

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.10.010

# 考虑侧风稳定性的汽车轨迹跟踪自适应时域 模型预测控制\*

袁志群<sup>1,2,3</sup>, 陈衍强<sup>1</sup>, 常宇轩<sup>1</sup>, 霍殿生<sup>1</sup>, 林立<sup>1,2</sup>

(1. 厦门理工学院机械与汽车工程学院, 厦门 361024; 2. 福建省客车先进设计与制造重点实验室, 厦门 361024;  
3. 福建省风灾害与风工程重点实验室, 厦门 361024)

**[摘要]** 为扩展模型预测控制的应用场景,提高智能汽车在极端风环境下的轨迹跟踪精度,提出了一种考虑侧风稳定性的自适应时域控制方法。首先,以跨海桥梁上轿车超车过程为研究对象,采用汽车空气动力学与系统动力学耦合方法建立轿车超车的侧风稳定性分析模型;接着,建立汽车侧偏安全风险模型,以侧偏风险等级、车速及横向误差为参考设计时域自适应调节器,实现预测时域和控制时域的动态调节;最后,采用CarSim和Simulink搭建联合仿真场景,通过五次多项式规划超车轨迹,验证控制器的跟踪精度及鲁棒性。结果表明:与固定时域及变权重模型预测控制器相比,改进后的控制器可以更好地抵抗“风-车-桥”的气动干扰,以较低的实时性代价提高了车辆轨迹跟踪精度,汽车侧风稳定性得到明显提升。

**关键词:** 智能汽车; 自动驾驶; 侧风稳定性; 自适应时域; 模型预测控制; 轨迹跟踪

## Model Predictive Control with Adaptive Horizon for Vehicle Trajectory Tracking Considering Crosswind Stability

Yuan Zhiqun<sup>1,2,3</sup>, Chen Yanqiang<sup>1</sup>, Chang Yuxuan<sup>1</sup>, Huo Diansheng<sup>1</sup> & Lin Li<sup>1,2</sup>

1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024;  
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Bus Coach, Xiamen 361024;  
3. Fujian Provincial Key Laboratory of Wind Disaster and Wind Engineering, Xiamen 361024

**[Abstract]** In order to extend the application scenario of model predictive control and improve the trajectory tracking accuracy of intelligent vehicles in extreme wind environment, an adaptive horizon control method considering crosswind stability is proposed. Firstly, taking the process of car overtaking on the sea-crossing bridge as the research object, the crosswind stability analysis model of car overtaking is established by using the coupling method of vehicle aerodynamics and system dynamics. Then, the safety risk model of vehicle lateral motion is established, and the adaptive horizon regulator is designed taking into consideration of lateral motion risk level, vehicle speed and lateral error, so as to realize the dynamic adjustment of prediction horizon and control horizon. Finally, CarSim and Simulink are used to build a joint simulation scenario, and the overtaking trajectory is planned by quintic polynomial to verify the tracking accuracy and robustness of the controller. The results show that compared with the fixed horizon and variable weight model predictive controller, the improved controller can better resist the aerodynamic interference of 'wind-vehicle-bridge' and improve the vehicle trajectory tracking accuracy at a lower real-time cost, with significant improvement in vehicle crosswind stability.

**Keywords:** intelligent car; automatic driving; crosswind stability; adaptive horizon; model predictive control; trajectory tracking

\* 国家自然科学基金(52278537)和福建省科技厅引导性项目(2021Y0045)资助。

原稿收到日期为2024年04月24日,修改稿收到日期为2024年06月07日。

通信作者:袁志群,副教授,硕士研究生导师,E-mail:yzqhnu@163.com。

## 前言

智能汽车是智能交通系统的重要组成部分,智能交通系统的发展对智能汽车的行驶稳定性提出了更高要求。在实际行驶环境中,侧风的干扰不可忽视,尤其是沿海地区的跨海桥梁,常年遭受强风或者台风的侵扰,国内外已发生多起侧偏、侧滑甚至侧翻安全事故,严重影响了交通节点的通行安全及效率。因此,研究强风环境下的汽车行驶稳定性对智能汽车技术的开发具有重要的工程意义。

