

# 一种结合驾驶员风险和车辆失稳风险的局部路径规划方法\*

钱灏喆<sup>1,2</sup> 孙文<sup>1,2,3</sup> 赵景波<sup>1,2</sup> 郑剑锋<sup>1</sup> 王军年<sup>3</sup>

(1.常州大学,常州 213164;2.常州工学院,常州 213001;3.吉林大学,汽车底盘集成与仿生全国重点实验室,长春 130025)

**【摘要】**针对目前智能车缺乏驾驶员主观驾驶的操作认知,对交通参与者风险认识不足的问题,提出了一种基于改进驾驶员风险场(DRF)的轨迹规划算法。首先,对车辆所处位置进行笛卡尔坐标系至Frenet坐标系的坐标转换,直观地表示车辆与道路之间的位置信息;其次,构建融合车辆稳定性风险的驾驶员风险场模型,以驾驶员视角感知交通参与者的风险;最后,考虑驾乘者的舒适性需求,基于五次和四次多项式轨迹对感知的风险势能高点进行避障操作。仿真和硬件在环测试结果表明:规划的轨迹在满足避障功能的同时,满足加速度约束条件,兼顾行车安全性和舒适性。

**关键词:** Frenet坐标系 驾驶员风险场 失稳风险 舒适性

**中图分类号:** TP242.6;U461 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20221222

## A Local Path Planning Method Combining Driver Risk and Vehicle Instability Risk

Qian Haozhe<sup>1,2</sup>, Sun Wen<sup>1,2,3</sup>, Zhao Jingbo<sup>1,2</sup>, Zheng Jianfeng<sup>1</sup>, Wang Junnian<sup>3</sup>

(1. Changzhou University, Changzhou 213164; 2. Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213001; 3. National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Jilin University, Changchun 130025)

**【Abstract】**For the problem that intelligent vehicles lack the driver's subjective driving operation cognition and the risk cognition of traffic participants, this paper proposed a trajectory planning algorithm based on improved Driver Risk Field (DRF). Firstly, the coordinate transformation from Cartesian coordinate system to Frenet coordinate system was carried out for the position of the vehicle, which visually represented the position information between the vehicle and the road; Secondly, a driver risk field model integrating vehicle stability risk was constructed to perceive the risk of traffic participants from the driver's perspective; Finally, considering the comfort needs of drivers and passengers, obstacle avoidance operations were performed on the perceived risk potential energy high points based on quintic and quartic polynomial trajectories. The simulation and hardware-in-the-loop test results show that the planned trajectory meets both the obstacle avoidance function and the acceleration constraints, ensuring the safety and comfort of driving.

**Key words:** Frenet coordinate system, Driver Risk Field (DRF), Risk of instability, Comfort

**【引用格式】**钱灏喆,孙文,赵景波,等.一种结合驾驶员风险和车辆失稳风险的局部路径规划方法[J].汽车技术,2023(11):8-18.

QIAN H Z, SUN W, ZHAO J B, et al. A Local Path Planning Method Combining Driver Risk and Vehicle Instability Risk[J]. Automobile Technology, 2023(11): 8-18.

## 1 前言

以高级驾驶辅助系统(Advanced Driver Assistance

System, ADAS)为基础的智能网联汽车(Intelligent and Connected Vehicle, ICV)具备智能感知、决策规划和协调控制等功能,可有效减少因驾驶员失误造成的交通事

\*基金项目:国家自然科学基金项目(62273061,52272365);吉林省中青年科技创新创业卓越人才(团队)项目(创新类)(20230508050RC);吉林省自然科学基金项目(20220101200JC);江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究重大项目(22KJA580001);江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(22KJB580001);常州市科技计划项目(CZ2022030)。

通讯作者:郑剑锋(1978—),男,副教授,研究方向为智能车辆嵌入式系统设计,zjf@cczu.edu.cn。

故<sup>[1-2]</sup>。但随着智能驾驶的应用场景逐渐由单一场景过渡到复杂场景,由于智能感知重度依赖于传感器精度的提升,易导致决策规划出现失误,提高了事故发生的概率。

在环境感知方面,常见的方法可分为势场法<sup>[3]</sup>、时间逻辑法<sup>[4]</sup>、运动学法<sup>[5]</sup>和碰撞概率法<sup>[6]</sup>。势场法将障碍物所处位置视为势场源,根据感知到的环境势场引导车辆运动,但该方法以动作目的为导向,忽略了车辆执行器在运动过程中与行驶安全性有关的运动状态及其瞬时变化。时间逻辑法和运动学法从时间和运动学角度揭示了自车与障碍车纵向速度和距离的变化趋势,降低了纵向碰撞概率<sup>[7-10]</sup>,但不适用于横向风险判断。碰撞概率法考虑了横向风险<sup>[11]</sup>,但该方法对计算资源的高度需求限制了其在车端布置的可行性。以上方法均考虑了车辆本体的运动,也对交通环境风险进行了客观分析,但由于交通参与者具有随机性、时变性的特点,智能车缺乏驾驶员的主观理解,会出现风险判断失误的情况,因此上述方法在复杂度高、动态性强的交通场景下较难应用。

轨迹规划作为智能车决策规划的关键组成部分,可分为采样法<sup>[12]</sup>和搜索法<sup>[13]</sup>等传统方法和考虑车辆实际约束和性能目标的优化方法<sup>[14]</sup>。采样法可有效解决高维空间和复杂约束情形下的轨迹规划问题<sup>[15-16]</sup>,但采样的随机性强,易陷入信息纠缠的局部最优问题。搜索法搜索能力强、灵活性好<sup>[17-19]</sup>,但因过度追求搜索效率而忽视了道路的几何约束。为了有效结合高维度的环境感知风险,规划出一条满足动力学约束的无碰撞轨迹,优化法引入了评价指标,将多目标、多变量、多约束耦合的规划模型转化为有权重的目标函数并优化求解<sup>[20]</sup>,更适用于以期望目标为参考、融合了交通要素多样性的复杂道路结构情况。

智能车通过模拟驾驶员认知实现正确的驾驶操作,一直是自动驾驶领域的研究难点。基于上述分析,本文提出一种结合驾驶员风险和车辆失稳风险的局部路径规划方法,进而确保自车在不同交通场景下的行驶安全性和舒适性。

## 2 坐标转换

在真实的交通环境中,根据驾驶员对交通场景的认知,其视域内不同位置都具有对应的风险强度,根据不同风险强度所构成的认知环境即为本文所采用的驾驶风险场,各点场强与所处位置相关。交通参与者在复杂交通环境下也具备某一碰撞风险,将交通参与者置于驾

驶员视域内,其碰撞风险与风险场强的乘积即为该交通参与者在当前驾驶员认知内的风险势能<sup>[21]</sup>。

为了直观地表示车辆与道路之间的位置信息,降低车辆动力学的计算复杂度,以提高车辆不同时刻所处位置风险势能的准确度,需要对车辆所处位置进行笛卡尔(Cartesian)坐标系至Frenet坐标系的坐标转换。

如图1所示,假设车辆 $t$ 时刻在笛卡尔坐标系下位于点 $A(x, y)$ ,加速度为 $a$ ,车速为 $v$ ,航向角及曲率分别为 $\theta$ 和 $k$ ,运动状态可表示为 $[x, y, v, \theta, a, k]$ 。遍历参考轨迹采样点寻找与当前位置 $A$ 距离最短的采样点,记为 $A'$ 。在笛卡尔坐标系下, $A'$ 点的运动状态可以表示为 $[x_r, y_r, v_r, \theta_r, a_r, k_r]$ 。

