

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415444

基于行车风险场的交通冲突风险预警方法^{*}

薛先斌¹ 谭北海² 余荣¹ 钟武昌¹

(1. 广东工业大学自动化学院 广州 510006; 2. 广东工业大学集成电路学院 广州 510006)

摘要: 城市交叉路口是交通事故多发路段,对于智能网联汽车来说,在行驶过程中进行风险检测与碰撞预警,从而保障驾驶的安全性至关重要。本文针对有信号灯的城市交叉路口提出一种考虑信号灯约束的行车风险场模型,并基于此模型设计三级碰撞预警方法。首先针对城市交叉路口的潜在冲突风险点构建功能场景,并将信号灯的约束作用考虑进行车风险场模型。为了解决碰撞预警问题,提出以 TTC 为指标划分三级冲突区域,通过计算主车行驶过程中周围对应的场强值,并根据干扰车在主车周围势能场的位置来衡量主车所受碰撞风险。实验结果表明,所设计的模型能够准确对进入主车势能场范围的干扰车进行预警,预警成功率可达 100%,误报率仅为 3.4%,证明所提方法的可靠性和有效性。

关键词: 城市交叉路口;智能网联汽车;行车风险场;风险检测;碰撞预警

中图分类号: U419.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.80

Traffic conflict risk warning method based on driving risk field

Xue Xianbin¹ Tan Beihai² Yu Rong¹ Zhong Wuchang¹

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. School of Integrated Circuit, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Urban intersections are accident-prone sections. For intelligent networked vehicles, it is very important to carry out risk detection and collision warning during driving to ensure the safety of driving. This paper proposes a traffic risk field model considering traffic signal constraints for urban intersections with traffic lights, and designs a three-level collision warning method based on this model. Firstly, a functional scenario is constructed according to the potential conflict risk points of urban intersections, and the vehicle risk field model is carried out considering the constraint effect of traffic signal. In order to solve the problem of collision warning, a three-level conflict area is proposed to be divided by the index, and the collision risk of the main vehicle is measured according to the position of the potential energy field around the main vehicle by calculating the corresponding field strength around the main vehicle. The experimental results show that the designed model can accurately warn the interfering vehicles entering the potential energy field of the main vehicle, the warning success rate can reach 100%, and the false alarm rate is only 3.4%, which proves the reliability and effectiveness of the proposed method.

Keywords: urban intersections; intelligent connected vehicles; driving risk field; risk detection; collision warning

0 引言

随着智能网联汽车产业的蓬勃发展,车辆变得更加智能化,从技术上为减少交通事故的发生提供了保障。道路交叉口是城市交通网络的关键枢纽,各个方向的车流在此交汇,具有交通流量大、潜在冲突风险高的特点,因此,这些交叉口成为交通事故频发的区域。根据国家统计局公布的数据显示^[1],2022年我国交通事故发生数为25.64万起,

其中交叉路口发生交通事故数量占比超过20%以上。为了使智能网联汽车能安全通过交叉路口,因此有必要对交叉路口场景中的交通冲突进行风险检测和评估,这对于保障汽车行驶安全、减少交叉路口事故发生具有重要的现实意义。

针对交通冲突检测和风险评估,有些学者主要从时间和空间的角度,通过检测交通参与者是否发生碰撞来评估风险。李昕光等^[2]从空间角度考虑不同路面状态变化提出

收稿日期:2024-01-28

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(U22A2054)、国家自然科学基金(61971148)项目资助

了分级声光预警策略。陈计伟等^[3]基于多层感知器神经网络,将时间空间指标作为输入,预警级别的预测值作为输出,从而对行车安全进行预警。Qu 等^[4]提出一种矩形模型对车辆形状进行建模,通过计算碰撞时间(time to collision, TTC)更精准地识别十字路口的碰撞情况。Kim 等^[5]提出一种基于周围车辆未来轨迹预测的算法,该算法可以在更长的时间范围内准确预测 TTC。从空间的角度来看,主要通过计算安全距离来进行碰撞检测。Wang 等^[6]定义了最小未来距离(minimal future distance, MFD),通过计算目标车辆与其他车辆之间的未来距离,并利用两级动态阈值来进行碰撞预测。Cheng 等^[7]综合考虑最大制动加速度、制动反应时间和系统生效时间,提出一种计算安全阈值的方法。