横向运动控制是影响智能汽车行驶稳定性的主要因素,由于模型预测控制(model predictive control, MPC)能够实现滚动优化,且能够做出更好的类人控制效果,因此,在智能汽车轨迹跟踪领域应用广泛<sup>[1-4]</sup>。提高控制精度和计算效率是MPC控制器开发的关键,近年来,国内外学者对此开展了大量研究:根据最优转角及侧向加速度,利用梯度下降法动态调整采样时间,并且将权重矩阵及预测时域作为变量,设计自适应调节器优化计算效率<sup>[5-6]</sup>;设计预测模型用于调整采样时间,实现近端采样时间间隔小、远端采样时间间隔大,使汽车能够提前检测到障碍物,减轻计算压力<sup>[2]</sup>;设计不同的自适应模型,调整MPC的预测时域,实现高精度轨迹跟踪控制<sup>[7-8]</sup>;通过神经网络离线训练自适应模型弥补建模误差,在线调整权重矩阵及预测时域<sup>[9-11]</sup>。然而,相关研究主要关注道路曲率变化引起的外界干扰,忽略了自然侧风和环境侧风的影响,但其对控制精度及计算效率影响极大。已有研究表明:汽车在无控制状态下,当侧风风速为16 m/s、车速为108 km/h时,2 s时间内的侧向偏移接近2.1 m<sup>[12]</sup>。侧风干扰中,尤以“风-车-桥”的气动干扰影响最大,特别是极端风环境下跨海大桥上的超车工况,汽车极易驶入相邻车道诱发行车安全事故。智能汽车在跨海大桥上超车时,既要保证自身安全,又要保证各车道交通流的顺畅,因此,如何建立汽车系统动力学模型,考虑车辆的非线性特性及外界干扰,设计合理的控制约束<sup>[13-16]</sup>,保证超车过程的安全性和稳定性,是开展智能汽车在极端风环境下横向运动控制的关键技术。

针对上述问题,本文以跨海桥梁上轿车超轿车工况为研究对象,基于汽车空气动力学和系统动力学耦合方法建立汽车超车过程的侧风稳定性模型,并基于此提出一种自适应时域模型预测控制方法

(adaptive horizon model predictive control, AHMPC),根据汽车横向误差估计侧偏安全风险等级,将当前车速、侧偏风险等级及横向误差作为控制输入,时域增量作为输出,动态调整预测时域和控制时域。基于CarSim和Simulink联合仿真模型进行仿真试验,与定时域及变权重MPC进行对比,验证AHMPC控制方法的可行性。研究结果不仅能提高汽车在极端风环境下的侧风稳定性,还可为智能汽车在侧风干扰下的横向运动控制提供可靠的理论依据。

## 1 汽车动力学模型

采用基于动力学模型的横向运动控制方法进行轨迹跟踪控制,考虑纵向、横向和横摆3个自由度,如图1所示,根据牛顿第二定律建立的汽车动力学微分方程如式(1)所示。其中, $XOY$ 为自然坐标系, $xoy$ 为车辆坐标系。