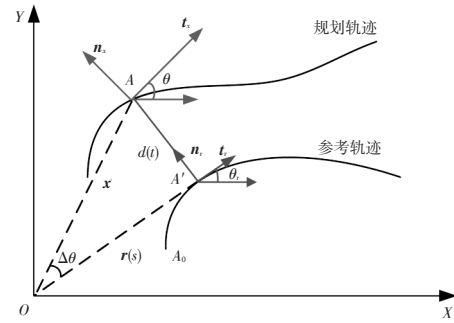


图1 笛卡尔坐标与Frenet坐标转换

以 $A'$ 点为参考轨迹投影点,将笛卡尔坐标系下的运动状态投影至Frenet坐标系, $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{r}(s)$ 分别为笛卡尔坐标系下车辆实际位置与投影参考点位置处的全局位置向量。

在Frenet坐标系下,车辆运动状态可用 $[s, \dot{s}, \ddot{s}, d, \dot{d}, \ddot{d}]$ 表示,其中 $s, \dot{s}, \ddot{s}$ 分别为纵向位移、速度和加速度, $d, \dot{d}, \ddot{d}$ 分别为横向位移、速度和加速度, $d', d''$ 分别为横向位移对应弧长的一阶导数和二阶导数。

笛卡尔坐标系转换为Frenet坐标系的纵向、横向转换公式分别为:

$$\begin{cases} s = s_r \\ \dot{s} = \frac{v \cos \Delta \theta}{1 - k_r d} \\ \ddot{s} = \frac{a \cos \Delta \theta - \dot{s}^2 \left( d' \left( k \frac{1 - k_r d}{\cos \Delta \theta} - k_r \right) - (k_r' d + k_r d') \right)}{1 - k_r d} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} d = \operatorname{sgn}((y - y_r) \cos \theta_r - (x - x_r) \sin \theta_r) \sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2} \\ \dot{d} = v \sin \Delta \theta \\ \ddot{d} = a \sin \Delta \theta + v \Delta \omega \cos \Delta \theta \\ d' = (1 - k_r d) \tan \Delta \theta \\ d'' = -(k_r' d + k_r d') \tan \Delta \theta + \frac{(1 - k_r d)}{\cos^2 \Delta \theta} \left( \frac{(1 - k_r d)}{\cos \Delta \theta} k - k_r \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $s_r$ 为笛卡尔坐标系下参考轨迹从起始位置 $A_0$ 到 $A'$

位置驶过的位移; $\Delta\theta=\theta-\theta_0$ 为航向角之差; $\Delta w=\dot{\theta}-\dot{\theta}_0$ 为航向角的变化率之差; $k_r=(\dot{x}\ddot{y}-\ddot{x}y)/(\dot{x}^2+\dot{y}^2)^{3/2}$ 为笛卡尔坐标系下A'位置的曲率。

通过坐标转换将车辆运动状态以车辆与参考轨迹的横向位移 $d$ 和纵向位移 $s$ 表示,以 $(s,d)$ 坐标直观表现车辆的具体位置及动力学特性,忽略了道路曲率的影响,降低了风险场构建和轨迹避障中参数计算的复杂度。

在Frenet坐标系下经规划得到横向、纵向运动轨迹后需要将其重新映射到全局笛卡尔坐标系以供控制模块调用。

### 3 基于改进驾驶员风险场的轨迹规划

为了充分评估驾驶员感知的交通风险,本文提出一种基于改进驾驶员风险场(Driver Risk Field, DRF)的轨迹规划算法,其技术路线如图2所示。本文以DRF为基础,引入交通参与者风险指标,将风险场内的道路边界、障碍车辆的风险因子视为定值,融合驾驶员风险和交通参与者风险,确定风险势能边界,完成对交通参与者的风险感知;同时,建立车辆稳定性风险场,以轮胎的附着椭圆力学公式为参考,探究车辆失稳的边界条件,并采用车辆失稳边界条件对轨迹期望的加速度进行约束,降低车辆失稳风险;轨迹规划部分,在Frenet坐标系下通过多项式拟合生成候选轨迹集,利用三次样条曲线生成期望路径,基于风险势能边界和加速度约束对不满足约束的轨迹进行剔除,最后通过设计安全性代价函数和舒适性代价函数对候选轨迹进行择优。

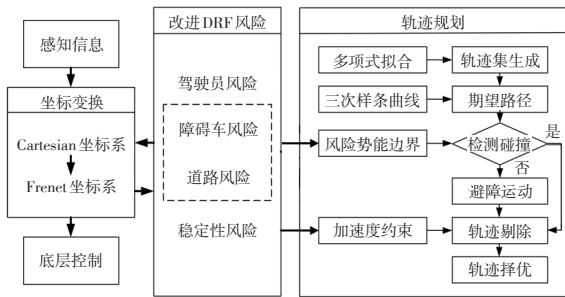


图2 基于改进DRF的轨迹规划算法技术路线

#### 3.1 构建改进DRF风险模型

Kolekar等<sup>[23]</sup>以势场法和运动学法为基础提出DRF模型,融合了车辆的实际状态参数,模拟驾驶员对交通环境风险的认知,以自车视角观测交通环境风险。本文基于DRF模型,通过融合交通环境中的障碍车和道路边界对模型进行改进,实现自车对交通参与者的精确感知。结合将DRF模型与以车辆加速度为参考的稳定性

风险场,构建综合的改进DRF风险场模型。

##### 3.1.1 DRF风险场的基本原理

以自车为风险源,利用车辆运动状态和驾驶员特性参数建立三维高斯函数,对无人车感知到的风险进行表征,描述行车过程中车辆模拟驾驶员视角感知到的自车周围环境风险及其变化趋势。

在笛卡尔坐标系下,假设车辆所处位置为 $(x,y)$ 、当前航向角为 $\theta$ ,根据轴距 $L$ 与转向角 $\delta$ 的比值确定车辆行驶的固定圆弧半径 $R_{car}$ :

$$R_{car}=L/\tan\delta \quad (3)$$

车辆位置参数 $x,y,\theta,R_{car}$ 共同确定了车辆转弯圆的中心 $(x_c,y_c)$ ,通过车辆转弯圆中心来预测车辆行驶路径的弧长,该圆弧长度 $l$ 为驾驶员的前瞻时间 $t_{ia}$ 与当前车速 $v$ 的乘积:

$$l=t_{ia}v \quad (4)$$

根据转弯圆的弧长以及车辆的前轮转角 $\delta$ 构建高斯截面体,其高度 $A$ 和宽度 $W_i$ 分别为:

$$A(l)=p(l-vt_{ia})^2 \quad (5)$$

$$W_i=(m+k_i|\delta|)\cdot l+c, i=1,2 \quad (6)$$

式中, $p$ 为抛物线的陡度,为定值; $k_1,k_2$ 分别为车辆转弯时圆弧的内、外边缘参数,由于车辆转角变化时,相同时间内外轮比内轮位移速度更快,因此分别定义 $k_1,k_2$ 表征圆弧的内、外宽度; $W_i$ 分别对应圆弧内、外两侧边缘参数基于转角变化线性增加计算得到的DRF模型的宽度,取 $k_1<k_2$ ;  $m$ 为车辆直线行驶时DRF变宽的比例参数,定义了直线行驶时DRF的加宽斜率(或负值变窄斜率);  $c$ 为车辆所处位置的DRF宽度,服从标准差为 $\sigma$ 的高斯分布,取值为车道宽度的1/4。

最终,将DRF建模成包含以上所有参数的三维高斯函数 $Z(x,y)$ :

$$Z(x,y)=A\cdot\exp\left\{\frac{-\left(\sqrt{(x-x_c)^2+(y-y_c)^2}-R_{car}\right)^2}{2W_i^2}\right\} \quad (7)$$

