

·智能车辆轨迹预测与路径跟踪技术专题·

## 考虑路面附着系数的行车风险场建模及避障控制研究\*

李文礼 钱洪 任勇鹏 喻飞 易帆

(重庆理工大学,重庆 400054)

**【摘要】**针对车辆在不同路面条件下的主动避障问题,提出一种考虑路面附着系数的行车风险场避障路径规划方法。首先,建立了包含道路边界风险场、目标引力场和障碍物风险场的行车风险场;基于容积卡尔曼滤波算法实时估算路面附着系数,并对考虑路面附着系数的行车风险场函数进行负梯度求导,得到风险值下降最快的避障路径;然后,采用5次多项式拟合优化得到满足车辆约束的避障参考路径;最后,采用模型预测控制算法跟踪避障路径。仿真结果表明:在相同车速下,路面附着系数越小,避障时的横向加速度越小,横向加速度的标准差越小,避障效果越平顺。

**关键词:**车辆主动避障 路径规划 风险场 路面附着系数

中图分类号:U471.15 文献标识码:A DOI: 10.19620/j.cnki.1000-3703.20220393

## Research on Driving Risk Field Modeling and Obstacle Avoidance Control Considering Coefficient of Road Adhesion

Li Wenli, Qian Hong, Ren Yongpeng, Yu Fei, Yi Fan

(Chongqing University of Technology, Chongqing 400054)

**【Abstract】**For the active obstacle avoidance of vehicle under different road conditions, this paper proposed an obstacle avoidance path planning method in driving risk field considering road adhesion coefficient. Firstly, the driving risk fields including road boundary risk field, target gravitational field and obstacle risk field were established. The road adhesion coefficient was estimated in real time based on the volumetric Kalman filter algorithm, and the driving risk field function considering the road adhesion coefficient was derived with negative gradient derivative, and the obstacle avoidance path with the lowest risk was obtained. Then, the obstacle avoidance reference path satisfying the vehicle constraints was obtained by 5-degree polynomial fitting optimization. Finally, the model predictive control algorithm was utilized to track the obstacle avoidance path. The simulation results show that at the same speed, the smaller the road adhesion coefficient, the smaller the lateral acceleration is, the smaller the standard deviation of the lateral acceleration is, and the more stable the obstacle avoidance effect will be.

**Key words:** Vehicle active obstacle avoidance, Path planning, Risk field, Road adhesion coefficient

**【引用格式】**李文礼,钱洪,任勇鹏,等.考虑路面附着系数的行车风险场建模及避障控制研究[J].汽车技术,2023(7):54-62.

LI W L, QIAN H, REN Y P, et al. Research on Driving Risk Field Modeling and Obstacle Avoidance Control Considering Coefficient of Road Adhesion[J]. Automobile Technology, 2023(7): 54-62.

### 1 前言

车辆主动避障技术的核心是路径规划。目前,车辆路径规划方法主要有风险场法(人工势场法)、最优控制法和随机搜索法等<sup>[1]</sup>。其中,风险场法因计算简单、规划的路径相对平滑、实时性好等优点,在车辆路径规划方

面应用广泛。唐志荣等<sup>[2]</sup>建立了结合道路环境及障碍物的改进人工势场模型,利用改进后的模型规划符合车辆约束的避障路径。田野等<sup>[3]</sup>提出一种基于碰撞时间的行车风险场模型,并通过典型交通场景验证了该模型的有效性。张家旭等<sup>[4]</sup>提出一种基于改进人工势场的车辆弯道超车路径规划算法,可有效、舒适地实现弯道超车。

\*基金项目:重庆市研究生科研创新项目(CYS21444);重庆市巴南区科技成果转化及产业化专项(2020TJZ022);重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0183);重庆市留学人员回国创业创新支持计划资助项目(cx2021070)。

通讯作者:李文礼(1983—),副教授,博士,研究方向为智能汽车测试技术,liwenli@cqut.edu.cn。

李彩霞等<sup>[5]</sup>针对行人违规过街问题,提出一种基于行人位置预测的人、车转向避障路径规划方法,在避障过程中根据行人位置实时调节势场大小,从而实时调节避障路径。王明强等<sup>[6]</sup>提出一种基于碰撞风险评估的车辆局部路径规划算法,可实现主动避障。陈宇珂等<sup>[7]</sup>提出一种能对障碍物进行分类处理的模型预测避障路径规划控制器,将障碍物势场加入该控制器的代价函数,以此引导车辆避障。

车辆行驶过程中常出现路面附着条件突变的情况,最典型的天气由晴转雨的情况。对于此类场景,若不考虑路面附着条件变化对行车风险场的影响而进行避障路径规划,将严重影响避障安全性。因此,在车辆主动安全控制过程中,有必要实时获取路面附着系数<sup>[8]</sup>。文献[2]~文献[7]在基于风险场法进行路径规划时,均未论述路面附着系数及其变化对路径规划的影响。虽有学者建立行车风险场时考虑了路面附着系数<sup>[9]</sup>,但并未详细论述路面附着系数变化对行车风险场的影响以及实时估算路面附着系数时所存在的问题。

路面附着系数的估算方法主要有基于原因(Cause-Based)和基于效果(Effect-Based)两类<sup>[10]</sup>。Effect-Based方法根据路面变化所引起的车辆运动参数变化来估算路面附着系数<sup>[11]</sup>,成本低、适用性强。文献[10]~文献[12]通过该类方法实现了路面附着系数的估算。

综上,本文提出一种考虑路面附着系数的行车风险场建模及避障控制方法。通过容积卡尔曼滤波算法对路面附着系数进行实时估算,并将估算结果与行车风险场结合,从而基于考虑路面附着系数的行车风险场进行避障路径规划,以适应复杂多变的车辆行驶环境。