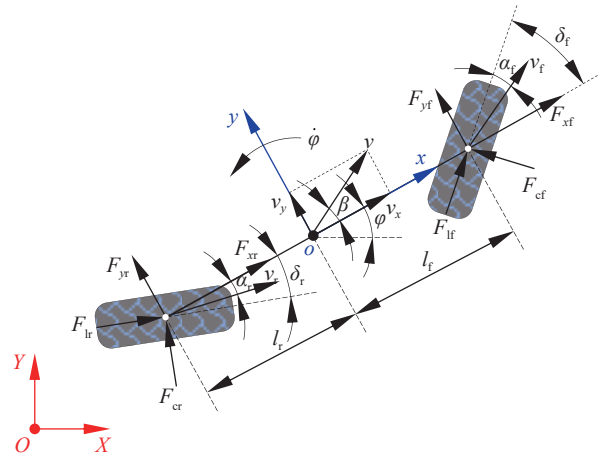


图1 3自由度汽车动力学模型

$$\begin{cases} m\dot{v}_x = mv_y\dot{\varphi} + 2F_{xf} + 2F_{xr} \\ m\dot{v}_y = -mv_x\dot{\varphi} + 2F_{yf} + 2F_{yr} \\ I_z\dot{\varphi} = 2l_fF_{yf} - 2l_rF_{yr} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $m$ 为汽车质量; $v_x$ 和 $v_y$ 为质心纵向速度和侧向速度; $\varphi$ 为车辆横摆角; $F_{xf}$ 、 $F_{xr}$ 和 $F_{yf}$ 、 $F_{yr}$ 分别为前后轮的纵向力和侧向力在车身坐标系的分量,由式(2)和式(3)确定; $l_f$ 为质心至前轴距离; $l_r$ 为质心至后轴距离; $I_z$ 为车身的横摆惯量。

$$\begin{cases} F_{xf} = F_{lf} \cos \delta_f - F_{cf} \sin \delta_f \\ F_{xr} = F_{lr} \cos \delta_r + F_{cr} \sin \delta_r \\ F_{yf} = F_{lf} \sin \delta_f + F_{cf} \cos \delta_f \\ F_{yr} = -F_{lr} \sin \delta_r + F_{cr} \cos \delta_r \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} F_1 = f_1(\alpha, S, \mu, F_z) \\ F_c = f_c(\alpha, S, \mu, F_z) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\delta_f$ 和 $\delta_r$ 分别为前后轮转角; $\alpha$ 为轮胎侧偏角; $S$ 为轮胎滑移率; $\mu$ 为路面摩擦因数; $F_{lf}$ 、 $F_{lr}$ 和 $F_{cf}$ 、 $F_{cr}$ 分别为前后轮的纵向力和侧向力; $F_z$ 为轮胎所受垂直载荷。

文中采用魔术公式轮胎经验模型,选用215/55 R17型号轮胎,根据整车动力学模型输出的车辆状态信息并结合魔术公式拟合得到其侧偏特性和纵向特性。根据小角度近似处理原则,前后轮侧偏角可用式(4)表示,且轮胎特性在小角度侧偏角下满足式(5)所示关系。

$$\begin{cases} \alpha_f = \delta_f - \frac{v_y + l_f \dot{\phi}}{v_x} \\ \alpha_r = \frac{l_r \dot{\phi} - v_y}{v_x} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} F_1 = C_l S \\ F_c = C_c \alpha \end{cases} \quad (5)$$

式中: $C_l$ 为轮胎纵向刚度; $C_c$ 为轮胎侧偏刚度,根据车辆状态信息动态变化。联立式(4)和式(5)可得式(6),自然坐标系与车身坐标系满足式(7)转换关系。

$$\begin{cases} F_{cf} = C_{cf}(\delta_f - \frac{v_y + l_f \dot{\phi}}{v_x}) \\ F_{cr} = C_{cr} \frac{l_r \dot{\phi} - v_y}{v_x} \\ F_{lf} = C_{lf} S_f \\ F_{lr} = C_{lr} S_r \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} v_x = v_x \cos \varphi - v_y \sin \varphi \\ v_y = v_x \sin \varphi + v_y \cos \varphi \end{cases} \quad (7)$$

联立式(1)、式(2)、式(6)和式(7)可得车辆3自由度动力学微分方程,如式(8)所示。文中主要计算参数及其取值如表1所示。

$$\begin{cases} \dot{v}_y = -v_x \dot{\phi} + \frac{2}{m} [C_{lf} S_f \delta_f + C_{cf}(\delta_f - \frac{v_y + l_f \dot{\phi}}{v_x}) + C_{cr} \frac{l_r \dot{\phi} - v_y}{v_x}] \\ \dot{v}_x = v_y \dot{\phi} + \frac{2}{m} [C_{lr} S_r - C_{cf}(\delta_f - \frac{v_y + l_f \dot{\phi}}{v_x}) \delta_f + C_{lf} S_f] \\ \dot{\phi} = \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} = \frac{2l_f}{I_z} [C_{lf} S_f \delta_f + C_{cf}(\delta_f - \frac{v_y + l_f \dot{\phi}}{v_x})] - C_{cr} \frac{2l_r (l_r \dot{\phi} - v_y)}{I_z v_x} \\ v_y = v_x \sin \varphi + v_y \cos \varphi \\ v_x = v_x \cos \varphi - v_y \sin \varphi \end{cases} \quad (8)$$