式中, $Z(x,y)$ 为笛卡尔坐标系自车位置处的风险势能。

DRF描述自车行驶过程中智能车模拟驾驶员视角感知到的环境风险。为了精确描述障碍物的位置,提高DRF风险感知准确度,帮助自车进行障碍物检测和避障,将DRF应用于Frenet坐标系,具体表达式为:

$$Z(s,d)=A\cdot\exp\left\{\frac{-\left(\sqrt{(s-s_c)^2+(d-d_c)^2}-R_{car}\right)^2}{2W_i^2}\right\} \quad (8)$$

式中, $Z(s,d)$ 为Frenet坐标系下自车位置处的风险势能; $(s_c,d_c)$ 为Frenet坐标系下车辆转弯圆的中心坐标。

### 3.1.2 改进DRF的建立

本文基于DRF原理,引入道路边界以及障碍车,提出一种改进的DRF模型。根据道路边界和障碍车对行人产生的安全威胁,赋予其不同的风险因子,融合风险因子与交通参与者的几何特性,产生不同交通参与者的固定风险成本并结合驾驶员风险和交通参与者风险成本,得到相应交通参与者在DRF内的风险。

#### 3.1.2.1 障碍车风险

交通环境中的障碍车对自行车行驶安全产生威胁,为了将DRF与障碍车风险进行有效融合,将障碍车的形状定义为矩形,长和宽分别为 $L_{obs}$ 和 $W_{obs}$ ,其风险因子 $\eta_o$ 视为定值,建立障碍车风险模型 $R_o$ :

$$R_o = L_{obs} \cdot W_{obs} \cdot \eta_o \quad (9)$$

#### 3.1.2.2 道路边界风险

结构化道路边界保障了车辆在一定的范围内安全行驶,因此,道路边界处的风险远大于道路中心处的风险。设 $d < 0$ 时表示车辆处于道路中心线左侧, $d > 0$ 时表示车辆处于道路中心线右侧,为了使车辆尽可能沿着中心线行驶,建立道路边界模型 $R_r$ :

$$R_r = \frac{\text{sgn}\left(d - \frac{w_r}{2}\right) + 1}{2} \cdot \eta_r \quad (10)$$

式中, $w_r$ 为道路宽度; $\eta_r$ 为道路边界风险因子,越靠近中心线取值越小。

#### 3.1.2.3 稳定性风险

自行车在避障过程中,由于地面附着系数不足,轮胎与地面摩擦力不足,过大的加速度易导致侧滑或侧翻等车辆失稳现象,失稳的力学表达式为:

$$F_t = M \sqrt{a_s^2 + a_d^2} \leq \mu Mg \quad (11)$$

式中, $F_t$ 为轮胎驱动力; $a_s$ 、 $a_d$ 分别为车辆的纵向和侧向加速度; $\mu$ 为地面附着系数; $M$ 为整车质量; $g$ 为重力加速度。

为了描述加速度的安全区域,王安杰<sup>[10]</sup>建立了安全椭圆模型:

$$R_a = \begin{cases} 0, & \frac{a_s^2}{a_{ssafe}^2} + \frac{a_d^2}{a_{dsafe}^2} \leq 1 \\ \left(\frac{a - a_c}{\mu g - a_c}\right)^2 \cdot \eta_a, & \frac{a_s^2}{a_{ssafe}^2} + \frac{a_d^2}{a_{dsafe}^2} > 1 \end{cases} \quad (12)$$

s.t.  $a^2 = a_s^2 + a_d^2 \leq (\mu g)^2$

式中, $R_a$ 为稳定性风险指标; $a_{ssafe}$ 、 $a_{dsafe}$ 分别为安全椭圆的长半轴和短半轴; $a_c$ 为椭圆内部点与原点连线交于椭圆边界上的点; $\eta_a$ 为稳定性风险场的风险因子。

障碍车风险和道路边界风险属于交通要素风险,其

风险因子不随外界环境变化。为了将DRF模型与交通要素风险有机结合,使风险评估结果更加客观,本文提出交通参与者风险指标 $R_i$ ,其为驾驶员风险 $Z$ 和交通各要素风险指标( $R_o$ 和 $R_r$ )的乘积:

$$R_i = Z(R_o + R_r) \quad (13)$$

结合交通参与者风险和车辆失稳风险,提出总的改进DRF(Improved-DRF)风险:

$$Z_{\text{Improved-DRF}} = w_1 R_i + w_2 R_a \quad (14)$$

式中, $w_1$ 、 $w_2$ 分别为交通参与者的风险权重系数和车辆稳定性的风险权重系数;为保障主车安全稳定行驶,取 $w_2 > w_1$ 。

本文提出的改进DRF融合了交通参与者风险和车辆稳定性风险,通过融合车辆运动状态和自身的交通风险成本,对交通环境的风险进行感知。结合车辆稳定性风险,综合考虑车辆在行驶过程中遇到的风险,适用于自行车模拟驾驶员在不同结构化道路下行驶的风险分析。

## 3.2 基于改进DRF的轨迹规划

首先基于改进DRF观测障碍物的形状和位置,在Frenet坐标系下生成候选轨迹和期望轨迹;然后检测自行车与障碍车的距离以避免碰撞,在避障过程中考虑车辆失稳风险并对自行车动力学进行约束,剔除不符合条件的轨迹;最后,设计安全性和舒适性代价函数对候选轨迹进行择优。

### 3.2.1 轨迹形式

采用横、纵向耦合的关于时间的五次和四次多项式生成轨迹:横向轨迹规划的主要目的是检测前方障碍物的位置,通过避障行为避免发生交通事故;纵向轨迹规划通过确定末状态来确定轨迹,避障过程中主要对速度和加速度进行规划。轨迹公式为:

$$\begin{cases} d(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \\ s(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 \end{cases} \quad (15)$$

车辆与道路边界距离越近,风险越大,因此利用三次样条曲线拟合车道中心线为期望轨迹 $g(x)$ :

$$g(x) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 \quad (16)$$

式中, $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 分别为三次样条函数的待定系数; $x$ 为三次样条曲线上插值点的横坐标。

设 $t_0$ 和 $t_c$ 分别为整个规划时间段内最小和最大预测时间,根据单个规划采样周期 $\Delta T$ 进行离散采样,为使轨迹平稳结束,设定轨迹条件:

$$\begin{cases} \dot{d}(t_c) = 0 \\ \ddot{d}(t_c) = 0 \\ \ddot{s}(t_c) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $\dot{d}(t_c)$ 、 $\ddot{d}(t_c)$ 分别为末端横向速度和加速度;  $\ddot{s}(t_c)$ 为末端纵向加速度。

依据采样的横向位移 $\Delta d$ 和车道宽度 $w$ ,确定候选轨迹的数量。

### 3.2.2 碰撞检测

障碍物车辆及道路在DRF内有很强的势能边界,边界内、外部风险存在显著差异。主车与障碍车需要保持一定的最小安全距离,本文通过以障碍车辆势能边界为起点构建横、纵向安全距离的安全扩展矩形区域来保证主车和障碍物车不受碰撞。图3所示为安全扩展矩形势能边界区域。其中, $L_{obs}$ 、 $W_{obs}$ 分别为障碍车的长度和宽度。在实际行车环境中,纵向风险大于横向风险,因此设定 $\Delta L > \Delta W$ 。