以上文献主要从 TTC、安全距离阈值等时间或空间指标进行碰撞预警,这些方法通常需要对车辆动力学和行驶轨迹进行建模,比较繁琐。因此,学者开始采用风险场的方法来评估风险。Wang 等^[8]基于势能场的评估方法,综合人-车-路因素提出行车安全场的理论。该理论将车辆行驶过程中对车辆安全可能产生影响的要素分为势能场、动能场以及行为场,通过计算车辆周围的场强来对场景风险进行评估。吴剑^[9]在此基础上考虑了道路边界所形成场强的作用。金立生等^[10]建立了无信号交叉路口的行车安全场模型,并采用模型预测控制方法优化交叉口行车策略。然而,这些建模方法虽然考虑了道路环境以及车辆自身等因素,却没有考虑交通信号灯对交叉路口的控制作用。事实上,对于城市交叉路口场景下,交通信号灯是一个不可忽略的因素。宗芳等^[11]对交叉路口的信号灯建立了信号灯约束场,根据绿灯剩余时间不同来确定信号灯对主车的约束作用,但却没有考虑道路环境因素带来的影响。

基于上述考虑,本文面向有信号灯的交叉路口场景,以行车风险场理论模型为基础,综合考虑道路、车辆及交通信号灯等因素,对智能网联汽车在城市交叉路口危险场景中的交通风险进行评估。在场景构建方面,针对闯红灯的突发情况建立相应的危险场景,这些突发情况更加考验智能网联汽车的决策控制能力。在碰撞预警方面,构建合适的碰撞预警算法,选取相应的指标进行量化评估,并结合行车风险场理论评估的风险值划分车辆行驶过程中的交通风险区域。

1 有信号灯交叉口场景构建

在城市交叉路口场景下,信号灯对于交通安全的作用是显而易见的。然而,往往有时候行人或驾驶员由于自身交通意识的缺乏,或者因为雨、雾、黑夜等环境因素的存在,作出超越交通规则的行为,若此时智能网联汽车没有及时检测周围环境的风险,则极易酿成交通事故。虽然违反交通规则这是小概率事件,但对于智能网联汽车而言却是不可忽视的问题。

本文构建的有信号灯控制的城市交叉路口如图 1 所示。在这个路口中,只有一个方向为绿灯,其他 3 个方向为红灯。当信号灯为绿灯时,主车有直行、左转、右转 3 种选择。若此时其他 3 个方向交通参与者出现违反交通信号灯的情况,则左转方向存在 5 个交通冲突点,直行方向存在 5 个交通冲突点,右转方向存在 1 个交通冲突点,这 11 个交通冲突点均为主车在绿灯通行交叉路口时可能发生碰撞的潜在风险点。

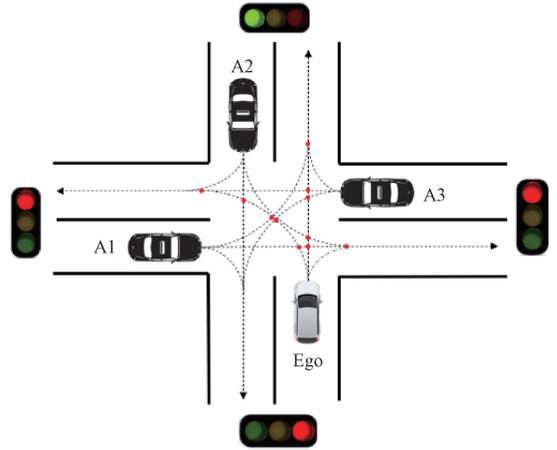


图 1 有信号灯控制交叉路口潜在交通冲突点

基于上述对危险场景的冲突分析,为了后续验证算法模型及风险评估,可从语义层次构建基本功能场景^[12]。根据主车的三种行为划分,考虑其他方向车辆的潜在危险动作,在这 11 个潜在交通冲突点共划分 11 个功能场景如表 1 所示。

表 1 有信号灯交叉口功能场景

主车行为	A1 动作	A2 动作	A3 动作	场景编号
直行	直行	—	—	TL-1
	—	直行	—	TL-2
	—	右转	—	TL-3
	—	—	—	TL-4
	—	—	左转	TL-5
左转	直行	—	—	TS-1
	—	左转	—	TS-2
	—	—	左转	TS-3
	—	—	直行	TS-4
	—	—	右转	TS-5
右转	—	左转	—	TR-1

2 考虑信号灯约束的行车风险场模型

本文研究的行车风险场模型在现有人工势能场的基础上进行改进,一方面结合道路条件以及车辆条件等影响因素构建行车安全场模型,另一方面将交叉路口的交通信

号灯的约束作用也考虑进模型中。本文将交叉路口的交通参与者都视为障碍物,障碍物在自身周围将形成斥力场,排斥主车靠近。将主车要通过的路口视为目标点,目标点在自身周围形成引力场,吸引主车靠近。对于交通信号灯,则根据交通信号灯的不同状态来区分信号灯的作用,若为绿灯,则信号灯对主车没有约束作用;若为红灯,则信号灯对主车具有阻碍作用。