表1 汽车动力学模型参数

参数	单位	数值
汽车质量 $m$	kg	1 412
质心至前轴距离 $l_f$	mm	1 400
质心至后轴距离 $l_r$	mm	1 650
车身的横摆惯量 $I_z$	kg·m <sup>2</sup>	3 528
路面摩擦因数 $\mu$		0.85

## 2 侧风稳定性模型

### 2.1 计算模型及方法

参考典型的双向六车道跨海桥梁行驶场景建立桥上超车的侧风稳定性模型,被超车轿车位于车道2,主超车分别从车道1和车道3超车,桥上行车过程分为变道、加速以及超车阶段,如图2所示。被超车的车速为72 km/h,主超车变道阶段的车速 $v_1$ 为72 km/h,变道时间 $t_1$ 为3 s,之后轿车逐渐加速,加速末了时刻的车速 $v_2$ 为108 km/h,加速时间 $t_2$ 为3 s,超车阶段的车速 $v_3$ 为108 km/h,超车时间 $t_3$ 为3 s。

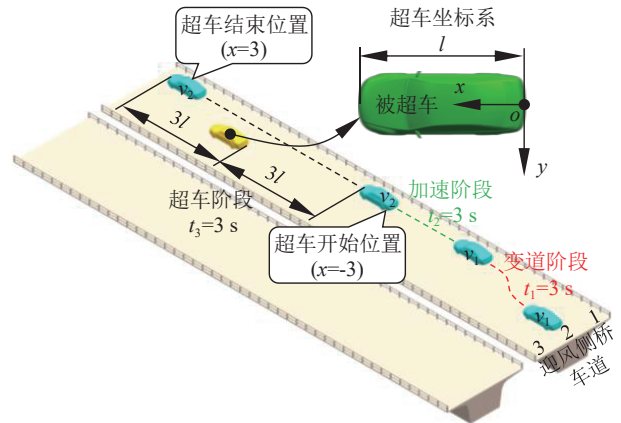


图2 桥上超车示意图

根据图2建立桥上轿车超车过程的气动瞬态模型,如图3所示,其中,桥梁行车道宽度为3.5 m,轿车长、宽、高尺寸分别为5.05、2.1、1.48 m。参考GB/T41722—2022《道路车辆侧风敏感性风机输入开环试验方法》,侧风风速设置为20 m/s。超车过程相对坐标系原点固定于被超车尾端,根据轿车模型长度 $l$ 进行无量纲化。超车阶段初始时刻,主超车最前端距离被超车最尾端为3倍轿车车长,标记为-3,超车阶段结束时刻,主超车最前端距离被超车最尾端为3倍轿车车长,标记为3。