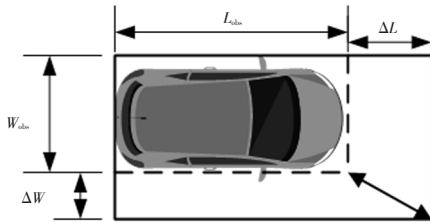


图3 安全扩展矩形势能边界区域

安全扩展矩形势能边界的长度 $L'$ 和宽度 $W'$ 分别为:

$$\begin{cases} L' = L_{obs} + \Delta L \\ W' = W_{obs} + \Delta W \end{cases} \quad (18)$$

以势能边界扩展区域为基础,采用滞后碰撞检测方法,如图4所示,从障碍车安全扩展矩形区域后端依次向前端采用外接圆三等份分割方法判断主车与障碍物是否存在碰撞风险,自车采用二等份分割。计算各圆心间的距离,若距离小于最小安全距离 $d_{safe}$ ,则检测为存在碰撞风险:

$$\begin{cases} (x_i - x_{obs})^2 + (y_i - y_{obs})^2 < (r + r_b)^2 \\ r + r_b = d_{safe} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $(x_{obs}, y_{obs})$ 为障碍车质心坐标; $(x_i, y_i)$ 为轨迹采样点坐标; $n$ 为分割圆数量; $r_b$ 为障碍车安全势能边界分割圆的半径:

$$r_b = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{L'}{n}\right)^2 + W'^2} \quad (20)$$

同理,可求得自车分割圆半径 $r$ 。

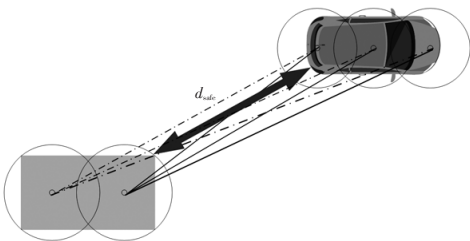


图4 碰撞检测示意

### 3.2.3 轨迹择优

车辆在行驶过程中,过大的加速度易导致车辆自身发生侧滑或侧翻。除此之外,车辆的运动特性具有极限,因此需要对主车动力学参数(曲率、加速度、速度)进行车辆状态检测,检测轨迹是否满足速度、加速度和曲率约束,并将不符合约束的轨迹剔除:

$$\begin{cases} \max(k_i) \leq k_{max} \\ \max(a_i) \leq a_{max} \\ \max(v_i) \leq v_{max} \end{cases} \quad (21)$$

s.t.  $i = 0, 1, \dots, N$

式中, $k_{max}$ 为允许的最大曲率; $a_{max}$ 为允许的最大加速度; $v_{max}$ 为允许的最大车速; $k_i, a_i, v_i$ 分别为候选轨迹按照采样周期 $\Delta T$ 离散化后对应的离散曲率、加速度和速度; $i$ 为候选轨迹离散轨迹点的序号。

碰撞检测作为一种考虑自车和障碍物几何特性的避碰方法,是避免自车和障碍物车碰撞的强约束手段,可在多种静态或动态障碍物条件下保证自车行驶的安全性。碰撞检测代价函数 $f_{obs}$ 为:

$$f_{obs}(z) = \sum_{i=1}^N f_{obs\_n}(z), \text{ s.t. } \begin{cases} f_{obs\_n}(z) = 1, d_n \leq d_{safe} \\ f_{obs\_n}(z) = 0, d_n > d_{safe} \end{cases} \quad (22)$$

式中, $f_{obs\_n}(z)$ 为第 $z$ 条候选轨迹 $N$ 个离散轨迹点与障碍物 $n$ 的碰撞检测函数; $d_n$ 为第 $z$ 条候选轨迹上离散轨迹点与单个障碍物 $n$ 的检测距离。

将不满足车辆状态约束的轨迹剔除后,从安全性和舒适性的角度设计总的代价函数,从保留的备选轨迹中选择一条最优轨迹。此时设计的安全性代价函数为自车行驶过程中感知到的交通环境风险,作为软约束条件选取改进DRF离散风险最低的安全路径作为当前规划的风险代价函数 $f_{risk}$ :

$$f_{risk}(z) = \sum_{i=1}^N Z_{Improved-DRF}(z) \quad (23)$$

为了使轨迹相对平滑,保证驾乘的舒适性,在数值上用纵向运动加加速度在时间域内的积分代表舒适性指标引入目标函数,记为驾驶冲击度 $J_s$ :

$$J_s = \int_0^{t_c} \ddot{s}(t) dt \quad (24)$$

但针对横向运动,主要实现避障功能,需要描述实际轨迹与参考轨迹的横向误差,设计偏移代价函数 $f_d$ :

$$f_d(z) = d(t_c) \quad (25)$$

因此,横向运动的损失函数 $f_d$ 定义为:

$$f_d(z) = w_{d1} f_{obs}(z) + w_{d2} f_{risk}(z) + w_{d3} f_d(z) \quad (26)$$

式中, $w_{d1}, w_{d2}, w_{d3}$ 分别为碰撞代价函数权重系数、风险代价函数权重系数、偏移代价函数权重系数。

针对纵向运动的速度规划,需要描述实际速度与参

考速度  $v_{target}$  的误差:

$$\dot{S}(z) = (\dot{s}(t_c) - v_{target})^2 \quad (27)$$

因此,纵向运动的损失函数定义为:

$$f_s(z) = w_{s1} J_s(z) + w_{s2} \dot{S}(z) \quad (28)$$

式中,  $w_{s1}$ 、 $w_{s2}$  分别为驾驶冲击度权重系数、速度误差权重系数。

总的损失函数为:

$$f(z) = w_{d1} f_d(z) + w_{d2} f_s(z) \quad (29)$$

式中,  $w_{d1}$ 、 $w_{d2}$  分别为横向运动权重系数、纵向运动权重系数。

本文所提出的基于改进 DRF 的轨迹规划方法能够对道路边界和障碍物进行避障,在避障过程中对速度和加速度进行规划,以满足驾乘舒适性要求。此方法适用于不同结构化道路下自车的行驶安全性和舒适性需求。由于横向运动中以自车与障碍物不碰撞为首要目的,本文选取  $w_{d1}=0.5$ 、 $w_{d2}=0.3$ 、 $w_{d3}=0.2$ ;速度规划中选取

$w_{s1}=0.5$ 、 $w_{s2}=0.5$ ;在总的损失函数中安全性代价大于舒适性代价,因此选取  $w_{d1}=0.7$ 、 $w_{d2}=0.3$ 。

#### 4 仿真分析与测试验证

本文设定不同的工况进行仿真分析与硬件在环测试,验证基于改进 DRF 的轨迹规划算法在直线和曲线道路场景下的车辆的行驶安全性和舒适性。在 MATLAB 平台搭建长度为 140 m、宽度为 20 m 的双车道直线和 S 车道场景,在场景中不同位置添加障碍物,验证改进 DRF 模型的环境风险识别能力以及此规划算法在不同结构化道路中的避障能力;在避障过程中,选取轨迹的加速度曲线验证算法规划轨迹的舒适性。本文基于 MATLAB 2020b 仿真平台完成模型搭建,具体仿真参数如表 1 所示。为了提升仿真精度,所采用的主机处理器为 Intel® Core™ i7-10700 CPU,显卡为 NVIDIA Geforce GTX 1650。

