

基于风险概率的紧急避障控制策略研究

谭兴文,周金应,龙军

(中国汽车工程研究院股份有限公司,重庆 401122)

摘要:为改善汽车的紧急避障性能,提出一种定量评估车辆紧急避障风险概率的方法并建立相关的控制策略框架。采用时间-事件-流程模式分析整个车辆碰撞过程,并提出可行的转向允许曲线和制动允许曲线。定义车辆避障过程中的事件风险因子和事件损害因子,计算求解最终的避障风险概率。建立紧急避障控制策略框架,自动驾驶汽车可以选择风险概率最小的路径进行避障。为验证所提出的紧急避障控制策略的有效性,进行了驾驶模拟硬件在环实验测试。实验结果表明:在紧急避障控制策略的作用下,车辆可以实现最佳的避障路线,其控制精度较高,并且可以保证车辆的行驶稳定性。

关键词:紧急避障;风险概率;控制策略;在环测试

中图分类号:U463.6 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)02-0223-05

Study on Emergency Obstacle Avoidance Control Strategy Based on Risk Probability

TAN Xingwen, ZHOU Jinying, LONG Jun

(China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to improve the performance of vehicle emergency obstacle avoidance, a quantitative method to evaluate the risk probability of vehicle emergency obstacle avoidance was proposed and a relevant control strategy framework was established. The whole process of vehicle collision is analyzed by time-event-flow model, and feasible steering and braking allowable curves are proposed. Event risk factor and event damage factor in the process of obstacle avoidance are defined, and the final obstacle avoidance risk probability is calculated and solved. According to the established emergency obstacle avoidance control strategy framework, the autonomous vehicle can choose the path with the least risk probability to avoid obstacles. To verify the effectiveness of the proposed emergency obstacle avoidance control strategy, a hardware-in-the-loop test of driving simulation was carried out. Experimental results show that under the action of the emergency obstacle avoidance control strategy, the vehicle can achieve the best obstacle avoidance route with high control precision and guaranteed driving stability of the vehicle.

Keywords: emergency obstacle avoidance; risk probability; control strategy; in the ring test

0 引言

车辆的安全性一直以来都是人们关注的重点,目前的车辆基本都带有主动安全系统,其中,紧急避障功能作为提升车辆安全性的重要组成部分,已经在主动安全系统中得到大量应用。针对车辆的紧急避障功能实现问题,国内外研究人员做了相关的研究分析。文献[1]基于二次规划的模型预测控制算法生成安全的避障轨迹,提出了适用于自动驾驶汽车的实时避障方法。文献[2]通过设置安全距离阈值和制定避障前的处理规则,提出了一种基于几何法控制转向的车辆避障策略。文献[3]基于人工势场法和弹性带理论,提出了一种适应于车辆行驶状况的紧急避障路径生成方法。文献[4]提出了一种同时优化转向和制动的避障算法,并采用非线性模型预测控制方法在线求解优化问题,可以有效提高避障算法的实时性。文献[5]根据车辆动力学模型,将紧急避障问题转化为从车辆当前位置以尽可能快的速度平滑收敛到下一个车道的

最优轨迹生成问题,提出了基于非线性模型预测控制的车辆紧急避障策略。但是,从现有的研究结果来看,缺乏对避障所需的路径选择方法和总体控制逻辑方面的分析,同时也没有制定出详细的紧急避障控制策略。

本文分析了车辆在静态和动态障碍物行驶时的相关场景,定义了制动允许曲线和转弯允许曲线,并根据点质量模型和车辆参数生成可行的避障路径图。基于计算需求提出了事件风险因子和事件损害因子的概念,并给出了最终风险概率的计算方法。通过对可行避障路径图和最终风险概率进行事件流分类讨论,建立了车辆避障控制策略框架。基于上述定量化概率分析的避障控制策略,可以降低车辆与障碍物发生碰撞的概率。