对变道、加速以及超车过程的汽车空气动力学

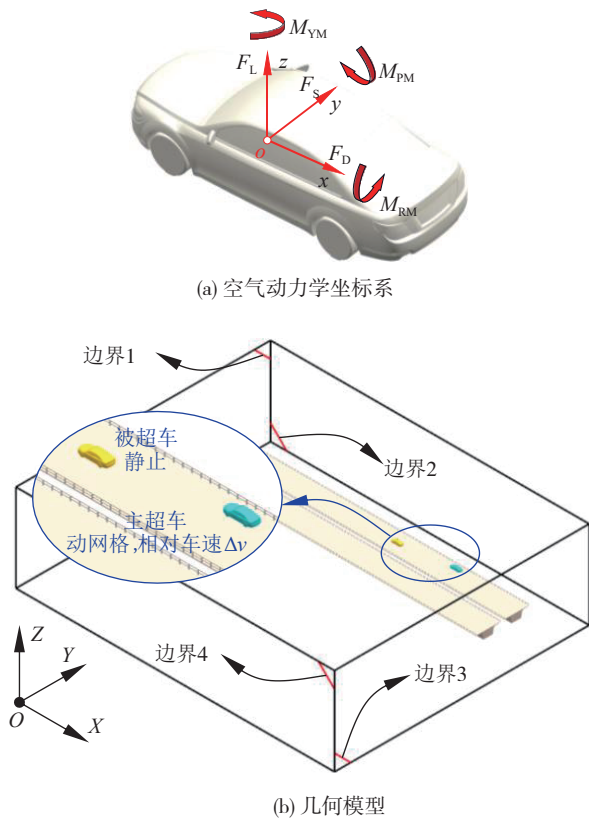


图3 计算模型

模型进行适当简化,主超车变道和加速过程,距离被超车较远,忽略被超车的气动干扰影响,此外,忽略轿车匀速变道时车身姿态变化引起的气动力和气动转矩差异,对相应工况的气动力和气动转矩数据进行拟合处理,因此,文中共设计了7个计算工况。主超车由车道2变道到车道1的气动参数由工况1-2和1-1确定,而主超车由车道2变道到车道3的气动参数由工况1-2和1-3确定;主超车在车道1上加速过程的气动参数由工况1-1和2-1确定,而主超车在车道3上加速过程的气动参数由工况1-3和2-2确定;主超车在车道1上超车阶段的气动参数由3-1确定,而主超车在车道3上超车阶段的气动参数由3-2确定。工况定义及边界条件详见表2所示。

采用四面体网格和三角形网格对计算域进行离散化处理,设置不同的网格尺寸进行加密,经网格无关性验证后确定如下方案,其中,主车和被超车全局面网格尺寸为16 mm,微细结构部位尺寸为4 mm,车体周围设置3层加密区,分别为64、128和512 mm,车身表面拉伸边界层,共计6层高度逐渐递增的棱柱层网格。计算 $y^+$ 值分布在30~100之间,满足T/CSAE 112—2019《乘用车空气动力学仿真技术规

表2 轿车超车过程计算工况

序号	主要边界条件	主超车车道
1-1	边界2:速度入口, $u_x=0\text{ m/s}, u_y=-20\text{ m/s}$ 边界1、3和4:压力出口, $p_{\text{static}}=0$	1
1-2	主超车:动网格,车速 $v=72\text{ km/h}$	2
1-3	其它:壁面边界	3
2-1	边界2:速度入口, $u_x=0\text{ m/s}, u_y=-20\text{ m/s}$ 边界1、3和4:压力出口, $p_{\text{static}}=0$ 主超车:动网格,车速 $v=108\text{ km/h}$	1
2-2	其它:壁面边界	3
3-1	边界1和2:速度入口, $u_x=20\text{ m/s}, u_y=-20\text{ m/s}$ 边界3和4:压力出口, $p_{\text{static}}=0$ 主超车:动网格,相对车速 $\Delta v=36\text{ km/h}$	1
3-2	其它:壁面边界	3

范》要求,体网格总量为4400万左右,如图4所示。计算求解方法选择采用Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型、SIMPLE算法以及2阶迎风离散格式。