表 1 基本仿真参数

类别	仿真参数	取值	类别	仿真参数	取值
DRF	抛物线陡度 $p/m^{-1}$	0.012 8	稳定性风险	安全椭圆长轴 $a_{safe}/m \cdot s^{-2}$	5
	驾驶员前瞻时间 $t_d/s$	5		安全椭圆短轴 $a_{bsafe}/m \cdot s^{-2}$	3
	DRF 变宽比例参数 $m$	0.1		附着系数 $\mu$	0.7
	DRF 所处位置道路宽度 $c/m$	2.5		重力加速度 $g/m \cdot s^{-2}$	0.98
	转弯圆内边缘参数 $k_1$	0.5		稳定性风险因子 $\eta_s$	60
	转弯圆外边缘参数 $k_2$	2.5		最大曲率 $k_{max}/m^{-1}$	1
	轴距 $L/m$	5		最大加速度 $a_{max}/m \cdot s^{-2}$	2
	标准差 $\sigma$	1.96		最大速度 $v_{max}/m \cdot s^{-1}$	19.4
道路边界	道路宽度 $w/m$	20	轨迹规划	最小预测时间 $t_0/s$	4
	道路边界风险因子 $\eta_r$	50		最大预测时间 $t_1/s$	5
障碍物	障碍物车长 $L_{obs}/m$	3.7		采样时间间隔 $\Delta T/s$	0.2
	障碍物车宽 $W_{obs}/m$	1.8		横向采样距离间隔 $\Delta d/m$	1
	势能边界长度 $L'/m$	4		自车膨胀圆半径 $r/m$	1.4
	势能边界宽度 $W'/m$	2		障碍物膨胀圆半径 $r_1/m$	1.2
	障碍物风险因子 $\eta_o$	3		安全距离 $d_{safe}/m$	3

#### 4.1 改进 DRF 风险

驾驶员风险场根据当前车速  $v$  和车轮转角  $\delta$  的变化而动态变化,由于三维坐标系很难直观比较道路不同位置处的风险势能变化情况,因此将三维下的 DRF 风险势能投影到二维  $s-d$  平面上,观测其不同车速和不同转向角下的风险变化情况,自车当前处于二维  $s-d$  平面的(0,0)位置,其动态变化如图 5 所示。

由图 5a 可知,在车速为 10 m/s 的情况下,DRF 的风险势能集中在 0~35 内,且随着与自车间距离增大,风险

势能递减至 0,纵向检测距离约 30 m。由图 5b 可知,在车速为 30 m/s 时 DRF 风险势能显著升高,风险势能集中在 0~300 内,纵向检测距离变长,约为 80 m,此时纵向碰撞风险大于横向碰撞风险。由图 5c 和图 5d 可知,在不同前轮转角下 DRF 模型会相应弯曲,转向侧 DRF 观测的范围从 10 m 逐渐变广且风险势能相应提升,此时横向碰撞风险大于纵向碰撞风险。因此,DRF 动态场模型能准确反映自车运动状态变化条件下自车周围环境风险变化的趋势。

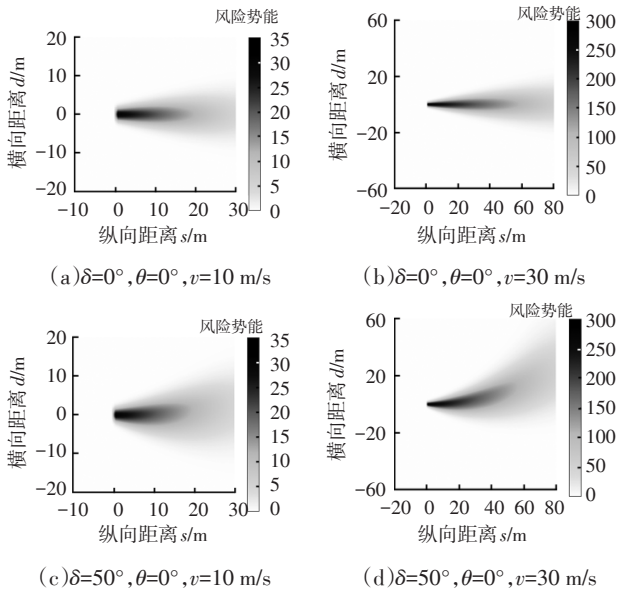


图5 DRF动态场模型

在DRF动态场的基础上,融合道路边界风险、障碍物风险对DRF进行改进,如图6所示。由图6可知,对于道路边界风险,在直线行驶时,主车对于道路的风险感知均匀分布于两侧,而在一定转角条件下行驶时,横向碰撞风险加大,转向侧风险显著增高,另一侧风险显著降低,但均大于直线行驶时的风险。

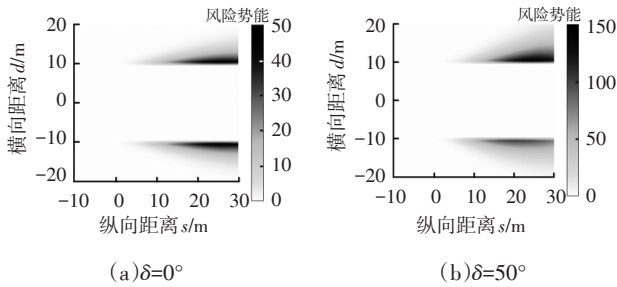


图6 道路边界风险势能

障碍物风险势能如图7所示。由图7a和图7b可知:障碍物与自车距离很近时,接近0m处的风险势能非常高,约为100;距离较远时,10m处的风险势能相对较小,约为70,符合碰撞概率随距离变化的趋势。但是障碍物在DRF内存在很强的风险区域,其大小与障碍物形状大小相同,风险区域明显区别于非风险区域,存在势能边界。由图7c和图7d可知:车速为30m/s时,障碍物与自车距离很近时,接近0m处的风险势能非常高,约为1000;距离较远时,10m处的风险势能相对较小,约为800,远大于图5b无障碍车时的风险势能,约为0~300。此时纵向碰撞风险极大,符合车速大时碰撞风险增大的客观规律。相比较图7a和图7b,图7e和图7f前轮转角 $\delta=50^\circ$ 时,风险势能相对于直线行驶时没有增加,但是此时横向碰撞风险大于纵向碰撞风险,且障碍

车存在明显的势能边界。当车速较快且存在一定转角时,由图7g和图7h可知,纵向和横向碰撞风险均极大,反映了车辆在车速过快且以一定转角行驶时的危险性。

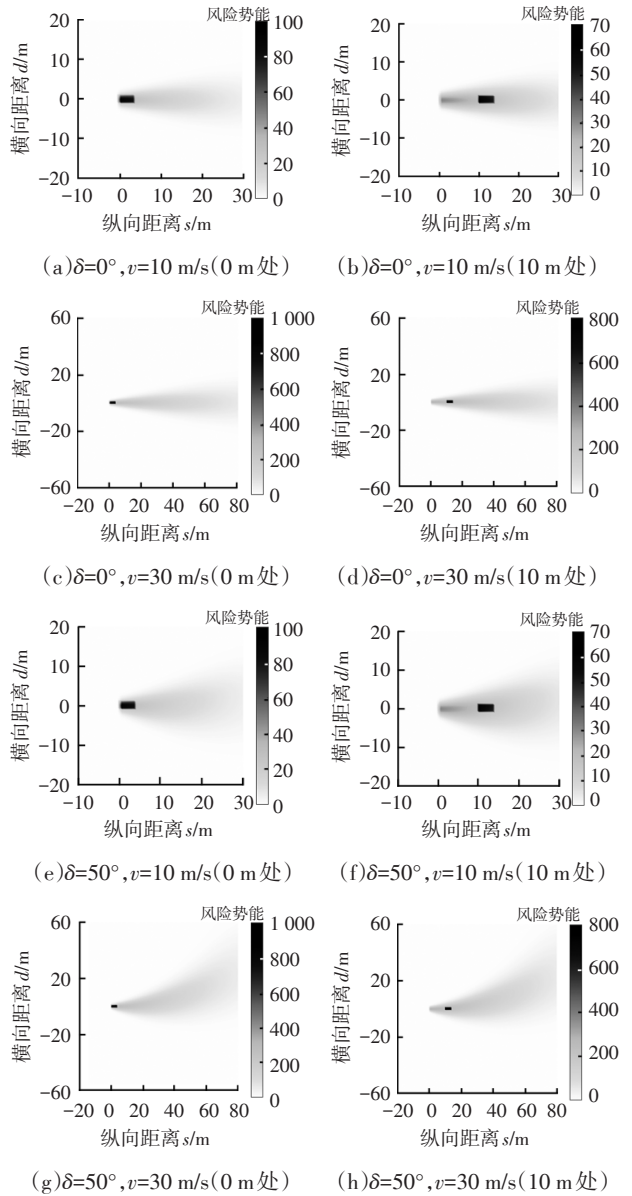


图7 障碍物风险势能( $\theta=0^\circ$ )