1 可行避障路径

由于车辆避障的过程本质上是时间-事件-流程的过程,因此本文将使用事件-流程模式来定义整个过程,分析每种避障情况的可能性并计算最终的风险概率。

下面将对静态障碍物场景和移动障碍物场景两种典型情况进行分析。

1.1 静态障碍物场景

车辆通过制动进行避障的典型情况如图 1 所示。车速为 U_0 的车辆与障碍物保持在同一车道,在不与障碍物发生碰撞的前提下,利用其最大的制动力完全停止。车辆初始速度 U_0 与所需最小直行距离 d_{BA} 的关系定义为制动允许曲线。

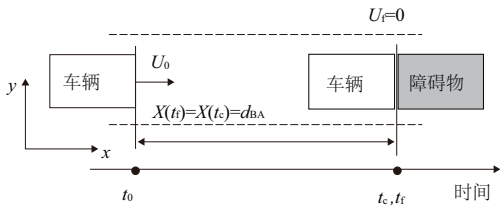


图 1 直线制动避障场景

车辆通过换道进行避障的典型情况如图 2 所示。根据车辆与障碍物的相对行驶状况,可以计算出车辆完成换道且不与障碍物发生碰撞的最优避障行驶路径。其中, d_{TA} 表示车辆转向所需的最小距离, t_c 表示所对应的时间。车速 U_0 与所需最小转向距离 d_{TA} 的关系定义为转向允许曲线。

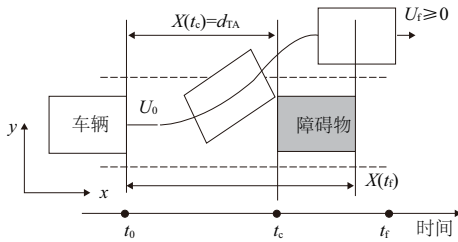


图 2 紧急避障换道路径

如图 3 所示,在车辆与障碍物之间的平面距离上同时绘制出制动允许曲线和转向允许曲线。文献[6]的研究表明,点质量模型在估计允许转向曲线和近似紧急变道路径时具有较高的精度,可以作为轨迹规划的使用模型。

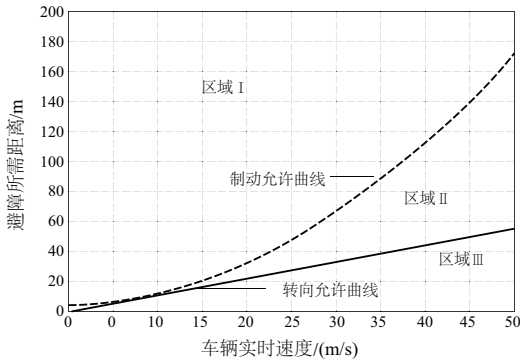


图 3 可行避障路径图

由图 3 可知,两条曲线将整个平面的距离和车速划分为区域 I、区域 II 和区域 III。如果车辆处于区域 I 的状态,即当车辆检测到车道前方有障碍物时,其当前速度和

与障碍物的距离用区域 I 中的点表示。此时车辆以当前速度行驶时,通过制动停止或者转向到相邻车道均可以保证车辆与障碍物不发生碰撞。如果车辆处于区域 II 的状态,只能通过换道的方式进行避障。如果车辆处于区域 III 的状态,此时车辆进行换道会导致偏置碰撞,车辆可能会失去控制,这种情况通常比正面碰撞更加危险。

1.2 移动障碍物场景

车辆和障碍物处于同一车道时,移动障碍物场景分为两种情况:1) 车辆和障碍物沿同一方向行驶;2) 障碍物与车辆相向行驶。

当车辆和障碍物沿同向行驶时,允许转向曲线分析情况如图 4 所示。此时可以用车辆与障碍物的相对速度 U_0^o 作为控制变量得到允许转向曲线,其中, $U_0^o = U_0 - U_0^o$, U_0 和 U_0^o 分别为车辆和障碍物的当前速度。由于本文讨论的是避障情况,所以有 $U_0 > U_0^o$ 。制动允许曲线的分析与 1.1 节相似,此时 $U_0^o(t_f) \leq 0$,表示在最后时刻 t_f 车辆和障碍物速度相同或者车辆的速度小于障碍物的速度。