## 2 行车风险场建模

### 2.1 道路边界风险场建模

车辆在道路上行驶时,大多数驾驶员都会沿道路中心行驶。因此,在道路边界风险场建模时,若只考虑道路边界因素,则车辆正常行驶时行车风险较小;若发生意外导致车辆超出道路边界范围行驶,则行车风险将变大,严重时会造成交通事故。另外,本文考虑车辆横向避障场景,与车辆换道场景不同,其忽略了道路边界内车道线对行车风险场的影响。最终选取分段函数对道路边界风险场进行建模<sup>[4]</sup>,超出道路边界时选取增加速度较快的指数函数,在道路边界范围内道路边界风险场强度取值为零,如图1所示,具体表达式为:

$$U_{road} = \begin{cases} \lambda_r \cdot e^{-2|y_r - L_{right}|^{-1}}, & y_r < L_{right} \\ 0, & L_{right} \leq y_r \leq L_{left} \\ \lambda_r \cdot e^{-2|y_r - L_{left}|^{-1}}, & y_r > L_{left} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $U_{road}$ 为道路边界风险场强度; $y_r$ 为道路纵坐标; $\lambda_r$ 为道路边界风险场调节系数,用于调节道路边界风险场的大小; $L_{left}$ 、 $L_{right}$ 分别为道路左、右边界坐标。

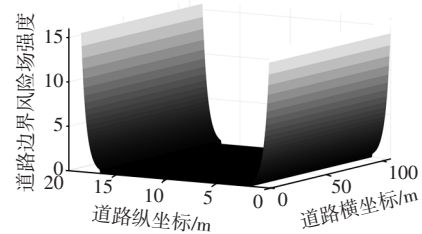


图1 道路边界风险场示意

### 2.2 目标引力场建模

目标引力场的作用是使车辆驶向目标位置,故应在远离目标位置处风险大,靠近目标位置处风险小,从而使引力场向着目标位置倾斜。在参考文献[2]的引力场模型基础上改进可得目标引力场模型,如图2所示,目标引力场强度 $U_{target}$ 的表达式为:

$$U_{target} = \alpha_r \cdot [(x_r - x_{target})^2 + (y_r - y_{target})^2] \quad (2)$$

式中, $\alpha_r$ 为目标引力场调节系数; $x_{target}$ 、 $y_{target}$ 分别为目标位置的横、纵坐标; $x_r$ 为道路横坐标。

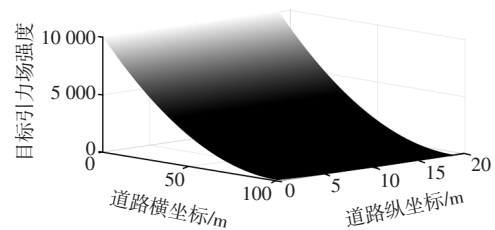


图2 目标引力场示意

### 2.3 障碍物风险场建模

车辆外形可简化为长方体,考虑到车辆避障路径的平滑性要求,参考王明强<sup>[6]</sup>等所选择的形状类似车辆的二维正态分布函数对障碍物风险场进行建模,该函数的特点是:越靠近障碍物风险值越大,并且可通过调节模型的长、短轴达到调节障碍物横、纵向风险值的目的。障碍物风险场强度 $U_{obs}$ 的表达式为:

$$U_{obs} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(x_r - x_{obs})^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y_r - y_{obs})^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \quad (3)$$

式中, $x_{obs}$ 、 $y_{obs}$ 分别为障碍物的横、纵坐标; $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 分别为障碍物沿大地坐标系 $x_r$ 方向和 $y_r$ 方向的分布因子。

由于障碍物相对于试验车有静止和运动2种状态,故构建障碍物风险场模型时应考虑障碍物与试验车之

间的相对速度和相对加速度对风险场的影响。同时,障碍物的转向也会影响风险场的分布方向,参考田野<sup>[3]</sup>等提出的方法对坐标进行转换,转换后的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_\varphi \\ y_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_{obs} \\ y_r - y_{obs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{obs} \\ y_{obs} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\varphi_1$ 为障碍物转向角; $x_\varphi$ 、 $y_\varphi$ 分别为障碍物转向角为 $\varphi_1$ 时的道路横、纵坐标。

另外,对于典型的天气由晴转雨的驾驶工况,路面附着条件会发生较大变化。路面附着系数的不同显然会对车辆避障产生较大影响,如车辆在低附着系数路面上进行避障时,避障路径应比在高附着系数路面上行驶时的避障路径更平滑,从而保证避障安全。综上,障碍物风险场如图3所示,障碍物风险场强度 $U_{obs}$ 的具体数学模型可表示为:

$$U_{obs} = \beta_v \cdot \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{(x_\varphi - x_{obs})^2}{(1 + \beta_v v \beta_\mu \mu \cos \varphi_1)^2} + \frac{(y_\varphi - y_{obs})^2}{2 \cdot (1 + \beta_{obs} |\sin \varphi_1|)^2} \right) + \beta_a a \cdot \cos(\arctan(x_\varphi, y_\varphi)) \right) \quad (5)$$

式中, $\beta_v$ 为障碍物风险场调节系数; $v$ 为试验车与障碍物的相对速度; $\beta_a$ 为相对速度调节系数; $\mu$ 为路面附着系数; $\beta_\mu$ 为路面附着系数调节系数; $\beta_{obs}$ 为障碍物外形尺寸调节系数; $a$ 为相对加速度; $\beta_a$ 为相对加速度调节系数。