2.1 引力场模型构建

引力场主要是由目标点对主车的吸引力构成,与主车和目标点之间距离有关,距离越大,主车所受引力势能越大,距离越小,主车所受引力势能越小。设绿灯剩余时间为 T_0 ,主车从当前路口 i 运动目标路口 j 所运动距离为 l ,道路限制的最大车速为 v_{\max} ,主车位置为 q ,目标点位置为 q_i ,则主车在运动过程中位置 q 的引力场可用式(1)表示。

$$E_{att}(q) = \begin{cases} \infty, & T_0 = 0 \cup T_0 < \frac{l}{v_{\max}} \\ \frac{1}{2}\eta\rho^2(q, q_i), & T_0 \geq \frac{l}{v_{\max}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:当绿灯剩余时间 $T_0 = 0$ 或者当主车以道路限制最大速度仍不能通过路口时,即 $T_0 < \frac{l}{v_{\max}}$,此时认为主车将受到无穷大的阻力;当主车有充足时间通过路口时,即 $T_0 \geq \frac{l}{v_{\max}}$,此时目标点对主车的引力为 $E_{att}(q) = \frac{1}{2}\eta\rho^2(q, q_i)$,其中 η 为增益系数, $\rho(q, q_i)$ 表示的是主车位置 q 和目标点位置 q_i 的欧氏距离,方向为 $q \rightarrow q_i$ 。

在增益系数 η 中对道路环境和车辆自身特性进行了考虑,结合文献[13]中对等效质量 M_i 和道路条件影响因子 R_i 可由式(2)表示如下:

$$\eta = a \cdot M_i \cdot R_i \quad (2)$$

其中, a 为正比例系数,可用于调节模型,等效质量 M_i 表征由车辆自身属性产生的潜在风险损失,包括车辆类型 T_i 、质量 m_i 以及速度 v_i ;道路条件因子 R_i 表征道路条件对行车产生的潜在风险,包括能见度 δ_i 、道路曲率 ρ_i 及坡度 τ_i 、能见度 μ_i ,由式(3)、(4)表示。

$$M_i = \psi(T_i) \cdot m_i \cdot g(v_i) \quad (3)$$

$$R_i = \psi(\delta_i) \cdot \psi(\rho_i, \tau_i) \cdot \varphi(\mu_i) \quad (4)$$

文献[13]对式(3)、(4)的各个参数进行了标定,在本文场景中,标定参数均取理想情况,即能见度 $\delta_i > 100$ m、道路曲率 ρ_i 为直路、坡度 τ_i 为平路、路面附着系数 μ_i 为0.90。当道路环境或者车辆自身发生变化时,这个参数取值也不同。

2.2 斥力场模型构建

斥力场是根据主车与障碍物的距离来衡量的,首先会设置一个阈值 ρ_0 表征作为障碍物的影响范围,当主车未进入障碍物的影响范围时,其受到的斥力场势能为0,当主车进入障碍物的影响范围时,主车和障碍物距离越大,所受斥力

场势能越小,距离越小,所受斥力场势能越大,如式(5)所示。

$$E_{req}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}k\left(\frac{1}{\rho(q, q_0)} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2, & 0 \leq \rho(q, q_0) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(q, q_0) > \rho_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\rho(q, q_0)$ 表示主车当前位置 q 和障碍物 q_0 的欧氏距离,方向为 $q \rightarrow q_0$, k 为增益系数,可用式(6)表示如下。

$$k = b \cdot M_i \cdot R_i \quad (6)$$

其中,与 η 类似, k 也在斥力场中表示道路环境以及车辆自身特性, b 为正比例系数,可调节斥力场模型,等效质量 M_i 和道路条件影响因子 R_i 在文献[13]中进行了标定,在这里也选取理想情况。

