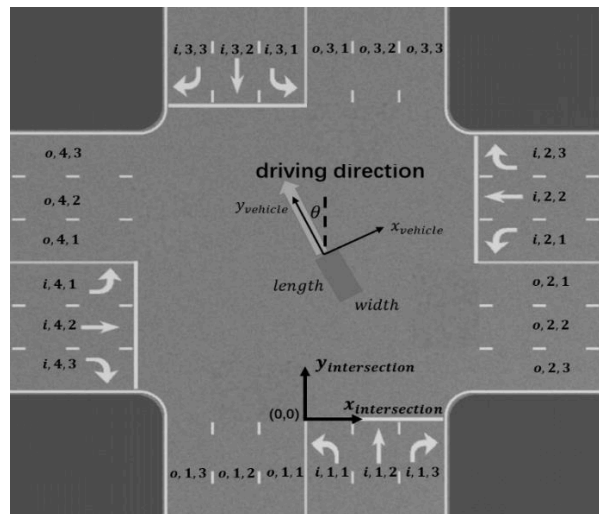


图2 路口及车辆设置

Fig.2 Intersection and vehicle assumption

针对车辆群体安全的研究需求,路口区域的LDM应包括车道属性数据、交通信号相位数据和车辆动态运行数据。路口区域的车道属性由驶入-驶离车道停止线节点和各方道路边界构成数据矩阵,如式(2)所示。

数量。

路口区域交通信号相位由每个方向的直行(straight forward, SF)、左转(turn left, TL)和右转(turn right, TR)构成数据矩阵,如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} SP_1^{SF} & SP_2^{SF} & \cdots & SP_{k-1}^{SF} & SP_k^{SF} \\ SP_1^{TL} & SP_2^{TL} & \cdots & SP_{k-1}^{TL} & SP_k^{TL} \\ SP_1^{TR} & SP_2^{TR} & \cdots & SP_{k-1}^{TR} & SP_k^{TR} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:SP代表二进制交通信号相位情况,包括1-active和0-deactive;SF、TL、TR是路口区域交通信号的3种类型; k 表示路口区域交汇道路的数量。

车辆动态运行情况由车辆ID、驶入车道编号和特性、相对位置、速度和航向角等参数构成数据矩阵,如式(4)所示。

$$[ID \quad k \quad m_k \quad Li_f \quad X_{\text{relative}} \quad Y_{\text{relative}} \quad V \quad \theta] \quad (4)$$

式中: k 表示路口区域交汇道路的数量; m_k 表示驶入道路的车道数; Li_f 是指驶入车道的特性(1-SF, 2-TL, 3-TR); X_{relative} 和 Y_{relative} 表示交叉口坐标系的相对位置; θ 表示车辆轨迹的航向角。

1.2 边界势能

边界势能在路口区域边界上设定为无穷大以防

止车辆驶离路口区域。路口区域边界线根据场景分为直行、左转、右转3类。直行场景边界线是由直行驶入车道和驶出车道停车线节点连线构成。左转场景边界线是由驶入车道停止线、驶出道路边界、对向驶入道路停止线、同向驶出道路停止线节点连线构成。右转场景边界线是由右转驶入车道停止线和入路车道和驶出道路停止线节点连线构成的,上述场景边界如图3所示。

车辆边界势能特征为车辆在路口区域内边界势能为零,只有靠近路口边界范围时势能将呈指数级别增长,如图4所示。基于机器人运动规划中的排斥势构建车辆边界势能模型,如公式(5)所示。