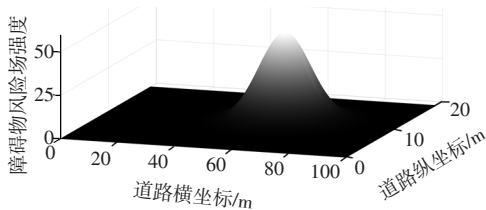


图3 障碍物风险场示意

综上,行车风险场强度 $U$ 由道路边界风险场强度、目标引力场强度和障碍物风险场强度相加得到,如图4所示,具体表达式为:

$$U = U_{road} + U_{target} + U_{obs} \quad (6)$$

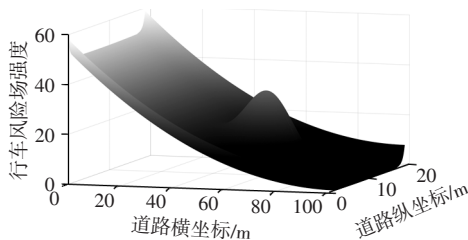


图4 行车风险场示意

## 2.4 路面附着系数的估算

考虑适用性,本文采取基于 Effect-Based 的路面附

着系数估算方法,以三自由度车辆动力学模型和 Dugoff 轮胎模型为基础<sup>[12]</sup>,模型如图5所示,具体表达式为:

$$\begin{cases} \dot{v}_x = a_x + v_y \varphi \\ \dot{v}_y = a_y - v_x \varphi \\ \ddot{\varphi} = \frac{\Gamma}{I_z} \end{cases} \quad (7)$$

其中,纵、横向加速度 $a_x$ 、 $a_y$ 、横摆力矩 $\Gamma$ 的具体表达式为:

$$\begin{cases} a_x = \frac{1}{m} (F_{xfl} \cos \delta - F_{yfl} \sin \delta + F_{xfr} \cos \delta - F_{yfr} \sin \delta + F_{xrr} + F_{xrl}) \\ a_y = \frac{1}{m} (F_{xfl} \sin \delta + F_{yfl} \cos \delta + F_{xfr} \sin \delta - F_{yfr} \cos \delta + F_{xrl} + F_{xrr}) \\ \Gamma = \frac{T_f}{2} (F_{yfl} - F_{yfr}) \sin \delta - \frac{T_r}{2} (F_{xfl} - F_{xfr}) \cos \delta - \frac{T_x}{2} (F_{xrl} - F_{xrr}) + l_f (F_{xfl} + F_{xfr}) \sin \delta + l_r (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta - l_r (F_{yfl} + F_{yfr}) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\ddot{\varphi}$ 为横摆角加速度; $m$ 为车辆质量; $I_z$ 为车辆的转动惯量; $\delta$ 为前轮转角; $\beta$ 为质心侧偏角; $l_f$ 、 $l_r$ 分别为质心到前、后轴距离; $v_y$ 、 $v_x$ 分别为横、纵向速度; $F_{xfl}$ 、 $F_{xfr}$ 、 $F_{xrl}$ 、 $F_{xrr}$ 分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮纵向力; $F_{yfl}$ 、 $F_{yfr}$ 分别为左前轮、右前轮横向力; $T_f$ 、 $T_r$ 分别为前、后轴轴距。

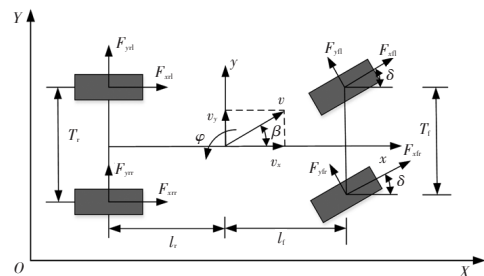


图5 车辆三自由度模型

Dugoff 轮胎模型为:

$$\begin{cases} F_{xij} = \mu_{ij} F_{xij}^0 = \mu_{ij} F_{zij} C_x \frac{\lambda_{ij}}{1 - \lambda_{ij}} f(L) \\ F_{yij} = \mu_{ij} F_{yij}^0 = \mu_{ij} F_{zij} C_y \frac{\tan \alpha_{ij}}{1 - \lambda_{ij}} f(L) \end{cases} \quad (9)$$

其中,轮胎力非线性特征函数 $f(L)$ 、用于描述轮胎滑移的非线性参数 $L$ 、4个轮胎的滑移率 $\lambda_{ij}$ 分别为:

$$f(L) = \begin{cases} L(2-L), & L < 1 \\ 1, & L \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$L = \frac{1}{\sqrt{C_x^2 \lambda_{ij}^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha_{ij}}} (1 - \lambda_{ij}) \times (1 - \varepsilon v_x \sqrt{C_x^2 \lambda_{ij}^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha_{ij}}) \quad (11)$$

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} \frac{R\omega_{ij} - v_{ij}}{v_{ij}} = \frac{R\omega_{ij}}{v_{ij}} - 1 < 0, \text{ 制动} \\ \frac{R\omega_{ij} - v_{ij}}{R\omega_{ij}} = 1 - \frac{v_{ij}}{R\omega_{ij}} > 0, \text{ 驱动} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $R$  为轮胎半径;  $\mu_{ij}$  为估算的 4 个轮胎路面附着系数;  $F_{xij}$ 、 $F_{yij}$ 、 $F_{zij}$  分别为 4 个轮胎的纵向力、横向力、垂向力;  $F_{xij}^0$ 、 $F_{yij}^0$  分别为 4 个轮胎的纵向、横向归一化力;  $\alpha_{ij}$  为 4 个轮胎的侧偏角;  $\omega_{ij}$  为 4 个轮胎的角速度;  $v_{ij}$  为 4 个车轮的轮速;  $C_x$ 、 $C_y$  分别为轮胎纵向刚度、侧偏刚度;  $\varepsilon$  为速度影响因子;  $ij=fl, fr, rl, rr$  分别表示左前轮、右前轮、左后轮、右后轮。