总体而言,这种情况下的可行避障路径与图 3 基本相同,只是将变量 U_0 替换为 U_0^o 。区域 I、区域 II、区域 III 及其允许避障操作的结论相对于 U_0^o 保持不变。

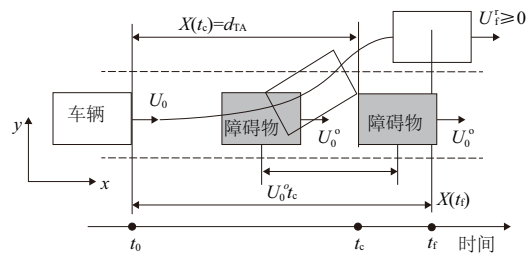


图 4 车辆和障碍物同向行驶

对于障碍物与车辆相向行驶的情况,相关避障路径曲线如图 5 所示。在这种情况下,车辆唯一的选择是换道到相邻车道实现避障。避障成功与否取决于车辆完成所需换道的时间 t_c 和障碍物的运动状态,同时也决定了该条件下的允许转向曲线。

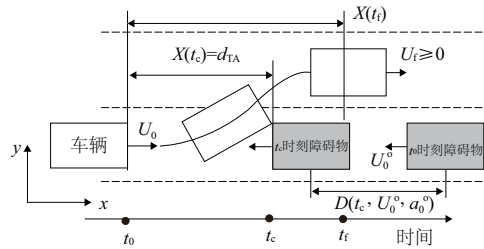


图 5 障碍物与车辆相向行驶

为便于估计车辆避障允许转向路径的界限范围,假设障碍物以当前速度 U_0^o 持续向车辆移动,该条件下的可行避障调度路径如图 6 所示,此时以相向速度 U_0^o 替代图 3 中的变量 U_0 ,相向速度 $U_0^o = U_0 + U_0^o$,车辆模型和参数与图 3 的情况类似。考虑到障碍物有减速的可能,设定其最大减速度为 6 m/s^2 。

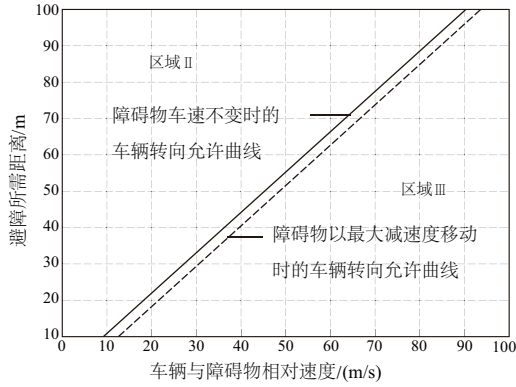


图6 障碍物相向移动时的转向允许范围

由图6可知,如果车辆与障碍物的距离和相对关系属于区域II范围,则车辆可以完成避障操作。当车辆状态处于区域III范围内,此时无法完成避障操作,车辆与障碍物将发生碰撞。

2 计算最终风险概率

为了对车辆避障的过程进行定量分析,定义了两个量化因子,分别为事件风险因子 F_r 和事件损害因子 F_d 。事件风险因子 F_r 用于量化制动、转向等不同操作发生碰撞的可能性,事件损害因子 F_d 用来衡量碰撞发生后可能造成的人身伤害的严重程度。

从传感器获得车辆与障碍物之间的距离、车辆与障碍物的实时车速和加速度、障碍物的行驶方向等关键信息,根据这些信息可以计算出事件风险因子。

由如图7所示的换道场景可以得到^[7]:

$$t_c = \frac{D}{U_0} \quad (1)$$

$$y(t_c) = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_{y\max}}{m} \cdot t_c^2 \quad (2)$$