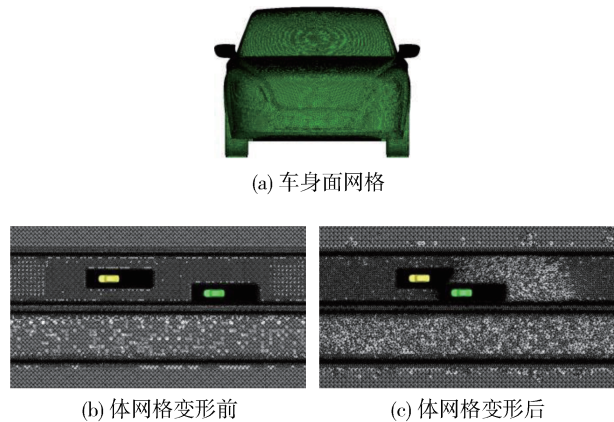


图4 桥上超车网格模型

采用湖南大学风洞实验室测试数据进行计算模型验证,模型比例为1:3,如图5(b)所示,采用眼镜蛇三维脉动风速仪测量来流速度, $v$ 为30 m/s,采用转盘控制横摆角 $\beta$ ,变化范围为 $0^\circ\sim 15^\circ$ ,间隔 $3^\circ$ 测试一次,气动六分力采用浮框式应变天平测量。以风洞试验工况为参考,根据相对运动原理,数值计算的速度分解方法如图5(c)所示,侧风加载速度为 $v_y$ ,采用动网格模拟车速,速度大小设置为 $v_x$ 。数值计算与风洞试验满足几何相似、雷诺相似、运动相似,结果对比见图5(a),两者整体拟合程度较好,大部分工况的计算误差控制在5%以内。因此,文中采用的湍流模型和动网格计算方法可以较好的模拟汽车运动过程的气动力和气动转矩。

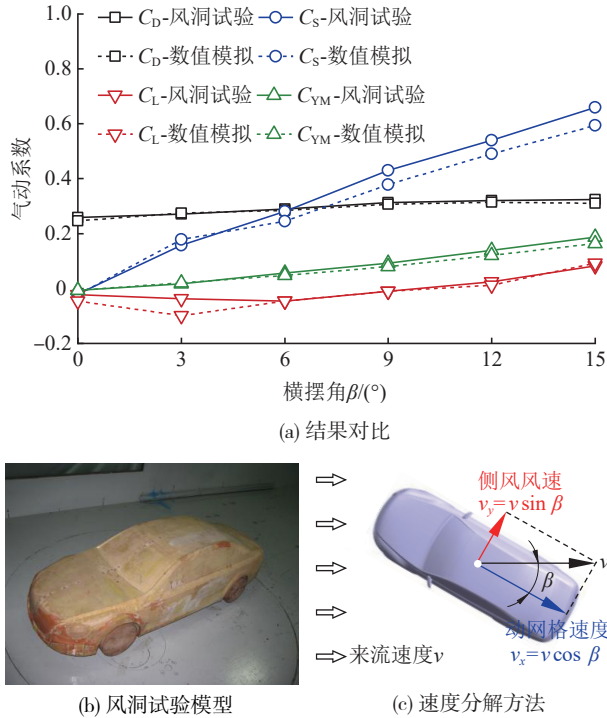


图5 数值计算方法验证

### 2.2 结果分析

气动六分力中,气动侧力和气动横摆力矩是影响汽车侧风稳定性的主要因素,表3和图6为轿车变道和加速过程的气动系数变化和车身压力系数,图7和图8为轿车超车过程的气动系数变化和车身压力系数。由于桥梁截面绕流的影响,不同车道的行车空间风场存在显著差异,车道1流速最大,车道2次之,车道3最小,导致主超车车身压力分布存在明显差异,如图6和图8所示。

表3 轿车变道和加速过程主要气动系数变化

气动系数	工况序号				
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2
侧向力系数 $C_s$	-0.280	-0.166	-0.152	-0.313	-0.200
横摆力矩系数 $C_{yM}$	0.182	0.069	0.058	0.143	0.050

轿车由车道2变道到车道1时,侧向力系数增加了0.114,横摆力矩系数增加0.113,而由车道2变道到车道3时,侧向力系数减小0.014,横摆力矩系数减小了0.011,变道到车道1时,变化幅度更大。轿车在车道1加速时,侧向力系数增加0.033,横摆力矩系数降低0.039,而在车道3加速时,侧向力系数增加0.048,横摆力矩系数降低0.008。轿车在由车道2变道到车道1以及在车道1加速时,车身迎风侧的正压区域变大且正压值更高,背风侧的负压区域