结合容积卡尔曼滤波算法对车辆状态和路面附着系数进行估算, 估算过程如图 6 所示。

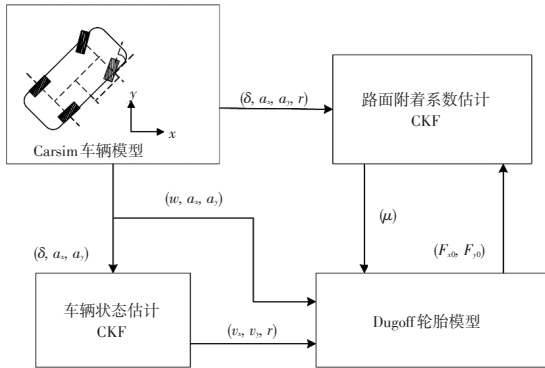


图 6 车辆状态及路面附着系数估算流程

基于上述模型和路面附着系数间的函数关系, 建立容积卡尔曼滤波算法的状态方程和观测方程, 状态变量选取 4 个车轮的路面附着系数:

$$\mathbf{x}(t) = [\mu_{fl} \ \mu_{fr} \ \mu_{rl} \ \mu_{rr}]^T \quad (13)$$

横摆角速度  $\dot{\varphi}$  可直接由传感器获取, 故将其作为观测变量, 观测变量为:

$$\mathbf{y}(t) = [a_x \ a_y \ \dot{\varphi}]^T \quad (14)$$

控制量为前轮转角  $\delta$  和归一化轮胎力:

$$\mathbf{u}(t) = [\delta \ F_{xfl}^0 \ F_{yfl}^0 \ F_{xfr}^0 \ F_{yfr}^0 \ F_{xrl}^0 \ F_{yrl}^0 \ F_{xrr}^0 \ F_{yrr}^0]^T \quad (15)$$

式中,  $F_{xij}^0$ 、 $F_{yij}^0$  分别为 4 个车轮的纵向、横向归一化轮胎力。

综上, 基于容积卡尔曼滤波的状态空间方程可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) + \boldsymbol{\omega}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) + \boldsymbol{\omega}_1(t) \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\boldsymbol{\omega}(t)$  为过程噪声;  $\boldsymbol{\omega}_1(t)$  为观测噪声。

方程具体表达式为:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{fl} \\ \mu_{fr} \\ \mu_{rl} \\ \mu_{rr} \end{bmatrix} + \boldsymbol{\omega}(t) \quad (17)$$

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} \frac{A(1,1)}{m} & \frac{A(1,2)}{m} & \frac{F_{xfl}^0}{m} & \frac{F_{xfr}^0}{m} \\ \frac{A(2,1)}{m} & \frac{A(2,2)}{m} & \frac{F_{yfl}^0}{m} & \frac{F_{yfr}^0}{m} \\ \frac{A(3,1)}{I_z} & \frac{A(3,2)}{I_z} & \frac{A(3,3)}{I_z} & \frac{A(3,4)}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{fl} \\ \mu_{fr} \\ \mu_{rl} \\ \mu_{rr} \end{bmatrix} + \boldsymbol{\omega}(t) \quad (18)$$

式中,  $A(1,1) = F_{xfl}^0 \cos \delta - F_{yfl}^0 \sin \delta$ ;

$A(1,2) = F_{xfr}^0 \cos \delta - F_{yfr}^0 \sin \delta$ ;  $A(2,1) = F_{xfl}^0 \sin \delta - F_{yfl}^0 \cos \delta$ ;

$A(2,2) = F_{xfr}^0 \sin \delta - F_{yfr}^0 \cos \delta$ ;

$A(3,1) = l_f(F_{xfl}^0 \sin \delta + F_{yfl}^0 \cos \delta) - \frac{T_f}{2}(F_{xfl}^0 \cos \delta - F_{yfl}^0 \sin \delta)$ ;

$A(3,2) = l_f(F_{xfr}^0 \sin \delta + F_{yfr}^0 \cos \delta) + \frac{T_f}{2}(F_{xfl}^0 \cos \delta - F_{yfl}^0 \sin \delta)$ ;

$A(3,3) = -\frac{T_r}{2}F_{xrl}^0 - l_r F_{yrl}^0$ ;  $A(3,4) = \frac{T_r}{2}F_{xrr}^0 - l_r F_{yrr}^0$ 。

设仿真初始值为  $\mathbf{x}(0) = [0.6 \ 0.6 \ 0.6 \ 0.6]^T$ , 设前 4 s 路面附着系数为 0.8, 4 s 后路面附着系数设为 0.4, 仿真结果如图 7 所示。由图 7 可知, 该方法能有效估算路面附着系数。

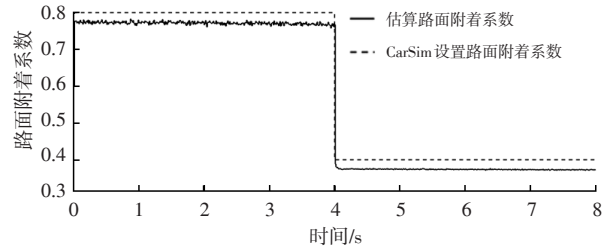


图 7 路面附着系数识别结果

### 3 模型预测路径跟踪控制器设计

#### 3.1 车辆避障路径跟踪

车辆避障路径跟踪的前提是所规划的避障参考路径。根据行车风险场模型并结合路面附着系数识别结果, 可得到考虑路面附着系数的实时行车风险场。车辆避障的主要目的是确保安全性, 因此, 避障过程中车辆应向着风险场中风险值降低最快的方向(负梯度方向)行驶。考虑到直接按照行车风险场负梯度方向规划的避障初始路径可能存在不平滑、不符合车辆动力学约束等情况, 因此对该路径采用 5 次多项式拟合优化可得到模型预测控制算法跟踪的避障参考路径。具体流程如图 8 所示。

#### 3.2 车辆动力学模型

车辆避障问题涉及车辆转向, 因此需考虑车辆横、纵向运动和横摆运动。忽略悬架影响、垂向运动等<sup>[13]</sup>因素, 建立如图 5 所示的三自由度车辆模型。

推导可得车辆动力学非线性模型为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m\dot{\gamma}\dot{\varphi} + 2F_{xf} + 2F_{xr} \\ m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\varphi} + 2F_{yf} + 2F_{yr} \\ I_z\ddot{\varphi} = 2l_f F_{yf} - 2l_r F_{yr} \\ \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \\ \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \end{cases} \quad (19)$$