其中: D 为初始时刻车辆与障碍物的距离; U_0 为车辆的初速度,换道时保持车辆的纵向速度不变; t_c 是车辆转向所需的时间; $y(t_c)$ 为车辆质心在时间 t_c 内的横向位移; m 和 $F_{y\max}$ 分别为车辆质量和轮胎最大侧向力。

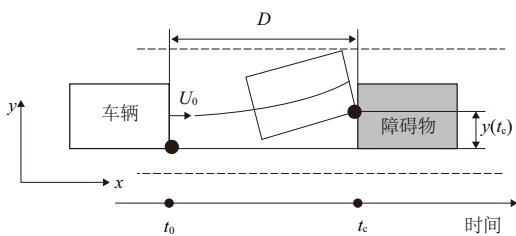


图7 换道场景的横向位移分析

事件风险因子可由下式进行估计:

$$F_r(\alpha) \approx \begin{cases} 1 & 0 < \alpha < 1 \\ 0 & \alpha \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\alpha = \frac{y(t_c)}{b}$, 其中 b 是车辆及障碍物宽度。

如果在时间 t_c 处的横向位移 $\geq b$, 则车辆将完成车道

变换,否则将发生碰撞。该方法同样适用于估计制动条件下的事件风险因子。

在碰撞事件中,速度被认为是造成损害的关键因素^[8]。损害包括轻伤、重伤和致命伤。此外,不同的碰撞方式也会造成不同程度的损伤,如正面碰撞、追尾碰撞和侧面碰撞。根据比较分析和相关实验结果可知,碰撞事故中发生严重损害的概率更能准确评价事故造成的损害程度^[9]。

根据动量定理,碰撞过程中速度的变化 ΔU 与损伤程度的关系比碰撞速度更密切。本文讨论的是在直线道路上车辆前方有障碍物的场景,由此给出如下车速变化 ΔU 与车辆损伤严重程度之间的近似关系。

ΔU 的计算方程为

$$\Delta U = \frac{m}{m+m_0} \sqrt{U_v^2 + U_0^2 - 2U_v U_0 \cos\theta} \quad (4)$$

其中: m 、 m_0 分别为车辆和障碍物的质量; U_v 、 U_0 为车辆和障碍物的碰撞速度; θ 为车辆行驶轴与障碍物的夹角,碰撞速度可以由车辆与障碍物之间的距离和障碍物的初始速度得到,由传感器获取碰撞角度 θ 。

由式(4)可得车速变化 ΔU 的数值,则事件损害因子可表示为

$$F_d = f(\Delta U) \quad (5)$$

基于碰撞重构数据库,关于速度变化 ΔU 对两车碰撞严重性的影响已有大量的实验研究成果。因此,本文基于美国 NASS/CDS 和 CIREN 数据库的大量碰撞数据,在图8中求解得到事件损害因子与速度变化 ΔU 的函数关系。

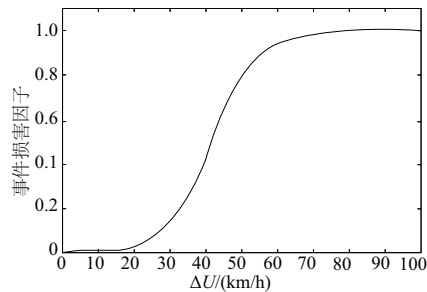


图8 事件损害因子与速度变化 ΔU 的关系曲线

由图8可知,当 $\Delta U = 0$ km/h 时,事件损害因子为0;当 $\Delta U = 20$ km/h 时,事件损害因子约为0.03;当 $\Delta U = 50$ km/h 时,事件损害因子约为0.8;当 $\Delta U \geq 80$ km/h 时,事件损害因子为1。基于该函数曲线关系,可以准确地得到事件损害因子与速度变化 ΔU 的关系。在实际车辆避障场景中,当速度变化 ΔU 已知时,可以通过查表法得到相应的事件损害因子。