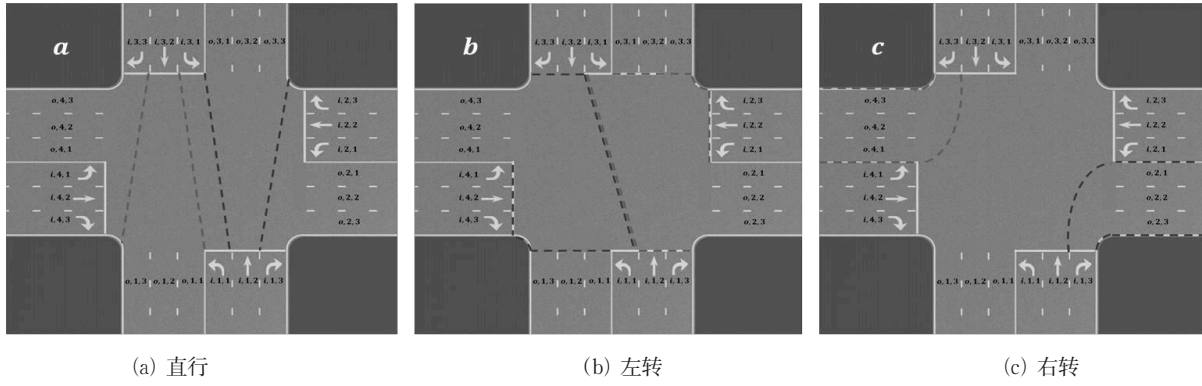


图3 路口区域直行、左转、右转场景边界

Fig.3 The intersection boundary of SF, TL and TR scenarios

$$E_{\text{boundary}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \omega \frac{1}{1 + e^{(d_i - \omega_{\text{width}}/2)^2}} \quad (5)$$

式中: ω 代表比例系数; d_i 表示车辆位置与路口 i 区

域边界的距离, $i \in [1, 2, \dots, n]$; n 表示路口区域边界线数量; ω_{width} 是车辆宽度。图4显示了路口区域 SF、TL、TR 场景的边界势能。

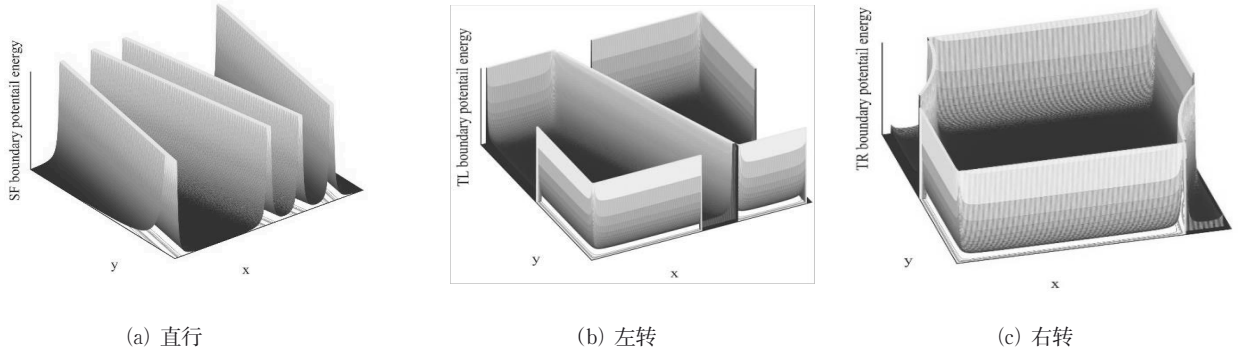


图4 路口区域直行、左转、右转场景势能边界

Fig.4 The intersection boundary potential energy of SF, TL and TR scenarios

1.3 车辆势能

一般来说,无论车辆采取何种驾驶行为,其目的都是为了在与其他车辆保持安全距离的情况下将车辆提升到理想速度或限速速度。以路口区域的超车场景为例,当车辆打算超车时,评估超车行为是否能成功的重要因素不是车辆本身,而是路口区域的空间环境和周边车辆的行驶状态。在正常的路口区域通行过程中,车辆之间虽然没有物理接触,但其驾驶状态会因位置和周围车辆驾驶状态的变化而改变,这表明有车辆之间有一种用于改变车辆驾驶状态的虚拟力。上述虚拟力被认为是一种短程力,可以通过 Yukawa 汤川势进行表征^[19]。