式中, $X$ 、 $Y$ 分别为大地坐标系下的车辆横、纵坐标; $x$ 、 $y$ 分别为车辆坐标系下的车辆横、纵坐标; $F_{xf}$ 、 $F_{xr}$ 车辆前、后轮受到沿 $x$ 轴方向的力; $F_{yf}$ 、 $F_{yr}$ 分别为车辆前、后轮受到沿 $y$ 轴方向的力。

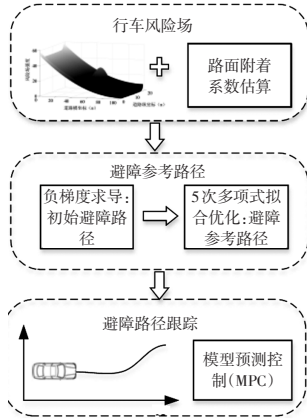


图8 车辆避障流程

考虑计算量问题,对模型进行简化。假设车辆以小角度转向,则有 $\sin\delta=\delta$ 、 $\cos\delta=1$ ,可得车辆动力学模型为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m\dot{\gamma}\dot{\varphi} + 2\left[C_{lf}s_f + C_{cf}\left(\delta - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}}\right)\delta + C_{lr}s_r\right] \\ m\ddot{y} = -m\dot{\gamma}\dot{\varphi} + 2\left[C_{cf}\left(\delta - \frac{\dot{y} + l_f\dot{\varphi}}{\dot{x}}\right) + C_{cr}\frac{l_r\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}}\right] \\ I_z\ddot{\varphi} = 2\left[l_f C_{cf}\left(\delta - \frac{\dot{y} + l_f\dot{\varphi}}{\dot{x}}\right) - l_r C_{cr}\frac{l_r\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}}\right] \\ \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \\ \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \end{cases} \quad (20)$$

式中, $s_f$ 、 $s_r$ 分别为前、后轮胎的滑移率; $C_{lf}$ 、 $C_{lr}$ 分别为前、后轮胎的纵向刚度; $C_{cf}$ 、 $C_{cr}$ 分别为前、后轮胎的侧偏刚度。

### 3.3 预测方程

基于所建立的车辆三自由度模型,选取车辆的横向速度 $\dot{y}$ 、纵向速度 $\dot{x}$ 、横摆角 $\varphi$ 、横摆角速度 $\dot{\varphi}$ ,以及车辆的横、纵向位置 $X$ 、 $Y$ 为系统状态量:

$$\xi = [\dot{y} \quad \dot{x} \quad \varphi \quad \dot{\varphi} \quad Y \quad X]^T \quad (21)$$

以前轮转角为控制量,即 $u=[\delta]$ 。首先对非线性动力学模型 $\dot{\xi}=f(\xi,u)$ 进行线性化处理,得到线性状态空间方程<sup>[2]</sup>:

$$\dot{\xi} = A(t)\xi(t) + B(t)u(t) \quad (22)$$

式中, $A(t)=\partial f(\xi,u)/\partial u$ ; $B(t)=\partial f(\xi,u)/\partial \xi$ 。

同时对得到的线性状态空间方程进行离散化处理,可得:

$$\xi(k+1) = A\xi(k) + B u(k) \quad (23)$$

式中, $A_t = I_{m_1} + T A(t)$ ; $B_t = T B(t)$ ; $m_1$ 为状态量维度; $T$ 为系统采样时间。

设 $\tilde{\xi}(k|t) = [\xi(k|t) \quad u(k-1|t)]^T$ ,可推导出新的预测状态表达式:

$$\begin{cases} \tilde{\xi}(k+1|t) = \tilde{A}_t \tilde{\xi}(k|t) + \tilde{B}_t \Delta u(k|t) \\ \eta(k|t) = \tilde{C}_t \tilde{\xi}(k|t) \end{cases} \quad (24)$$

式中, $\tilde{C}_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ; $\tilde{A}_t = \begin{bmatrix} A_t & B_t \\ 0_{m_1 \times n} & I_{m_1} \end{bmatrix}$ ; $\tilde{B}_t = [B_t \quad I_{m_1}]$ ;

$\eta(k|t)$ 为状态方程的输出量。

### 3.4 目标函数及约束条件

本文以车辆前轮转角为控制量,同时假设车速不变,考虑到直接以控制量作为目标函数的状态量可能导致控制量跳变大,影响控制精度,因此将控制量的增量作为目标函数的状态量,具体形式为:

$$J(\tilde{\xi}(t), u(t-1), \Delta U(t)) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(t+i|t) - \eta_{ref}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c} \|\Delta u(t+i|t)\|_R^2 + \rho \varepsilon^2 \quad (25)$$

式中, $\eta_{ref}$ 为参考量,由3.1节所求的避障参考路径得到; $N_p$ 为预测时域; $N_c$ 为控制时域; $Q$ 为跟踪效果调节矩阵; $R$ 为控制量变化调节矩阵; $\rho$ 为权重系数; $\varepsilon$ 为防止控制量增量无解的松弛因子; $\Delta U$ 为控制变量的增量集合; $\Delta u$ 控制变量增量。

另外,在求解过程中,目标函数需满足控制量约束和控制量增量约束:

$$\begin{cases} u_{\min} \leq u(t+i) \leq u_{\max}, i=0, 1, \dots, N_c-1 \\ \Delta u_{\min} \leq \Delta u(t+i) \leq \Delta u_{\max}, i=0, 1, \dots, N_c-1 \end{cases} \quad (26)$$

式中, $u_{\min}$ 、 $u_{\max}$ 分别为控制量的最小约束和最大约束; $\Delta u_{\min}$ 、 $\Delta u_{\max}$ 分别为控制量增量的最小约束和最大约束。