2.3 合力势场模型构建

当主车在城市交叉路口中行驶的过程中,受到目标点的引力场作用和多个障碍物的斥力场作用,因此,合并式(1)和(5),可将主车所受的合场强表示如式(7)所示。

$$E(X) = E_{att}(X) + \sum_{i=1}^m E_{req}(X) = \begin{cases} +\infty, & \rho(q, q_0) \geq 0 \text{ 且 } T_0 = 0 \cup T_0 < \frac{l}{v_{\max}} \\ \frac{1}{2}\eta\rho^2(q, q_i) + \sum_{i=1}^m \frac{1}{2}k\left(\frac{1}{\rho(q, q_0)} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2, & (0 \leq \rho(q, q_0) \leq \rho_0 \text{ 且 } T_0 \geq \frac{l}{v_{\max}}) \\ \frac{1}{2}\eta\rho^2(q, q_i), & \rho(q, q_0) > \rho_0 \text{ 且 } T_0 \geq \frac{l}{v_{\max}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:当主车在绿灯时间为0或者绿灯剩余时间不足以通过路口,即 $T_0 = 0 \cup T_0 < \frac{l}{v_{\max}}$,合场强视为无穷大;当主车能够在绿灯剩余时间内通过路口,即 $T_0 \geq \frac{l}{v_{\max}}$,且主车在障碍物的影响范围内时,合场强为引力场和斥力场的叠加,方向为引力场和斥力场的矢量和;当主车不在障碍物的影响范围内时,主车仅受引力场作用。

对于引力场和斥力场中的运动物体,他们所受的引力为引力场场强的负梯度,所受斥力为斥力场场强的负梯度,因此,主车运动过程中所受合力为合场强的负梯度,方向为引力和斥力的合力方向,如式(8)表示。

$$F(X) = -\nabla E(X) = F_{att}(X) + \sum_{i=1}^m F_{req}(X) = \begin{cases} +\infty, & \rho(q, q_0) \geq 0 \text{ 且 } T_0 = 0 \cup T_0 < \frac{l}{v_{\max}} \\ \eta\rho(q, q_i) + \sum_{i=1}^m k\left(\frac{1}{\rho(q, q_0)} - \frac{1}{\rho_0}\right) \cdot \frac{1}{\rho^2(q, q_0)} \cdot \nabla\rho(q, q_0), & (0 \leq \rho(q, q_0) \leq \rho_0 \text{ 且 } T_0 \geq \frac{l}{v_{\max}}) \\ \eta\rho(q, q_i), & \rho(q, q_0) > \rho_0 \text{ 且 } T_0 \geq \frac{l}{v_{\max}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\nabla\rho(q, q_0)$ 表示斥力场强的梯度方向， $F(X)$ 表示主车在交叉路口所受的合力。

3 基于行车风险场的碰撞预警方法

目前碰撞预警方法通常需要对车辆动力学以及车辆轨迹进行建模，然而车辆不同所建立模型也不同，且车辆轨迹往往不好预测，很大程度上取决于驾驶员的行为，而风险场的方法则不必进行复杂的建模过程。基于这种考虑，结合第二节提出的行车风险场模型，提出一种碰撞风险预警分析方法。主车可以通过感知系统实时产生以自车为中心、周边障碍物所产生场强的风险分布，并基于此确立三级碰撞预警区域，当主车检测到障碍物位于不同的碰撞风险区域时，随即做出相应的控制动作进行避障。下面将以城市交叉路口中，有主车及一个障碍车辆的场景进行分析。

3.1 行车风险场分析

如图 2 所示，以主车前侧为原点建立坐标系，A1 为干扰车辆，坐标为 (x_1, y_1) ，主车的目标点为 (x_t, y_t) ，交通冲突点坐标为 (x_o, y_o) ，主车到交通冲突点的运动轨迹长度为 l_{ego} ，干扰车辆到交通冲突点的距离为 l_1 ，绿灯剩余时间 T_0 ，时间充足，主车以速度 v_0 左转计划通过路口，干扰车 A1 由于忽视对向红灯，仍然以速度 v_1 通过路口。

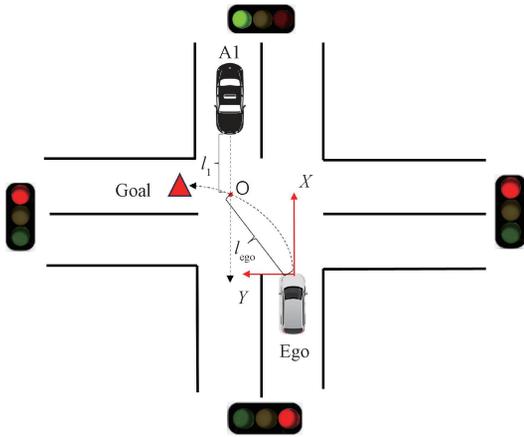
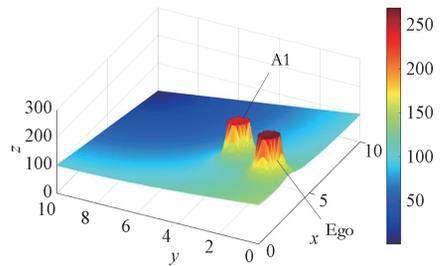