因此,综合对比图6和图7可知,道路边界及障碍物均存在很强的势能边界,边界内风险势能很大,边界外风险势能很小,此势能边界是区分风险区域和非风险区域的有效手段,在轨迹规划时需要对风险区域进行规避,保障行车的安全性。

车辆稳定性风险与车辆的加速度有关,在Frenet坐标系下需要对侧向加速度 $a_d$ 和纵向加速度 $a_s$ 进行约束,利用 $a_{d, safe}$ 和 $a_{s, safe}$ 设定安全椭圆区域,由于车辆行驶的过程中,纵向风险大于横向风险,所以 $a_{s, safe} > a_{d, safe}$ 。此外,轮胎附着系数 $\mu$ 是确定车辆失稳边界的条件。

车辆稳定性风险场如图8所示,安全椭圆内部的风汽车技术

险值为0,在安全椭圆外部与椭圆边界之间,风险值很大,接近60,符合自行车由于轮胎与地面附着能力不足,纵向和侧向加速度过大,失稳边界处稳定性风险大的特点。

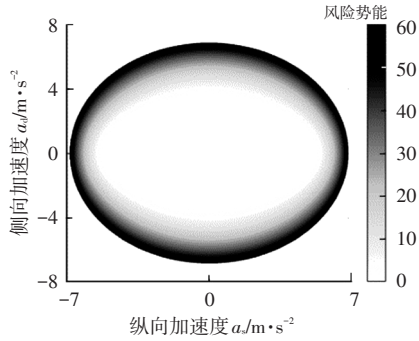


图8 车辆稳定性风险场

#### 4.2 轨迹规划

为了验证直线和曲线道路场景下基于改进风险场的轨迹规划算法的安全性和稳定性,本文分别设置直线和曲线道路下静态与动态障碍物的4种工况展开仿真验证,矩形区域为DRF风险感知到的障碍车势能边界。

工况1:以直线车道中心线为期望路径,道路长度为140 m。主车起始车速为40 km/h,与自行车纵向距离33 m处有静态障碍车1,纵向距离63 m处有静态障碍车2,纵向距离73 m处有静态障碍车3。

工况2:以直线车道中心线为期望路径,主车起始车速为40 km/h,在初始时刻,与自行车纵向距离35 m处有动态障碍车1,以20 km/h匀速运动,与自行车纵向距离80 m处有动态障碍车2,以10 km/h匀速运动。

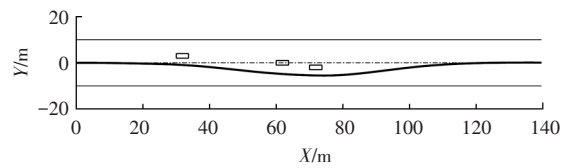
工况3:以S车道中心线为期望路径,主车起始车速为40 km/h,在曲率半径为50 m的S车道上行驶。与自行车纵向距离33 m处有静态障碍车1,纵向距离63 m处有静态障碍车2,纵向距离73 m处有静态障碍车3。

工况4:以S车道中心线为期望路径,主车起始车速为40 km/h,在初始时刻,与自行车纵向距离35 m处有动态障碍车1,以20 km/h匀速运动,与自行车纵向距离80 m处有动态障碍车2,以10 km/h匀速运动。

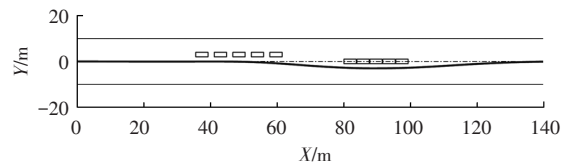
图9所示为4种工况下轨迹规划避障仿真结果。由图9a可知,由于障碍车1在期望轨迹的左侧且与自行车距离大于安全距离3 m,因此自行车无需规避。障碍车2、障碍车3处于期望轨迹中心,自行车在30 m处感知到障碍物,并向右行驶进行规避,规避完成后继续沿期望轨迹行驶。由图9b可知,动态障碍车1在中心线左侧沿直线行驶,其与自行车的距离始终大于安全距离,因此自行车无需规避。障碍车2位于中心线上直线行驶,自行车在与障碍车相距30 m处识别到障碍车,向右行驶有效规避了

障碍物,规避完成后40 m处回到期望轨迹行驶。由图9c可知,障碍车分布在期望轨迹右侧,自行车在30 m处识别到障碍车1,并向左行驶完成了有效规避。规避完成后由于障碍车2和障碍车3位于右侧,自行车继续沿当前道路向前行驶,在规避障碍车3后40 m处回到期望轨迹。由图9d可知,规划的轨迹有效规避了中心线的动态障碍物,规避完成后继续沿着期望轨迹行驶。

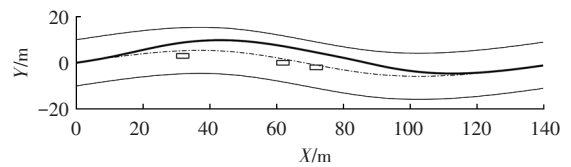
图9b和图9d所示规划时间段内动态障碍车的运动变化情况。整个轨迹规划时间段5 s内,动态障碍车1共行驶了27.8 m,动态障碍车2共行驶了13.9 m。截取时间周期1 s动态位移变化,障碍车1位移间隔为5.56 m,障碍车2位移间隔为2.78 m。



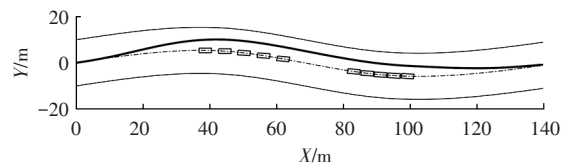
(a)直线车道静态障碍物避障



(b)直线车道动态障碍物避障



(c)S车道静态障碍物避障



(d)S车道动态障碍物避障

图9 轨迹规划避障效果仿真

图10为本文分别4种工况下自行车开始感知到障碍物、开始躲避障碍物、规避完成以及回到道路中心线4个典型阶段代价函数的仿真结果,分别对应直线静态避障车道纵向距离47 m,直线动态避障车道78 m,S车道静态避障车道93 m以及S车道动态避障125 m处,说明改进DRF具备识别交通风险的能力。

由图10a~图10c可以看出,碰撞代价和风险代价可精确识别障碍物的位置,分别为候选路径z为14、10和11的位置,位于道路中心线的左侧和中心位置。从风险代价函数中可以看出,当DRF感知到障碍车时,障碍

车风险远大于道路边界风险,此时引导自车选择更合理的避障方式。从图10d中可以看出,自车躲避障碍物并回到中心线后,碰撞代价和风险代价为0,说明位于中心线位置的自车目前安全。图10中,偏移代价显示越靠近中心线,自车越安全,符合自车因道路风险沿中心线行驶的期望。最后,此规划基于总代价选择最优路径,引导自车选择对应的候选路径序号 $z$ , $z$ 分别为9、8、13和11,包含从开始识别障碍风险继而躲避障碍物,最后回到道路中心线的完整过程。