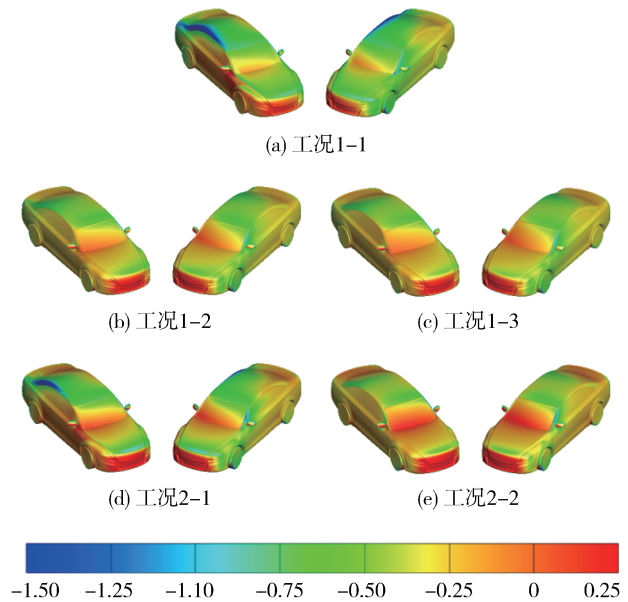


图6 轿车变道和加速过程的车身压力系数

缩小,且负压峰值处于后视镜部位。

当轿车在车道1超车时,侧向力系数的变化范围为-0.416~-0.31,横摆力矩系数的变化范围为0.154~0.186;而当轿车在车道3超车时,侧向力系数的变化范围为-0.362~-0.15,横摆力矩系数的变化范围为0.04~0.11。轿车在车道1超车时,迎风面相对较大,气动侧力和气动横摆力矩的峰值更大;而在车道3超车时,由于被超车对流场的干扰,导致主车遭受的气动干扰变化幅度更高。

对比图6(d)、图6(e)、图7及图8可知,主车在车道3逐渐接近被超车时,由于被超车尾流的气动干扰,车身所受气动侧力及横摆力矩出现了明显的增幅;而在车道1超车时,迎风侧风速高且受被超车尾部迎风侧的高速低压区影响,因此,其气动侧力和气动横摆力矩比车道3更大。当主车与被超车并行时,由于被超车的遮挡,处于车道3的主车所受气动侧力及横摆力矩出现了明显的降幅;而处于车道1的主车,由于被超车的干扰,导致气流在主车与被超车之间形成较大的负压区,相比于单车行驶时,背风侧车身所受负压更大、范围更广,因此,气动力和气动力矩更高。

以图7的气动载荷为例,在CarSim中建立超车阶段的侧风稳定性分析模型,侧风第2s作用,时间为3s。超车过程“风-车-桥”之间的气动干扰对轿车的行驶稳定性产生明显影响,以侧偏事故为主,表现为轿车在气动载荷作用下逐渐偏离预定的行驶轨