图 2 主车左转场景冲突示意图

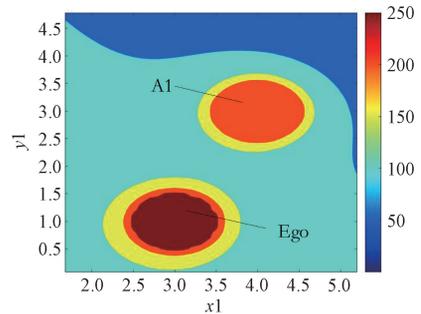
基于第 2 节的行车风险场模型，主车通过自身的感知系统可以感知到干扰车正在靠近，主车以自身为中心形成风险场，干扰车在其自身也会形成风险场，两车运动过程中在路口的风险场如图 3(a) 所示，等势能场图如图 3(b) 所示。可以看出，两车自身的风险值是最大的，周边风险值逐渐降低，在车辆周围会形成环形等势场，因此，随着主车和干扰车的靠近，两车的势能场也将逐渐靠近，并逐渐产生交集，此时的碰撞风险越高。因此，可以通过车辆的等势场分布，进行碰撞预警。

3.2 碰撞检测算法设计

结合行车风险场等势能图的形状特点，即越靠近自车中心，环形的等势能场图越类似圆形。因此，本文考虑将车



(a) 三维风险场图



(b) 等势能场图

图 3 主车及干扰车在交叉路口的风险场

辆的几何模型视为圆形模型^[14]，以车辆质心为圆心，将车辆视为矩形，矩形的长和宽分别为车辆的长 L 、宽 W ，以矩形的对角线的一半为半径，构成车辆的圆形模型如图 4 所示。

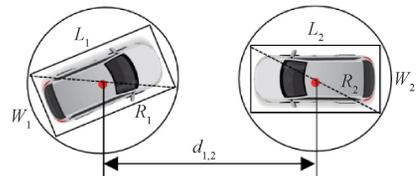


图 4 车辆的圆形模型

车辆半径计算方法如式(9)所示，判断两车发生碰撞的检测方法是通过计算两车质心之间的距离 $d_{1,2}$ 是否小于两车圆形模型的半径之和 $R_1 + R_2$ ，当 $d_{1,2} \leq R_1 + R_2$ 时，两车发生碰撞，否则两车未发生碰撞。

$$R = \frac{\sqrt{L^2 + W^2}}{2} \tag{9}$$

由于车辆圆形模型计算简单，在利用车辆的等势能场作碰撞预警时，将车辆所在矩形外接圆作为等势能场的起始区域，将以此为基础划分风险区域。

3.3 根据势能场划分风险区域

1) TTC 评价指标

关于风险域的划分，文献[15]提出了一种基于到达危险区域时间(time to risk region, TTR)和位于危险区域时间(time in risk region, TIR)两个时间指标的划分方法，即车辆通过到达风险域边界的时间和在风险域内的时间来划分。本文参考此思路，选取碰撞时间 TTC 为参考指标进行

分析。TTC^[16]是主车从当前位置到达碰撞发生点所需要的时间,分别计算直道 TTC 和弯道 TTC,如式(10)、(11)所示。

$$TTC_{stra} = \frac{\sqrt{v_i^2 - 2a_i L_{stra}} - v_i}{a_i} \quad (10)$$

$$TTC_{turn} = \frac{\sqrt{v_i^2 - 2a_i L_{turn}} - v_i}{a_i} \quad (11)$$

式中: L_{stra} 表示直道行驶距离, L_{turn} 表示弯道行驶距离, v_i 车辆当前行驶速度, a_i 表示车辆当前加速度,其中,弯道行驶距离可用式(12)求解。

$$L_{turn} = \int_{start}^{end} \sqrt{1+f'(x)^2} dx \quad (12)$$

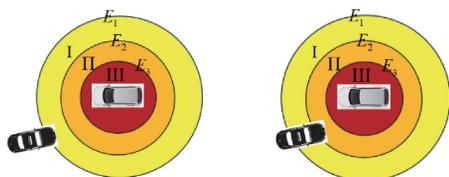
式中: $start$ 和 end 为车辆转弯路段的起始位置和结束位置的横坐标。