根据 Yukawa 汤川势能,车辆势能的应用是通过建立一个增加到无限强度的势能来保持车辆的安全距离,仿真其它车辆接近车辆的任何部分。因此,车辆势能包含动态势能和静态势能,基于车辆在交叉口区域的驾驶行为的考虑,如式(6)一(8)所示。

$$E_{\text{vehicle}} = C_{\text{dynamic}} \frac{e^{-\gamma K}}{K} + C_{\text{static}} \frac{e^{-\delta K}}{K} \quad (6)$$

$$C_{\text{dynamic}} = \partial(a \cdot v)^m \quad (7)$$

$$C_{\text{static}} = \beta(b \cdot v)^n \quad (8)$$

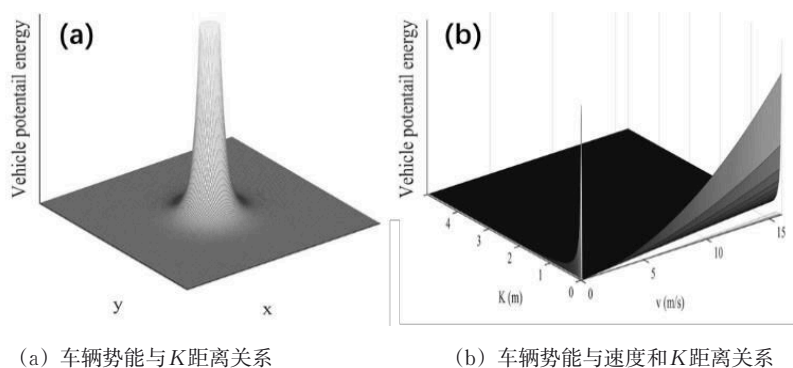
式中: C_{dynamic} 和 C_{static} 代表动势能和静态势能的系数; K 表示距车辆中心的距离; θ 表示车辆航向角; v 表示速度; a 和 b 是与速度相关的参数; ∂ 和 m 是与 C_{dynamic} 相关的参数; β 和 n 是与 C_{static} 相关的参数, γ 和 δ 是与 K 相关的参数。图5(a)表示车辆势能与 K 距离的相关性,图5(b)表示车辆势能与速度和 K 距离相关性。

1.3 速度势能

车辆速度势能的建立是为了表征速度对势能的影响,如式(9)所示。

$$E_{\text{velocity}} = \epsilon v^2 \quad (9)$$

式中: ϵ 代表车辆速度势能的系数; v 表示车辆速度。

图5 车辆势能与 K 距离分布Fig.5 The vehicle potential energy versus K distance

2 路口区域交通仿真模拟

在智能网联车路协同环境下,车辆运动信息可以实现车辆间和车路间的实时传输与共享,车辆可以根据这些交互信息进行路口通行的决策规划,路侧边缘计算节点可以根据车辆群体运动信息结合交通信号信息开展区域交通优化。

2.1 数据预处理

在传统路口区域下,车辆因为智能网联车路协同环境的缺失无法获得周边车辆具体的运动信息,但是会对其运动状态的变化非常敏感,尤其是在一些特殊场景下,例如在前车减速制动或者周边车辆切入等过程,虽然后车无法明确这些速度变化的具体数值,但是会根据自身对状态变化的敏感度进行相应的操作响应。

由于目前缺乏智能网联车路协同开放道路交通环境,无法为本研究提供智能网联车路协同环境下的车辆真实的行驶数据,但是可以通过对传统环境

下车辆行驶真实数据进行筛选,得到含有较多特殊场景的车辆群体路口区域通行的轨迹数据,因为这些数据能够在一定程度上表征车辆受运动信息影响而反映出的路口区域通行特征。

本研究在模型参数标定过程中所采用的数据来自“未来时代仿真”(Next Generation Simulation, NGSIM)项目数据集。NGSIM项目的目的是为了 提高仿真模拟的颗粒度和准确性,促进其在智能交通研究中的应用,增强交通模拟仿真的真实性。NGSIM项目的研究人员在美国加利福尼亚州洛杉矶 US 101、Lankershim Boulevard、加州 Emeryville I-80、乔治亚州亚特兰大 Peachtree Street 等道路采集道路交通数据,数据集为高空摄像头采取的纯轨迹数据。