为确保车辆在道路边界范围内行驶,对输出变量进行约束:

$$y_{\min} \leq y(t+i) \leq y_{\max}, i=0, 1, \dots, N_c-1 \quad (27)$$

式中, $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$ 分别为道路边界的上、下约束。

此外,还应考虑车辆动力学约束。博世公司对车辆稳定性的研究表明<sup>[14]</sup>,车辆在良好附着路面的极限侧偏角为 $\gamma=\pm 12^\circ$ ,在冰雪路面上 $\gamma=\pm 2^\circ$ 。同时,路面附着系数也约束着车辆的动力性,直接影响车辆的加速度,具体关系为:

$$\sqrt{a_x^2 + a_y^2} \leq \mu g \quad (28)$$

式中, $g$ 为重力加速度。

假设车辆纵向速度  $\dot{x}$  不变,式(28)可简化为:

$$|a_y| \leq \mu g \quad (29)$$

对上述目标函数及其约束条件进行矩阵运算,将其中各约束条件转化为计算机容易求解的二次规划问题<sup>[4]</sup>,然后可求解得到系统控制量在控制域内的增量,同时将第1个增量作用于系统。重复上述求解过程,实现模型预测控制算法对避障路径的跟踪。

### 4 仿真实验

为验证本文所提出方法的有效性,搭建 CarSim 和 MATLAB/Simulink 联合仿真平台,如图9所示。

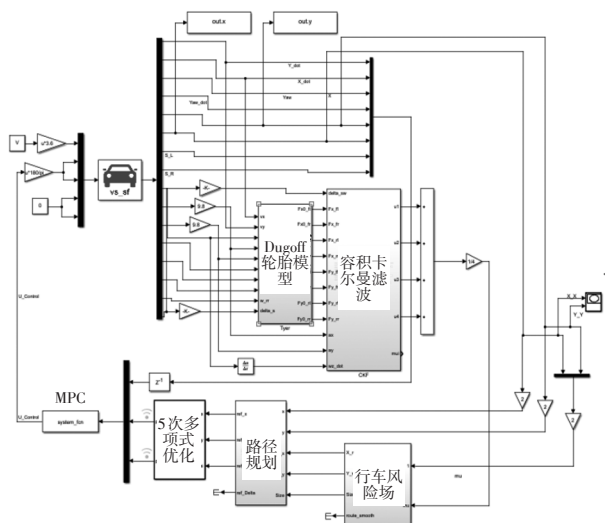


图9 CarSim和MATLAB/Simulink联合仿真平台示意

#### 4.1 基本仿真参数

基本仿真参数主要由车辆参数、风险场参数和模型预测控制参数组成,如表1~表3所示。

表1 车辆参数

参数	取值
车辆质量/kg	1 723
质心到前轴中心距离/m	1.232
质心到后轴中心距离/m	1.468
车辆绕z轴转动惯量/kg·m <sup>2</sup>	4 175
前轮侧偏刚度/N·rad <sup>-1</sup>	66 900
后轮侧偏刚度/N·rad <sup>-1</sup>	62 700

#### 4.2 仿真场景与分析

本文的仿真场景是在 CarSim 中搭建的单车车道宽为 3.75 m 的 4 车道道路。障碍车在试验车辆正前方静止不动,两车距离为  $d$ ,具体表达式为:

$$d = v_{ego} t_{TTC} \quad (30)$$

式中,  $v_{ego}$  为试验车车速;  $t_{TTC}$  为碰撞时间,为保证避障安全,取  $t_{TTC} = 5 \text{ s}$ <sup>[15]</sup>。

表2 风险场参数

参数	取值
道路左边界 $L_{left}/\text{m}$	16
道路右边界 $L_{right}/\text{m}$	1
道路边界风险场调节系数 $\lambda_i$	0.1
路面附着系数调节系数 $\beta_s$	0.4
目标引力场调节系数 $\alpha_i$	0.003
障碍物风险场调节系数 $\beta_o$	30
相对速度调节系数 $\beta_r$	2
障碍车外形尺寸调节系数 $\beta_{obs}$	1

表3 模型预测控制器参数

参数	取值
采样时间/s	0.02
预测时域 $N_p$	30
控制时域 $N_c$	10
跟踪效果调节矩阵 $Q$	[2 000 0; 0 10 000]
控制量变化调节矩阵 $R$	[5×10 <sup>3</sup> ]
权重系数	10
松弛因子	10 000

在路面附着系数的选择和设定方面,根据《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》第四十六条的规定,车辆在冰雪道路上行驶时车速不得超过 30 km/h。同时,从实际情况考虑,车辆在冰雪路面上行驶时大多会通过加装防滑链条、路面撒盐等方法提高路面附着系数。因此本文主要针对中高附着系数路面进行仿真验证。仿真场景如图10所示。

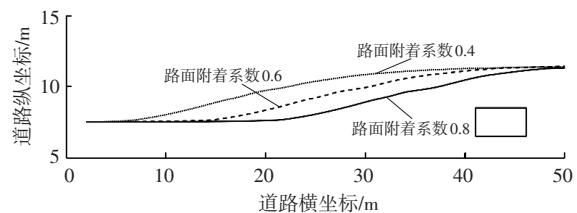


图10 仿真场景示意

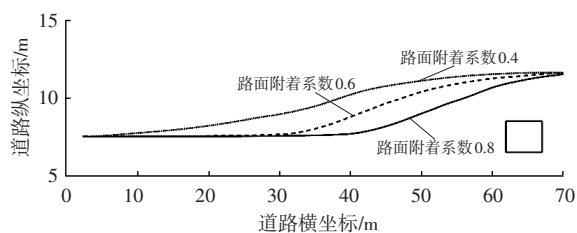
本文设置4种仿真工况,工况1~工况4中,试验车车速分别为 30 km/h、45 km/h、60 km/h、90 km/h,障碍车与试验车的距离分别为 41.6 m、62.5 m、83.3 m、125 m,仿真结果如图11~图14所示。

由图11可以看出:不同路面附着条件下,试验车辆的避障路径有明显变化,证明了考虑路面附着系数及其变化对车辆避障的必要性。由图12可以看出:同一速度下,路面附着系数越小,避障时的横向加速度越小,并