基于交叉口的统计数据^[17],可以得到 TTC 累积频率曲线,并按照 15%、50%和 85%分位累积频率的 TTC 值进行划分,当 $TTC < 1.2 s$ 时为严重冲突,当 $1.2 s < TTC < 2.8 s$ 时为一般冲突、当 $2.8 s < TTC < 4.4 s$ 时为轻微冲突、当 $TTC > 4.4 s$ 时为无效冲突。本文以此为参考,分别计算当 $TTC = 1.2 s$ 、 $2.8 s$ 、 $4.4 s$ 时主车所受的合力场强。要计算主车所受的合力场强,主要是计算主车和干扰车辆的距离 $\rho(q, q_0)$,而 $\rho(q, q_0)$ 可以通过设定的 TTC 进行计算,即根据式(10)~(12),已知 TTC、车辆速度和加速度 v_i 、 a_i ,可计算出直道和弯道距离 $L_{stra} + L_{turn}$,由此根据 TTC 对主车受合力势能进行划分。

2) 三级风险预警区域设计

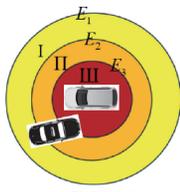
目前对于风险预警机制主要可分为单级预警机制和多级预警机制^[18]。本文结合势能场和 TTC 划分三级风险预警区域。

(1) 当 $2.8 s < TTC < 4.4 s$ 时,如图 5(a)所示,干扰车位于 I 区域,此处主车合力场强 $E_1 \leq E < E_2$,此时主车和干扰车具有轻微冲突风险;



(a) 轻微冲突

(b) 一般冲突



(c) 严重冲突

图5 三级风险区域示意图

(2) 当 $1.2 s < TTC < 2.8 s$ 时,如图 5(b)所示,干扰车

位于 II 区域,此处主车合力场强 $E_2 \leq E < E_3$,此时主车和干扰车具有一般冲突风险;

(3) 当 $TTC < 1.2 s$ 时,如图 5(c)所示,干扰车位于 III 区域,此处主车合力场强 $E_3 \leq E$,此时主车和干扰车具有严重冲突风险。

主车在行驶过程中,会通过感知系统感知自车和前方干扰车辆的距离和速度,实时计算对应的风险场强,并以自身为中心形成等势能场,并划分三级风险预警区域。当有干扰车辆进入三级预警区域中时,主车的决策系统将会根据干扰车辆所在的风险区域等级,重新规划避障路线或者执行制动动作,保证主车的安全行驶。

4 仿真平台搭建与案例分析

4.1 仿真环境搭建

本文基于 Prescan 和 Simulink 软件对算法模型进行仿真测试。搭建的仿真场景如图 6 所示。场景中,车道宽度为 3.5 m,绿灯时间充足,主车距离路口 5 m,并以速度 v_0 进行左转,此时对向有一干扰车辆由于没有注意到红灯,在距离路口 10 m 处以速度 v_1 直行通过路口,两车存在碰撞风险。道路条件良好,路面干燥,晴天,能见度好。十字路口大小为 $18 m \times 18 m$, v_0 和 v_1 的取值范围为 $[5 m/s, 15 m/s]$ 。

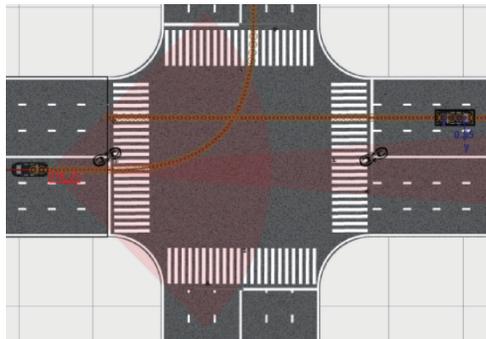


图6 Prescan 中搭建的仿真测试场景

车辆动力学模型以及驾驶员模型由 Prescan 提供,主车搭载两个理想传感器用于检测干扰车辆,其中一个检测距离为 30 m,水平视角(field of view, FOV)为 90° ,另一个检测距离为 90 m,水平 FOV 为 10° ,两个理想传感器共同覆盖主车前方的感知范围。

4.2 方案设计

为了仿真表 1 中存在的 11 个潜在碰撞风险点,本文根据表 1 所描述的功能场景搭建具体场景。对于其中每一个具体场景,风险源在于主车和干扰车辆的速度。每一个功能场景根据主车和干扰车的不同速度设置 20 组具体场景,其中 12 组设置会发生碰撞,8 组设置不发生碰撞。总共仿真 11 个功能场景,故需要设置 220 组实验。