通过以上提出的两种方法,可以得到每个避障路径的事件风险因子和事件损害因子。为了更准确地评估车辆避障的风险情况,本文以事件风险因子与事件损害因子的乘积作为最终的风险概率,如式(6)所示。

$$FG_{\text{总}} = F_r \times F_d \quad (6)$$

当传感器检测到前方有障碍物时,控制器开始计算每种避障路径的最终风险概率,通过比较选择具有最低风险概率的避障路径。

3 控制策略

根据以上的计算分析得到车辆的可行避障路径和最终的避障风险概率,本节将基于不同避障操作方式进行事件流分析,建立避障控制策略的框架。

3.1 与车辆同向行驶的障碍物场景

本文将探测到障碍物的车辆响应操纵作为基本操纵,以 $BM_i(0)$ 表示第 i 个基本操纵,起始时间 $t_0=0$ 。

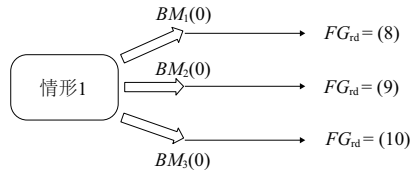


图9 情形1事件流模式

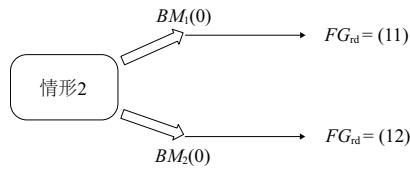


图10 情形2事件流模式

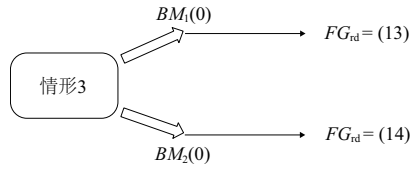


图11 情形3事件流模式

对于图9中的情形1,车辆与障碍物的关系如图3中的区域I所示。车辆的可选操作如下:

$BM_1(0)$:立即改变车道;

$BM_2(0)$:立即制动并完全停止;

$BM_3(0)$:继续行驶,车辆与障碍物的状态关系进入II区,然后进行换道。

对每种可选操作的最终风险概率分析如下:

对于 $BM_1(0)$ 的情况有

$$F_r = F_r^{1-T}, F_d = F_d^{1-c}, FG_{ad} = F_r^{1-T} \times F_d^{1-c} \quad (7)$$

对于 $BM_2(0)$ 的情况有

$$F_r = F_r^{1-B}, F_d = F_d^{0-h}, FG_{ad} = F_r^{1-B} \times F_d^{0-h} \quad (8)$$

对于 $BM_3(0)$ 的情况有

$$F_r = F_r^{II-T}, F_d = F_d^{1-c}, FG_{ad} = F_r^{II-T} \times F_d^{1-c} \quad (9)$$

其中: F_r^{1-T} 表示区域I转向操作的事件风险因子; F_r^{1-B} 表示区域II转向操作的事件风险因子; F_r^{II-B} 表示区域I制动操作的事件风险因子; F_d^{1-c} 表示发生偏置碰撞时的事件损害因子; F_d^{0-h} 表示发生头部碰撞时的事件损害因子。

对于图10中的情形2,车辆与障碍物的关系为图3中的区域II。车辆可选操作如下:

$BM_1(0)$:立即换道;

$BM_2(0)$:立即制动并尽可能使车辆完全停止;

对每种操作的最终风险概率分析如下:

对于 $BM_1(0)$ 的情况有

$$F_r = F_r^{II-T}, F_d = F_d^{1-c}, FG_{ad} = F_r^{II-T} \times F_d^{1-c} \quad (10)$$

对于 $BM_2(0)$ 的情况有

$$F_r = F_r^{II-B}, F_d = F_d^{0-h}, FG_{ad} = F_r^{II-B} \times F_d^{0-h} \quad (11)$$