图6显示了NGSIM路口区域 10 Hz 的车辆轨迹数据,该数据能够表征车辆路口区域通行的微观驾驶行为,可以为路口区域势能模型参数标定提供良好的数据支撑。



图6 NGSIM车辆在十字路口的轨迹视频数据

Fig.6 NGSIM vehicle trajectory video data of intersection

本研究选取了洛杉矶 Lankershim 大道上的 2 号路口区域的车辆轨迹数据,如图7所示。2号路口区域连接 4 个方向的交通流,包含 Lankershim Boulevard、Universal Hollywood drive、Campo De

Cahuenga way 等道路,每个方向有 3 到 4 条干道。车道编号是从最左边的车道开始递增。

由于原始数据为 Lankershim 大道整体交通数据,包换 4 个路口区域和 1 个高速匝道的车辆轨迹数

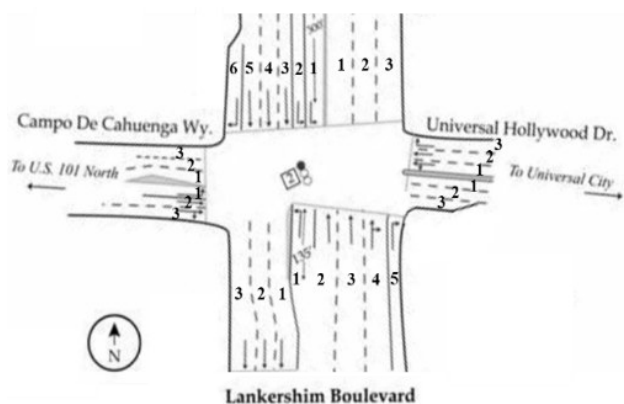


图7 交叉口2车道标注示意图

Fig.7 Intersection 2 schematic with lane marking

据,因此,在使用该数据进行研究之前,有必要先对原始数据进行一些预处理工作。

在进行预处理工作时,首先需要对数据进行筛选。根据每条数据的信息,进行一些条件的限制来提取2号路口区域的所有车辆通行数据。通过观察NGSIM数据集字段可以发现,NGSIM数据集包括车辆ID、车辆X轴位置、车辆Y轴位置、车辆速度、车辆加速度、车辆所在车道ID、车辆起点区域ID、车辆终点为区域ID、路口区域ID、路段区域ID、车辆运动行为及行驶方向等字段,即NGSIM数据集已经提供了每辆车完备的运动信息。因此通过具有关联性的数据筛选处理即可获得Lankershim大道2号路口区域的车辆轨迹数据。首先,通过车辆起点和终点区域ID,筛选出通行该路口区域的车辆ID;其次,通过路段区域ID和路口区域ID筛选对应车辆ID的通行数据,包括速度、加速度、车道ID、运动行为、行驶方向等数据;最后,为保证路口区域群体车辆势能表征的统一性,将相同时刻的预设路口区域范围内车辆轨迹数据进行实时关联。

通过筛选整理,一共得到了32 min连续的路口区域交通数据,包含2 753辆车的轨迹数据,其中直行车辆1919辆,左转车辆496辆,右转车辆338辆。这些车辆轨迹数据均表征正常完整的路口区域行驶状态,没有违反交通法规的路口区域行驶状态,例如路口区域闯红灯及左转车道直行等情况。

2.2 路口区域势能模型参数设置

路口势能模型的参数设置是指通过相应的方法综合路口区域车辆通行数据具体化模型中的待定参数,使路口势能模型从概念理论向实际应用的转化,同时精准的参数标定能够提高模型的普适性,防止出现模型失真。

路口区域势能模型将车辆与环境进行耦合,为了研究路口势能模型的有效性,如图8所示,将车辆运动简化模拟为具有强阻尼的全向受力刚体,基于车辆安全性、稳定性、操控性势能状态表征的考虑,采用李雅普诺夫方法(Lyapunov Method)^[20],将路口势能模型参数设置如表1所示。