为了衡量本文设计的碰撞预警方法的效果,将结果与文献^[19]中所提方法进行对比,根据是否应当预警以及实际预警情况,利用混淆矩阵对实验结果进行分类,如表 2 所示。

表 2 混淆矩阵分类

预警情况	实际预警	实际未预警
应当预警	TP	FP
不应预警	FN	TN

定义评价指标如下：

$$R_{suc} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (13)$$

$$R_{wro} = \frac{FN}{FN + TN} \quad (14)$$

式中： R_{suc} 表示预警成功率，即实际预警的案例占应当预警案例的比例； R_{wro} 表示误报率，即实际预警的案例占不应预警案例的比例。

实验过程如下。在 Prescan 中设置好主车和干扰车辆的速度以及行驶轨迹，系统运行时，主车会实时计算周边的场强，并根据三级 TTC 划分风险区域，当传感器检测到干扰车辆进入三级风险区域时，该级相应的预警标志位将被置 1。实验将记录对应预警标志位及 TTC 的变化过程曲线。仿真实验过程如图 7 所示。



图 7 仿真实验过程

4.3 结果分析

1) 风险区域划分

根据三级 TTC 指标计算得三级风险区域对应合力场强范围如表 3 所示。可根据势能场的范围划分为严重冲突、一般冲突、轻微冲突三级。

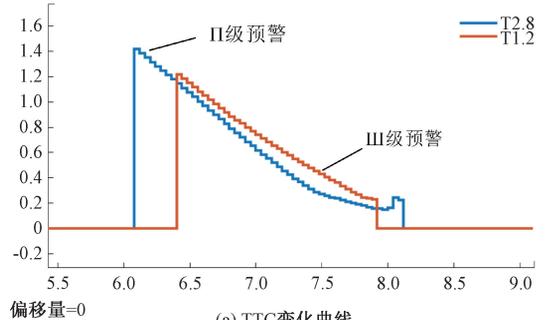
表 3 风险区域划分

TTC(s)	(0, 1.2]	(1.2, 2.8]	(2.8, 4.4]
E(X)	(200, 250]	(150, 200]	(50, 150]
风险类型	严重冲突	一般冲突	轻微冲突
等级	III	II	I

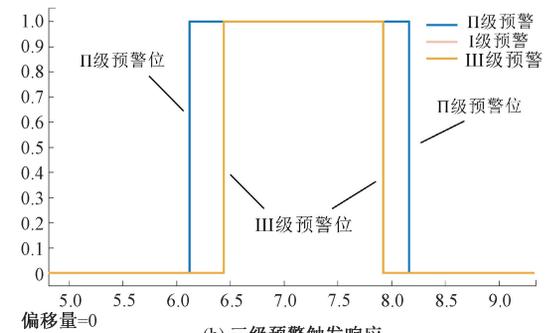
2) 预警可靠性分析

取实验的一组结果进行分析。从干扰车辆进入主车传感器检测范围之内模型开始记录主车与干扰车辆的 TTC，如图 8(a)所示。图中可以看出，系统运行 6 s 时，干扰车辆进入主车检测范围，此时主车与干扰车辆 $TTC=1.42$ s，主

车计算干扰车位置处的势能场强约为 165，系统判定风险等级为 II 级，风险类型为一般冲突风险，II 级预警标志位置为 1，触发 II 级预警，如图 8(b)所示。



(a) TTC变化曲线



(b) 三级预警触发响应

图 8 预警可靠性分析结果

随着主车与干扰车的距离继续靠近，系统运行到 6.4 s 时，主车与干扰车辆 $TTC=1.2$ s，如图 8(a)所示，主车计算干扰车辆位置处的势能场强为 210，系统判定风险等级为 III 级，风险类型为严重冲突，III 级预警标志位置 1，如图 8(b)所示，触发 III 级预警，此时主车决策系统将作出相应避障动作。III 级预警持续时间约 1.5 s，当干扰车辆远离主车 III 级预警区域时，预警标志位置 0，干扰车辆位于 II 级预警区域，当系统运行 8.2 s 时，II 级预警标志位置 0，干扰车辆与主车逐渐背向远离，此时干扰车辆不在主车传感器检测范围之内。综上所述，主车能够准确地对闯入风险区域的干扰车进行预警。

3) 预警有效性分析

在所进行的 220 组实验中，有 132 组实验会发生碰撞，88 组实验不发生碰撞。统计所有实验结果，并记录在表 4 实验结果中。

表 4 实验结果分类

预警情况	实际预警	实际未预警
应当预警	132	0
不应预警	3	85

根据结果可以由式(13)、(14)计算预警成功率 $R_{suc} = 100\%$ ，误报率 $R_{wro} = 3.4\%$ 。文献[19]所提方法实验也在