其中: F_r^{II-T} 和 F_r^{II-B} 分别为区域II中转弯操作和制动操作的事件风险因子。

对于图11中的情形3,车辆与障碍物的关系为图3中的区域III。车辆可选的操作如下:

$BM_1(0)$:立即换道;

$BM_2(0)$:立即制动并尽可能使车辆完全停止;

对每种操作的最终风险概率分析如下:

对于 $BM_1(0)$ 的情况有

$$F_r = F_r^{III-T}, F_d = F_d^{1-c}, FG_{ad} = F_r^{III-T} \times F_d^{1-c} \quad (12)$$

对于 $BM_2(0)$ 的情况有

$$F_r = F_r^{III-B}, F_d = F_d^{0-h}, FG_{ad} = F_r^{III-B} \times F_d^{0-h} \quad (13)$$

3.2 障碍物位于车辆前方并向车辆移动

根据图6的可行避障路径分析结果,此时车辆与障碍物的关系只有区域II和区域III两种情况。当车辆与障碍物的关系处于区域II时,显然不能通过制动来实现避障,此时与情形2类似,可以采用换道方式进行避障。当车辆与障碍物的关系处于区域III时,则与情形3类似,参照其方案进行处理。

3.3 紧急避障控制策略

避障控制策略框架如图12所示,本文所提出的避障控制策略如下:

1) 如果转向和制动操作的事件风险因子接近于0,即 $F_r^T \approx 0, F_r^B \approx 0$, 则可行避障路径为车辆以该车速继续行驶然后平滑换道;

2) 如果 $F_r^T \approx 0$ 并且 $F_r^B \approx 1$, 则可行避障路径为车辆及时进行换道操作;

3) 如果 $F_r^T \approx 1$ 并且 $F_r^B \approx 1$, 事件损害因子 F_d 决定最终风险概率 FG_{ad} 的值, 则可行避障路径为事件损害因子最小的避障操作。

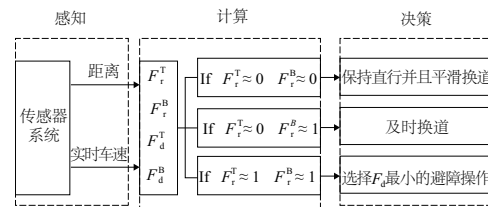


图12 避障控制策略框架

4 驾驶模拟器硬件在环实验验证

在制定出车辆的紧急避障控制策略后,为了验证本文所提出避障策略的有效性,在PanoSim驾驶模拟器硬件在环实验平台中创建相关实验工况,进行了不同车速工况下的系统避障性能测试。

4.1 搭建硬件在环测试场景

a) 创建实验车辆

如图 13 所示,在 PanoSim 软件的车辆编辑器中设置车辆自身参数并创建基本实验场景。



图 13 车辆实验参数设置

b) 设置实验工况

1) 建立实验环境

PanoSim 平台中,可以配置多种实验环境,可以模拟车辆在多种天气下的行驶过程。本文以晴天天气为例,进行紧急避障工况驾驶模拟器硬件在环实验。

2) 配置实验参数

本文实验工况过程中,根据紧急避障的需求,设置路宽为 16 m、双向 2 车辆的长直道路,模拟车辆遇到障碍物和多车干扰等场景。车上安装有毫米波雷达,车辆沿着内侧车道行驶。实验核心要素配置如图 14 所示。

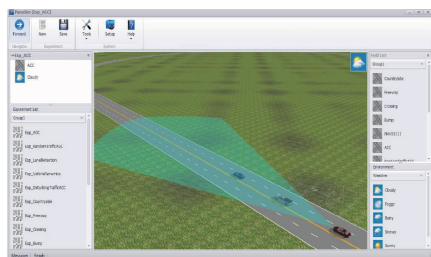


图 14 实验核心要素配置

3) 设置模型

设置雷达模型和 AEB 控制模块,使得 AEB 控制模块以车辆自身速度、障碍物相对距离和车辆档位信号为输入,计算出障碍物的运动状态。当车辆与目标障碍物发生碰撞可能时,由紧急避障控制策略层发出避障指令,实现车辆的自动紧急避障控制。