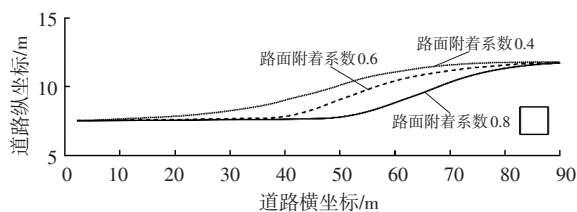
且在各种工况下横向加速度均满足3.3节中所提出的加速度约束;不同速度下,相同的路面附着条件下避障,车速越高时,避障的横向加速度越大。从图13中可以看出:同一车速下,路面附着系数越小,车辆避障时的侧偏角越小;在同一路面附着系数条件下,车速越高,车辆避障时的侧偏角越大;另外,车辆避障时的侧偏角也满足文献[14]中的稳定性约束。



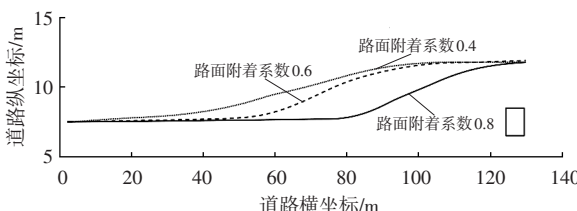
(a) 工况1



(b) 工况2

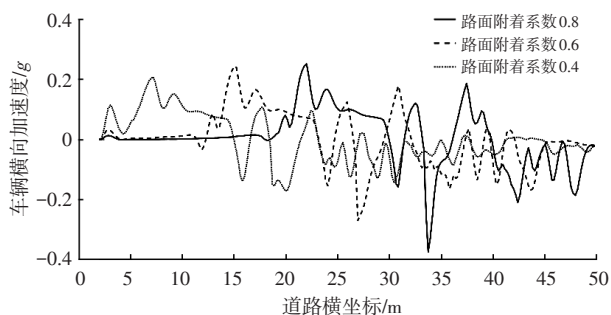


(c) 工况3

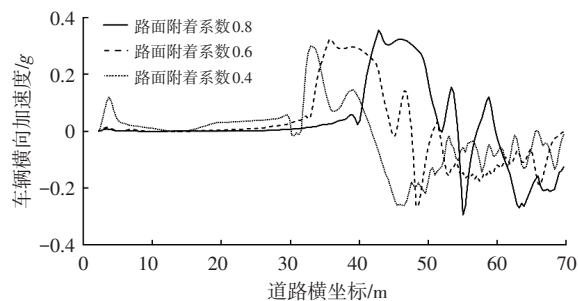


(d) 工况4

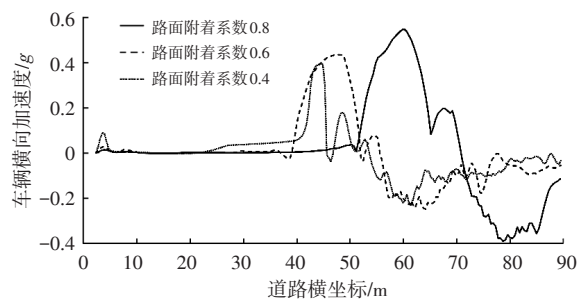
图11 车辆路径跟踪仿真结果



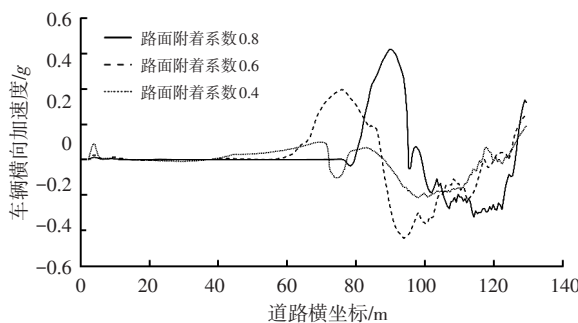
(a) 工况1



(b) 工况2

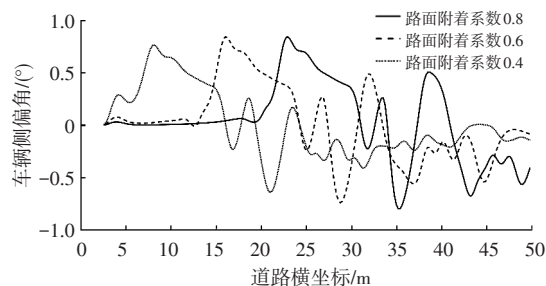


(c) 工况3

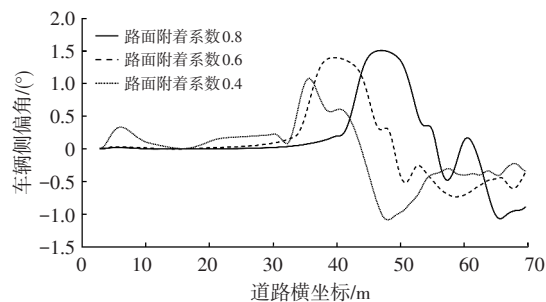


(d) 工况4

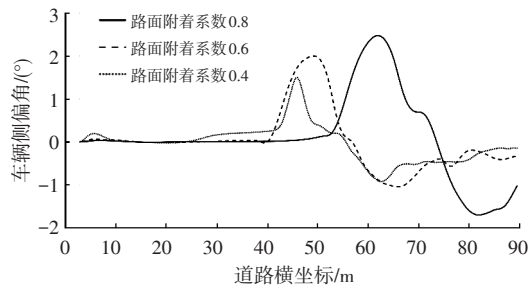
图12 车辆横向加速度仿真结果



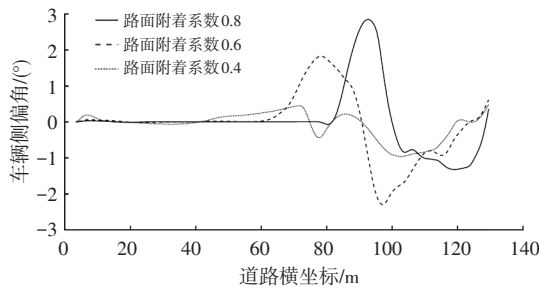
(a) 工况1



(b) 工况2



(c)工况3



(d)工况4

图13 车辆侧偏角仿真结果



图14 90 km/h车速下车辆侧滑结果

为更直观地说明不同路面附着条件下的车辆避障效果,求取车辆避障控制过程中的横向加速度时间历程曲线的标准差,并以此评判避障过程的平顺性。利用MATLAB对车辆横向加速度数据进行处理并计算可得:车速为30 km/h时,路面附着系数为0.4时的避障横向加速度标准差相比路面附着系数为0.8时的避障横向加速度标准差减小了15.5%;车速为45 km/h、60 km/h、90 km/h时的避障横向加速度标准差分别减小了23.7%、51.4%、55.9%。结果证明了在同一速度下,路面附着系数越小,车辆避障越平顺。