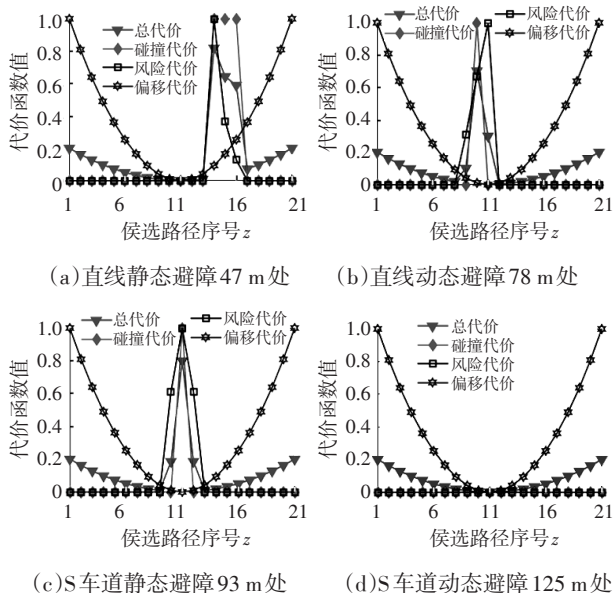


图10 代价函数对比

### 4.3 测试验证

为了验证本文提出的基于改进DRF的轨迹规划方法的实效性,搭建基于dSPACE控制器的硬件在环测试平台,如图11所示,对轨迹规划的避障能力进行测试和验证。

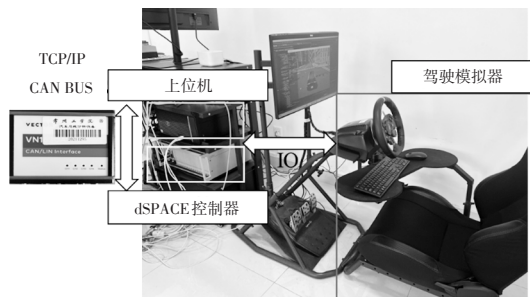


图11 硬件在环测试平台

硬件在环测试的基本流程为:dSPACE控制器实时运行轨迹规划算法,将车辆状态信息发送给CAN总线,CAN总线将获取的车辆和车道线信息,以及求解得到的转向盘转角和车速指令信息反馈给上位机,并通过CarSim软件反映车辆动力学特性和模拟驾驶交通场景,实现虚拟场景下的硬件在环测试。

在轨迹规划过程中,设置仿真步长为0.2 s,在硬件

在环测试中,搭建横、纵向PID轨迹跟踪控制器对轨迹和侧向加速度进行跟踪,设置车速为40 km/h,控制步长为0.01 s,验证此规划算法在控制器中实时性。

硬件在环测试获得的轨迹如图12所示。由图12可知,实际轨迹与规划轨迹在整个行驶过程中误差很小。直线车道静态障碍物避障工况下,在纵向距离80 m处,自车规避障碍物后向左行驶时误差为0.04 m;直线车道动态障碍物避障工况下,在纵向距离78.6 m处,自车检测到障碍物向右避障时误差为0.01 m;S车道静态障碍物避障工况下,在纵向距离110 m处检测到障碍物向右避障时,误差为0.03 m;S车道动态障碍物避障工况下,在纵向距离100.5 m处,检测到障碍物向右避障时误差为0.02 m。综合图12a~图12d可知,结合控制器的基于改进DRF的轨迹规划方法跟踪误差小,均在0.1 m以内,且轨迹平滑性好,满足控制器的实时性需求,保障了车辆的行驶安全性。

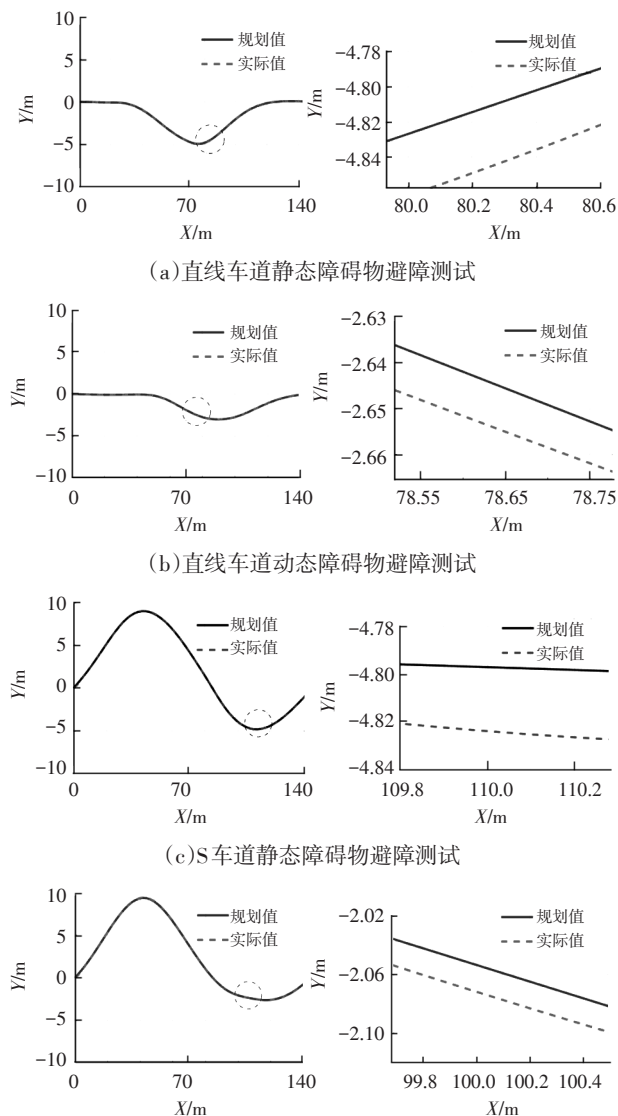


图12 轨迹规划硬件在环测试结果

图13所示为4种工况下自车避障的侧向加速度仿真和测试对比结果,由图13可知:直线车道静态避障侧向加速度峰值、直线车道动态避障侧向加速度峰值、S车道静态避障侧向加速度峰值、S车道动态避障侧向加速度峰值分别小于 $2\text{ m/s}^2$ 、 $0.95\text{ m/s}^2$ 、 $1\text{ m/s}^2$ 和 $1.2\text{ m/s}^2$ ,均低于约束值 $3\text{ m/s}^2$ ,满足驾乘舒适性需求;通过硬件在环测试得到的实际侧向加速度与规划侧向加速度误差较小,在 $0.1\sim 0.5\text{ m/s}^2$ 范围内,进一步验证了结合PID轨迹跟踪控制器的跟踪性能良好,说明此轨迹规划算法在降低碰撞风险的同时,保证了车辆的舒适性。