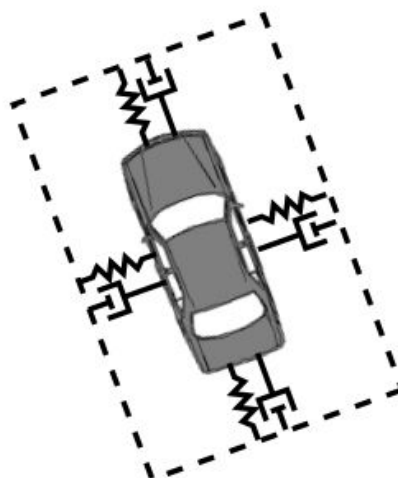


图8 车辆模拟阻尼示意图

Fig.8 Vehicle virtual damper schematic

表1 路口区域势能模型参数设置

Tab.1 Setup of intersection potential model parameter

势能	参数	数值
E_{boundary}	ω	6 400
	a	4
	b	4
	∂	0.01
	β	0.01
E_{vehicle}	ω	6 400
	m	2
	n	7.5
	γ	0.25
	δ	0.25
E_{velocity}	ϵ	6

3 结果与讨论

3.1 路口区域群体势能

根据势能公式,可以得到单车的势能。为了表示群体车辆的安全性,群体车辆的空间势能分布通过路口区域内群体车辆实时势能的等高线来计算。图9—图11显示了直行、左转、右转3种场景群体车辆势能的空间分布。

此外,群体车辆安全势能由群体车辆中单车最大势能表征。图12显示了路口区域直行、左转、右转等场景群体安全势能随时间的变化。

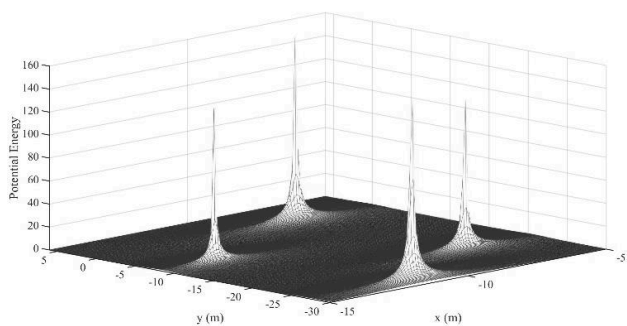


图9 路口区域直行场景群体势能等高线

Fig.9 The contour line of group potential energy for SF scenario

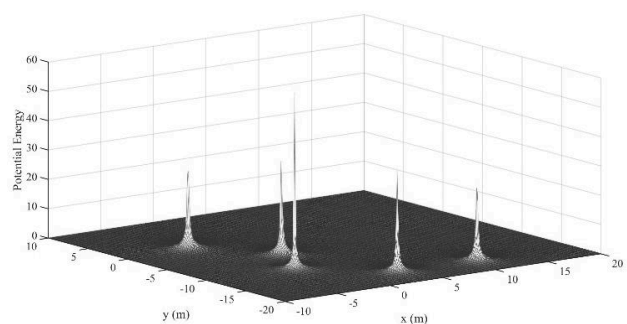


图10 路口区域左转场景群体势能等高线

Fig.10 The contour line of group potential energy for TL scenario

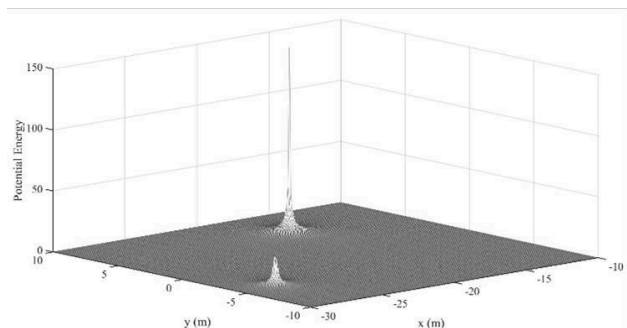


图11 路口区域右转场景群体势能等高线

Fig.11 The contour line of group potential energy for TR scenario

3.1 路口区域安全分析

影响车辆势能的主要因素有两个:位置和速度。如图4和图5(a)所示,车辆自身的位置影响车辆与路口区域边界线的距离,群体车辆位置影响势能的等高线分布。速度代表车辆的行驶情况,速度的增加会导致高势能。然而,当速度降低到几乎为零时,车辆作为障碍物应被等同视为路口区域边界,如图5(b)所示。