另外,由图13d可以看出,路面附着系数为0.4时的车辆侧偏角变化明显不同于路面附着系数为0.6和0.8的情况,图14所示的CarSim仿真动画显示车辆在避障时发生了轻微侧滑。对比图13a~图13c可以看出,造成侧滑的原因是车速过高。

## 5 结束语

本文提出了一种考虑路面附着系数的行车风险场  
2023年 第7期

模型,其中重点考虑了不同路面附着系数条件下车辆避障路径的规划问题。结合车辆三自由度模型,设计了模型预测控制器对避障路径进行跟踪控制。CarSim和MATLAB/Simulink联合仿真结果表明:在车速一定的条件下,路面附着系数对试验车辆的避障路径和避障效果有较大影响:路面附着系数越小,车辆的避障横向加速度越小,横向加速度的标准差也越小,避障效果越平顺。考虑路面附着系数的行车风险场模型可以根据路面附着系数的变化实时获得最优路径规划,所提出的方法适用于道路环境突变条件下的避障驾驶场景,可有效提高车辆避障的安全性。

## 参 考 文 献

- [1] 张珂,刘畅,兰鹏宇. 基于改进人工势场法的局部路径规划[J]. 汽车文摘, 2021(7): 59-62.  
ZHANG K, LIU C, LAN P. Local Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field Method [J]. Automotive Digest, 2021(7): 59-62.
- [2] 唐志荣,冀杰,吴明阳,等. 基于改进人工势场法的车辆路径规划与跟踪[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(6): 174-182.  
TANG Z R, JI J, WU M Y, et al. Vehicles Path Planning and Tracking Based on an Improved Artificial Potential Field Method[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2018, 40(6): 174-182.
- [3] 田野,裴华鑫,晏松,等. 车路协同环境下行车风险场模型的扩展与应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3): 447-457.  
TIAN Y, PEI H X, YAN S, Et al. Extended Driving Risk Field Model for i-VICS and Its Application[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(3): 447-457.
- [4] 张家旭,王晨,赵健. 基于改进人工势场法的汽车弯道超车路径规划与跟踪控制[J]. 汽车工程, 2021, 43(4): 546-552.  
ZHANG J X, WANG C, ZHAO J. Path Planning and Tracking Control for Vehicle Overtaking on Curve Based on Modified Artificial Potential Field Method[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(4): 546-552.
- [5] 李彩霞,卢少波,张博涵,等. 基于行人位置预测的人车转向避障路径规划[J]. 汽车工程, 2021, 43(6): 877-884.  
LI C X, LU S B, ZHANG B H, et al. Human-Vehicle Steering Collision Avoidance Path Planning Based on Pedestrian Location Prediction[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(6): 877-884.
- [6] 王明强,王震坡,张雷. 基于碰撞风险评估的智能汽车局部路径规划方法研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 28-41.

- WANG M Q, WANG Z P, ZHANG L. Local Path Planning for Intelligent Vehicles Based on Collision Risk Evaluation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 28-41.
- [7] 陈宇珂, 林棻, 王少博. 基于障碍物势场和模型预测的车辆避障路径规划[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(10): 34-41.
- CHEN Y K, LIN F, WANG S B. Vehicle Path Planning Based on Obstacle Potential Field and Model Predictive Obstacle[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(10): 34-41.
- [8] 李刚, 解瑞春, 李宁, 等. 基于卡尔曼滤波的车辆状态与路面附着估计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 129-135.
- LI G, XIE R C, LI N, et al. Estimation of Vehicle State and Road Adhesion Coefficient Based on Kalman Filter[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(8): 129-135.
- [9] 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.
- [10] 林棻, 王少博, 赵又群, 等. 基于改进Keras模型的路面附着系数估计[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 74-86.
- LIN F, WANG S B, ZHAO Y Q, et al. Road Friction Coefficient Estimation Based on Improved Keras Model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(12): 74-86.
- [11] SHAO L, JIN C, LEX C, et al. Robust Road Friction Estimation During Vehicle Steering[J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(4): 493-519.
- [12] 陈锦曦. 基于容积卡尔曼滤波的路面附着系数估计算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- CHEN J X. Research on the Algorithm of the Road Friction Coefficient Estimation Based on the Cubature Kalman Filter [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [13] 龚国铮, 郑少武, 钟思祺, 等. 基于预测模型的无人赛车路径规划算法研究[J]. 汽车技术, 2022(7): 32-41.
- GONG G Z, ZHENG S W, ZHONG S Q, et al. Research on Path Planning Algorithm of Driverless Race Car Based on Predictive Model[J]. Automobile Technology, 2022(7): 32-41.
- [14] VAN ZANTEN A T, ERHARDT R, LANDESFEIND K, et al. VDC System Development and Perspective[J]. SAE Transactions, 1998, 107(6): 424-444.
- [15] 陈景旭, 程文昱, 万剑, 等. 基于NGSIM微观轨迹数据的车辆跟驰行为安全评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 1-6+21.
- CHEN J X, CHENG W Y, WAN J, et al. Safety Evaluation of Car- Following Behavior Based on NGSIM Micro Trajectory Data[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(1): 1-6+21.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2022年7月20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