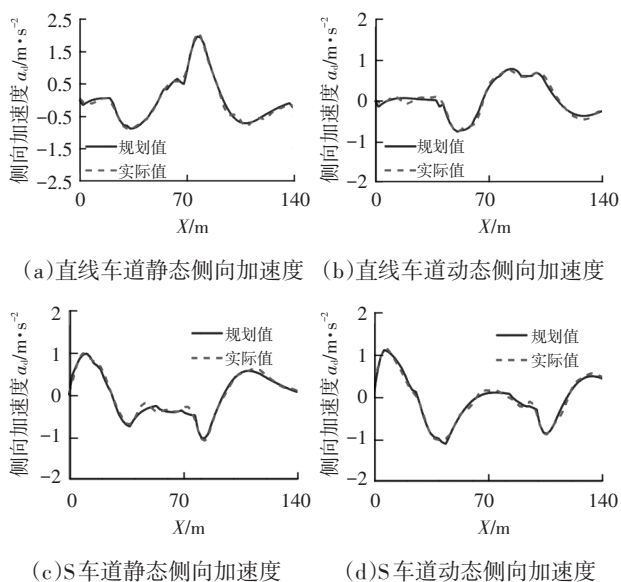


图13 侧向加速度变化对比

## 5 结束语

本文提出了一种交通风险与DRF风险融合的方法,基于DRF模型,融合交通参与者的风险成本,使驾驶员视域内的交通参与者风险随DRF动态场产生相应变化,增加了环境风险感知的准确度。同时提出了一种基于风险势能的轨迹规划方法,在Frenet坐标系下以驾驶员视角感知全局路径下的障碍物位置,基于改进的DRF对风险高的点进行规避,保障行车的安全性,并且基于稳定性风险场对车辆加速度进行约束,保障行车的舒适性。仿真和硬件在环测试结果表明,规划的轨迹在满足避障的同时,具有良好的回归特性,能够沿着期望轨迹继续行驶,同时,其加速度在约束值范围内,保障了驾乘者的舒适性。

本文在融合交通参与者时,考虑了道路边界和障碍物2种交通要素,后续可对交通参与者种类进行拓展。在考虑交通参与者成本时,依据驾驶员主观进行判断,存在不确定性,后续也将选取客观方法对交通参与者成

本进行进一步分析。

## 参 考 文 献

- [1] JAFARPOUR S, RAHIMI-MOVAGHAR V. Determinants of Risky Driving Behavior: A Narrative Review[J]. Medical Journal of the Islamic Republic of Iran, 2014, 28: 142-149.
- [2] 崔明阳, 黄荷叶, 许庆, 等. 智能网联汽车架构、功能与应用关键技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3): 493-508.
- [3] 罗玉涛, 石紫娴, 梁伟强. 基于改进人工势场的无人驾驶动态规划算法研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(2): 179-292.
- [4] LUO Y T, SHI Z X, LIANG W Q. Autonomous Driving Dynamic-Programming Algorithm Based on Improved Artificial Potential Field[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(2): 179-292.
- [5] LI Y, ZHENG Y, MORYS B, et al. Threat Assessment Techniques in Intelligent Vehicles: A Comparative Survey [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2021, 13(4): 71-91.
- [6] DOI A, BUTSUEN T, NIIBE T, et al. Development of a Rear-End Collision Avoidance System with Automatic Brake Control[J]. JSAE Review, 1994, 15(4): 335-340.
- [7] JOERER S, SEGATA M, BLOESSL B, et al. A Vehicular Networking Perspective on Estimating Vehicle Collision Probability at Intersections[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(4): 1802-1812.
- [8] JANSSON J. Collision Avoidance Theory with Application to Automotive Collision Mitigation[D]. Linköping: Linköping University Electronic Press, 2005.
- [9] HAYWARD J C. Near Miss Determination through Use of a Scale of Danger[C]. 51st Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington District of Columbia, United States: Highway Research Board, 1972.
- [10] HILLENBRAND J, SPIEKER A M, KROSCHEL K. A Multilevel Collision Mitigation Approach—Its Situation Assessment, Decision Making, and Performance Tradeoffs [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(4): 528-540.
- [11] 王安杰, 郑玲, 李以农, 等. 基于预测风险场的智能汽车主动避撞运动规划[J]. 汽车工程, 2021, 43(7): 1096-1104.
- [12] WANG A J, ZHENG L, LI Y N, et al. Motion Planning for Active Collision Avoidance of Intelligent Vehicles Based on Predictive Risk Field[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(7): 1096-1104.

- [11] MULLAKKAL- BABU F A, WANG M, HE X L, et al. Probabilistic Field Approach for Motorway Driving Risk Assessment[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 118.
- [12] KUFFNER J J, LAVALLE S M. RRT- Connect: An Efficient Approach to Single- Query Path Planning[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2000: 473-479.
- [13] CLAUSSMANN L, REVILLOUD M, GRUYER D, et al. A Review of Motion Planning for Highway Autonomous Driving[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 21(5): 1826-1848.
- [14] 李永丹, 马天力, 陈超波, 等. 无人驾驶车辆路径规划算法综述[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(6): 72-79.
- LI Y D, MA T L, CHEN C B, et al. Review of Path Planning Algorithm for Unmanned Vehicles[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(6): 72-79.
- [15] 周芳, 朱齐丹, 赵国良. 基于改进快速搜索随机树法的机械手路径优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 30-35.
- ZHOU F, ZHU Q D, ZHAO G L. Path Optimization of Manipulator Based on the Improved Rapidly- Exploring Random Tree Algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 30-35.
- [16] ZHAO Y F, LIU J H, MA J T, et al. Multi-Branch Cable Harness Layout Design Based on Genetic Algorithm with Probabilistic Roadmap Method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1).
- [17] 张鹏. 基于改进A\*算法的全局动态路径规划研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- ZHANG P. Research on Global Dynamic Path Planning Based on Improved A\* Algorithm[D]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [18] 谷润平, 崔朋, 唐建勋, 等. 基于D\*算法的场面滑行动态规划研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(1): 315-319+328.
- GU R P, CUI P, TANG J X, et al. Research on Dynamic Planning of Taxi Path Based on D\* Algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(1): 315-319+328.
- [19] 任秉韬, 王浙浙, 邓伟文, 等. 基于混合A\*和可变半径RS曲线的自动泊车路径优化方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 317-327.
- REN B T, WANG X X, DENG W W, et al. Path Optimization Algorithm for Automatic Parking Based on Hybrid A\*and Reeds-Shepp Curve with Variable Radius [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(7): 317-327.
- [20] 郭蓬, 吴学易, 戎辉, 等. 基于代价函数的无人驾驶汽车局部路径规划算法[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 79-85.
- GUO P, WU X Y, RONG H, et al. Local Path Planning of Driverless Cars Based on Cost Function[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6): 79-85.
- [21] 王建强, 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, 29(1): 105-114.
- 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, 29(1): 105-114.
- [22] KOLEKAR S, DE WINTER J, ABBINK D. Human- Like Driving Behaviour Emerges from a Risk- Based Driver Model[J]. Nature Communications, 2020, 11(1).

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2023年5月29日。

## 《汽车工程师》征稿启事

《汽车工程师》于1974年创刊,是由中国第一汽车集团有限公司主管、中国第一汽车股份有限公司主办的、国内外公开发行的汽车应用技术类学术期刊,国家新闻出版广电总局第一批认定的学术期刊。

《汽车工程师》以报道汽车产品开发领域的成果为主,专注于技术开发与应用,提供汽车设计创新解决方案。《汽车工程师》将把握电动化、智能化、网联化、共享化的汽车技术主流发展趋势,努力在电池技术、电驱技术、电控技术、高压技术、补能技术、燃料电池技术、智慧控制、智能驾驶、智享座舱、智能悬架、线控转向、线控制动、NVH、功能安全、预期功能安全、信息安全、数据安全、被动安全、高效动力、高效传动、智能管理、低风阻、低滚阻、轻量化领域吸收优质稿源,为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

热忱欢迎汽车行业的专家学者不吝赐稿,反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将优先发表,我们期待与您共同践行“把论文写在祖国大地上”的指示精神,为强大中国汽车工业作贡献!

《汽车工程师》编辑部