图9显示直行场景中,四辆车在路口区域直行。由于路口限速和周边空间距离促使所有车辆都能加

速到限速速度,因此具有相近的势能。

图10显示左转场景中,五辆车在路口区域左转。其中一辆车的轨迹靠近路口区域边界线,从而导致了极高的势能。

图11显示右转场景中,两辆车在路口区域右转。前车慢速右转通过性,类似于静态障碍物,因此其势能急剧上升。

图12结果表明路口区域的安全边界值为2 500。由南向北左转(south-north turn left, SNTL)场景的安全势能高于2 500的原因是路口区域由南向北左转时车辆由于路口区域道路结构的迫使车辆通常采取靠近路口区域边界的通行路径;由北向南右转(north-south turn right, NSTR)场景的安全势能高于2 500的原因为路口区域由北向南右转时由于只有一条右转车道,且Lankershim Boulevard道路右转车流量较大,造成部分时间段车辆右转排队拥堵,从而使NSTR场景的安全势能高于交叉路口区域的安全边界值。此外,直行、左转、右转场景的安全势能周期性变化规律与交通信号相位变化规律一致。图12表明,车辆群体安全势能在每个周期内先增加后减少,这与车辆在通过驶入道路停止线后加速和靠近驶出道路停车线减速的交通状况相关。图13表明路口区域势能总体变化,在数据采集期间,路口区域的交通处于安全状态。

4 结论

(1) 本文通过势场理论量化表征车辆路口区域通行的安全风险,构建路口区域车辆群体安全模型,实现复杂交通环境下的车辆安全评价,可以对车辆行为进行优化引导或干涉介入。

(2) 通过构建包含边界势能、车辆势能、速度势能的势能场模型,对单一车辆驾驶行为进行安全泛化表征,分析路口区域群体车辆势能场密度等高线分布特性,构建车辆群体安全特征参数和边界范围,采用自然驾驶数据进行仿真模拟,验证了路口区域车辆群体安全模型的正确性与有效性。

(3) 受限于试验条件和研究时间,本文得到的路口区域车辆群体安全模型并未进行实车验证,将在后续研究中将通过场地测试和开放道路测试等方法对路口区域车辆群体安全模型进行优化迭代。