4.2 驾驶模拟硬件在环验证

根据车辆避障场景规划出换道避障轨迹,并通过拟合的方法将规划的轨迹以多项式形式输入到驾驶模拟硬件在环平台,生成如图 15 所示的换道避障轨迹。

由图 16 的测试验证结果可知,本文提出的紧急避障控制策略可以使车辆在不同车速下沿着避障轨迹实现最佳的避障行为,有效提高车辆的安全性能,同时保证车辆的行驶稳定性。

5 结语

本文基于车辆的运动学特性分析与辨识,通过对不同避障场景的量化分析,提出了一种兼顾安全和实时的车辆紧急避障控制策略,并在 PanoSim 驾驶模拟器硬件在环实

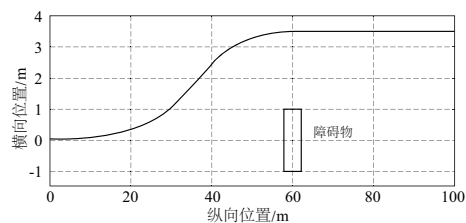
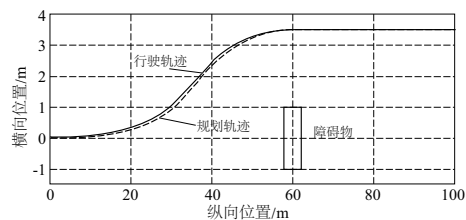
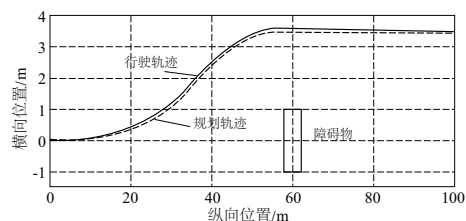


图 15 实际规划的换道避障轨迹



(a) 车速在 20 m/s 时的行驶轨迹与规划轨迹对比



(b) 车速在 25 m/s 时的行驶轨迹与规划轨迹对比

图 16 系统避障行驶轨迹与规划轨迹的对比

验平台进行了避障行为测试,得出如下结论:

1) 通过定义的车辆转向允许曲线和制动允许曲线,可以建立车辆的紧急避障路径,能够为车辆的避障分析提供理论支撑;

2) 提出了事件风险因子和事件损害因子的估计方法,能够计算出发生碰撞事故的最终风险概率,根据最终风险概率,可以分类讨论出紧急避障的不同场景;

3) 针对算法流程控制的实时性需求,建立了紧急避障的控制策略框架,PanoSim 驾驶模拟器硬件在环测试结果表明,可以实现对车辆避障行为的精确控制,能够使车辆做出紧急情况下的最佳避障行为。

参考文献:

- [1] 王凯. 基于模型预测控制的换道辅助系统研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.
- [2] 戚基艳,崔永刚. 微型低速电动汽车性能影响因素分析[J]. 机械制造与自动化,2020,49(4):173-176.
- [3] 吴迪. 自动紧急制动系统防碰撞控制策略研究[D]. 锦州:辽宁工业大学,2018.
- [4] 李勇. 基于激光雷达的智能车横向避障研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
- [5] 魏杰. 汽车主动前轮转向的控制策略研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
- [6] 李江湖. 自动驾驶电动汽车避障控制方法研究[D]. 南京:东南大学,2015.
- [7] 崔佳超. 无人驾驶智能车在动态环境中的避障方法[D]. 西安:西安工业大学,2015.
- [8] 洪达明. 智能车辆主动避障系统设计与实验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2015.
- [9] 贾瑞. 基于滚动优化的自动驾驶车辆避障控制[D]. 长春:吉林大学,2014.

收稿日期:2021-01-06