交叉口场景下进行,预警成功率为94.96%,误报率为4.24%。可见本文所提方法与文献[19]相比,预警成功率更高,且误报率更低。

5 结 论

本文针对智能网联汽车在城市交叉路口下,考虑交通信号灯的约束作用,建立行车风险场模型。基于此模型,提出了依据TTC指标并结合风险场划分三级风险区域的碰撞预警策略,通过干扰车辆所在风险区域位置进行风险检测和碰撞预警。在Prescan和Simulink中进行仿真测试,实验结果验证了本文提出的基于风险域碰撞预警策略的可靠性和有效性。

本研究也存在一些不足之处,由于主车传感器检测范围的限制,主车不能从侧边对靠近自身的干扰车进行逐级预警,因此后续将考虑扩大传感器覆盖范围。事实上对于智能网联汽车而言,其感知范围通常是360°全覆盖的。因此,提高感知覆盖范围对于智能网联汽车在一些极端的场景下进行碰撞预警很有意义,能够为决策系统提供更准确的先决条件,这也是本研究后续改进的方向。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2022.
- [2] 李昕光,于文昌,孙崇效,等. 考虑不同路面状态的车辆主动避撞声光预警策略[J]. 国外电子测量技术,2023,42(11):80-88.
- [3] 陈计伟,史志才,刘瑾,等. 道路交通行车安全预警算法研究[J]. 电子测量技术,2019,42(5):6-10.
- [4] QU C, QI W Y, WU P. A high precision and efficient time-to-collision algorithm for collision warning based V2X applications[C]. 2018 2nd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS). Wuhan, China; IEEE, 2018.
- [5] KIM J H, KUM D S. Threat prediction algorithm based on local path candidates and surrounding vehicle trajectory predictions for automated driving vehicles [C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Korea, 2015: 1220-1225.
- [6] WANG P, CHAN C Y. Vehicle collision prediction at intersections based on comparison of minimal distance between vehicles and dynamic thresholds [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2017, 11 (10): 676-684.
- [7] CHENG C, YANG Z, YAO D. A Speed guide model for collision avoidance in non-signalized intersections based on reduplicate game theory [C]. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Changshu: IEEE, 2018.
- [8] 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.
- [9] 吴剑. 考虑人一车一路因素的行车风险评价方法研究[D]. 北京:清华大学,2015.
- [10] 金立生,郭柏苍,谢宪毅,等. 基于行车安全场模型的交叉口车辆控制算法[J]. 西南交通大学学报,2022,57(4):753-760.
- [11] 宗芳,石蕊,刘恽轩,等. 信号交叉口行车风险场建立及车辆通行行为优化[J]. 中国公路学报,2022,35(10): 244-253.
- [12] MENZEL, TILL, GERRIT B, et al. Scenarios for development, test and validation of automated vehicles[C]. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, IEEE, 2018.
- [13] 陈浩,王红,李维汉,等. 基于行车安全场理论的预期功能安全场景风险评估[J]. 汽车工程,2022,44(11): 1636-1646.
- [14] LCRE M, GOZALVEZ J, HERNANDEZ J. Cooperative vehicle-to-vehicle active safety testing under challenging conditions [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 26: 233-255.
- [15] 陆毅忱,邹亚杰,程凯,等. 基于风险域的城市道路交叉口交通冲突分析方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2021,49(7):941-948.
- [16] MICHIEL M, PIET H. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment [C]. Accident Analysis & Prevention,2001.
- [17] 胡立伟,张瑞杰,赵雪亭,等. 道路环形交叉口机动车冲突风险识别模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2024,24(1):168-178.
- [18] SHEN C L, GAO Z H, et al. Study on a right-turning intelligent vehicle collision warning and avoidance algorithm based on Monte Carlo simulation [C]. Journal of Advanced Transportation,2020.
- [19] 任慧慧. 基于V2X的弱势交通参与者碰撞预警算法研究与实现[D]. 长春:吉林大学,2023.

作者简介

薛先斌,硕士研究生,主要研究方向为自动驾驶仿真测试、车联网、数字孪生等。

E-mail:nchuzdhxb@163.com

谭北海(通信作者),副教授,硕士生导师,主要研究方向为车联网及智能信息处理。

E-mail:bhtan@gdut.edu.cn

余荣,教授,博士生导师,主要研究方向为车联网及边缘计算。

钟武昌,博士研究生,主要研究方向为车联网、语义通信。