(4) 本研究可以进一步扩展到不同道路结构的路口区域,有助于开展交通参与者群体安全相关的前瞻性研究。

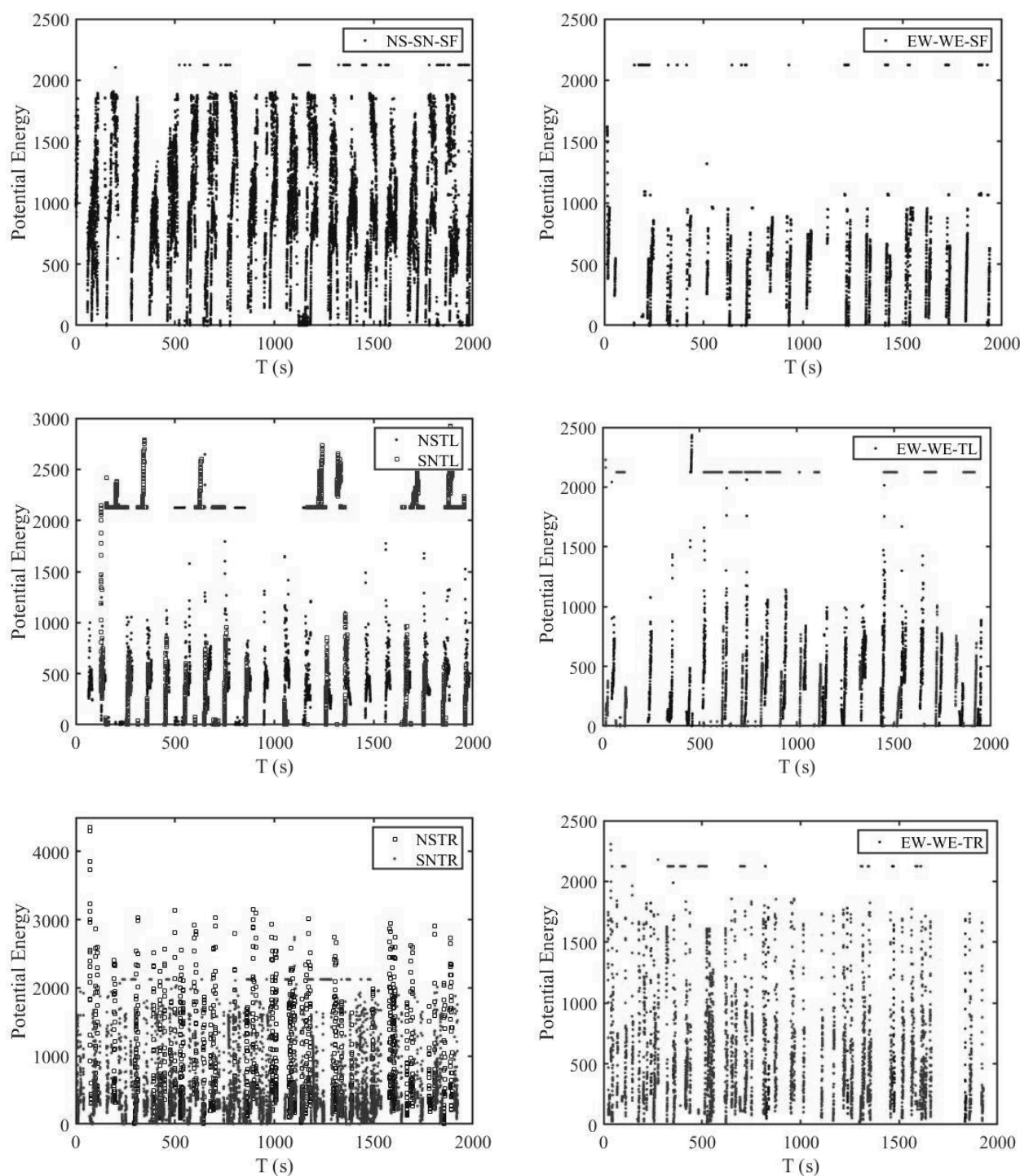


图 12 路口区域直行、左转、右转场景群体安全势能随时间变化

Fig.12 The group potential energy of SF, TL and TR scenarios correlated with time

参考文献:

- [1] Federal Highway Administration. The national intersection safety problem (FHWA-SA-10-005) [R]. Washington, D C: U.S. Department of Transportation, 2009.
- [2] YUAN J, ABDEL-ATY M. Approach-level real-time crash risk analysis for signalized intersections [J]. Accident Analysis

& Prevention, 2018, 119(10): 274.

- [3] Federal Highway Administration. About intersection safety [EB/OL]. (2020-08-18) [2022-10-16]. <https://safety.fhwa.dot.gov/intersection/about/index.cfm>.
- [4] Federal Highway Administration. Fatality analysis reporting system, 2004—2017 final file and 2018 annual report file [R]. Washington, D C: U.S. Department of Transportation, 2020.

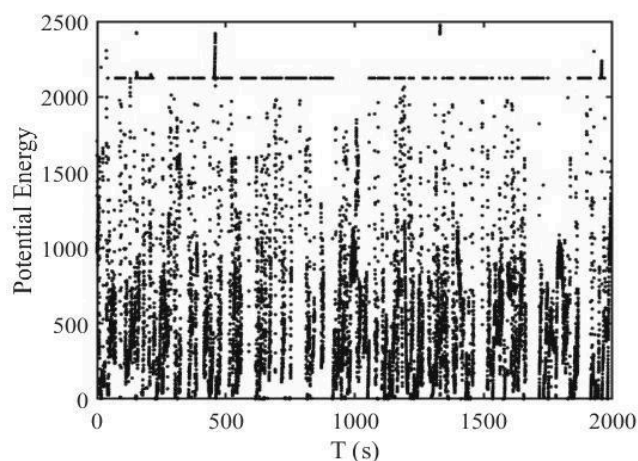


图13 路口区域群体安全势能随时间变化

Fig.13 Intersection potential energy correlated with time

- [5] United States Department of Transportation. Intersection Safety [EB/OL]. (2019-11-18)[2022-10-16]. <https://highways.dot.gov/research/researchprograms/safety/intersection-safety>.
- [6] Insurance Institute for Highway Safety. Highway loss data, fatality facts 2018 urban/rural comparison[EB/OL]. (2019-11-18) [2022-10-16]. <https://www.iihs.org/topics/fatality-statistics/detail/urban-rural-comparison>.
- [7] RINALDI G, MENON P P, EDWARDS C. Suboptimal sliding mode-based heading and speed guidance scheme for boundary tracking with autonomous vehicle [C]// 2021 American Control Conference. [S.l.]: [s.n.], 2021.
- [8] 蔡建荣, 黄汝晴, 黄中祥. 考虑通行能力折减的可变车道优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(7):1838.
CAI J R, HUANG R Q, HUANG Z X. Optimization of variable lane considering reduction of capacity [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(7): 1838.
- [9] MAO L, LI W, HU P, *et al.* Design of real-time dynamic reversible lane in intelligent cooperative vehicle infrastructure system[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020(2):1.
- [10] MA D, XIAO J, SONG X, *et al.* A back-pressure-based model with fixed phase sequences for traffic signal optimization under oversaturated networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 99: 1.

- [11] MOLINA-MASEGOSA R, GOZALVEZ J. LTE-V for sidelink 5G V2X vehicular communications: a new 5G technology for short-range vehicle-to-everything communications [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2017, 12(4):30.
- [12] CHEN S, HU J, YAN S, *et al.* Vehicle-to-everything (V2X) services supported by LTE-Based Systems and 5G [J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2017, 1(2):70.
- [13] LEFEVRE S, PETIT J, BAJCSY R, *et al.* Impact of V2X privacy strategies on intersection collision avoidance systems [C]// Vehicular Networking Conference.[S.l.]: IEEE, 2014.
- [14] ZHANG Y, YANG T, TAN J, *et al.* Research on transit signal priority strategy of single intersection based on V2X environment [C]// 2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). [S.l.]: IEEE, 2019.
- [15] WU Z, ZENG X, YANG H. System-level reliability analysis of cooperative driving with V2X communication for intersection collision avoidance[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674 (8) : 036119812091975.
- [16] WOLF M T, BURDICK J W. Artificial potential functions for highway driving with collision avoidance [C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. [S.l.]: IEEE, 2008.
- [17] Ni, D, A unified perspective on traffic flow theory. Part I: The field theory[J]. Applied Mathematical Sciences, 2013, 7:1929.
- [18] 王健强, 吴剑, 李洋. 基于人-车-路协同的行车风险场概念, 原理及建模[J]. 中国公路学报, 2016, 28(1):105. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.01.014.
WANG J Q, WU J, LI Y. Concept, principle and modeling of driving risk field based on driver-vehicle-road interaction [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 28(1): 105. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.01.014.
- [19] LI L, GAN J, JI X, *et al.* Dynamic driving risk potential field model under the connected and automated vehicles environment and its application in car-following modeling [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 99:1.
- [20] ROSSETTER E J. A potential field framework for active vehicle lane-keeping assistance [D]. Palo Alto: Stanford University. 2004.