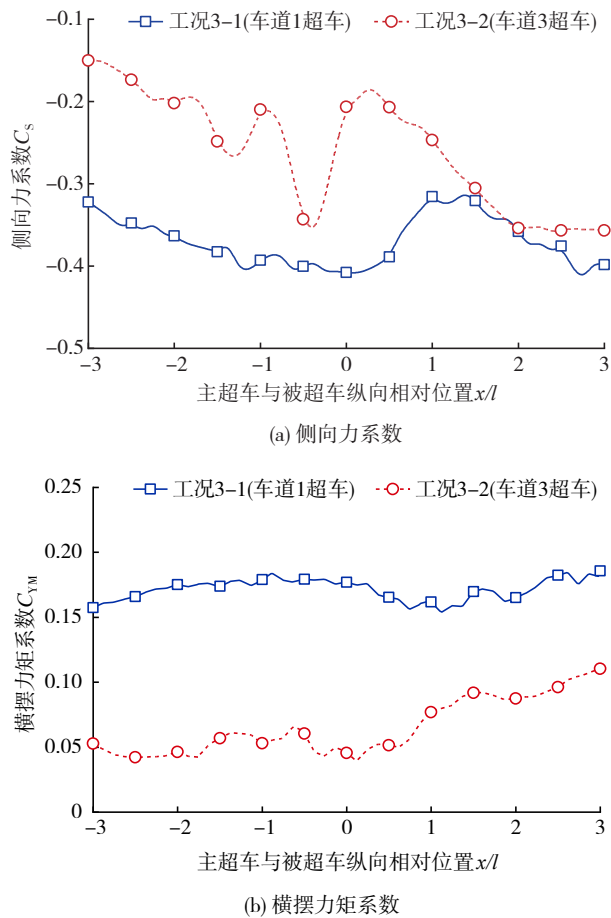


图7 轿车超车过程主要气动系数变化

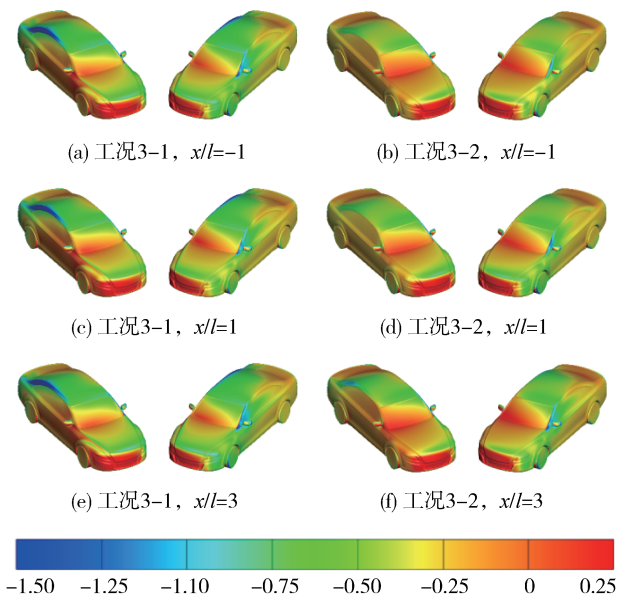


图8 轿车超车过程的车身压力系数

迹。图9(a)所示为未受控制状态下轿车在超车过程的侧向和横向运动响应,侧风作用后的第1 s,轿车

的侧向位移和横摆角分别为0.52 m、2.58°,侧风作用后的第2 s,轿车的侧向位移和横摆角分别为2.53 m、5.69°,侧风作用后的第3 s,轿车的侧向位移和横摆角分别为6.05 m、8.63°,之后,轿车侧向位移逐渐增大,直至冲出桥面,如图9所示。

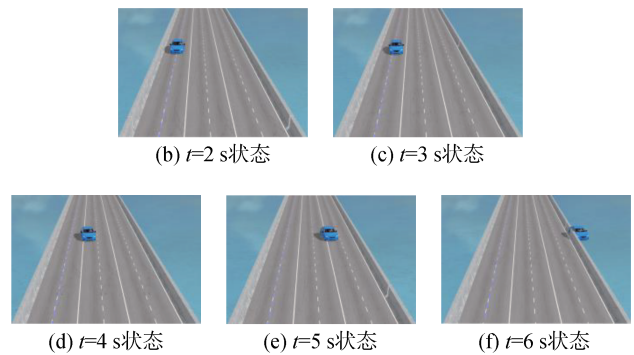
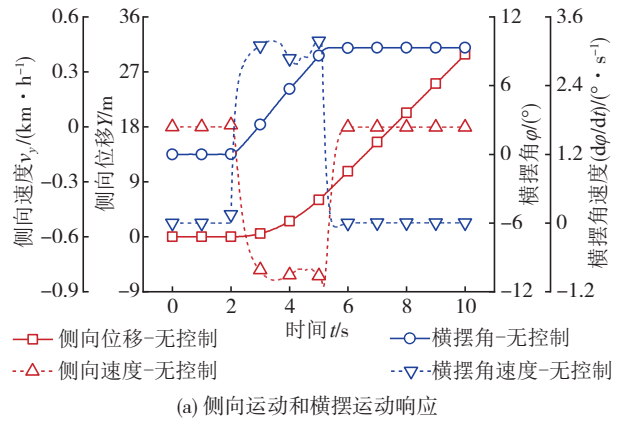


图9 无控制时轿车超车过程的动力学响应

### 3 控制系统设计

#### 3.1 运动控制方案

基于CarSim和Simulink搭建桥上轿车超车的联合仿真模型,控制器整体流程如图10所示。首先,基于五次多项式规划超车轨迹;其次,通过CarSim获取车辆状态信息,计算轮胎动力学特性和横向位移误差,估计当前车辆侧偏安全风险等级,将当前车速、侧偏安全风险等级、横向位移误差作为输入,经由模糊自适应时域调节器,输出时域增量;随后,将上述变量输入到轨迹跟踪控制器中,设计合理的代价函数及约束条件,对控制量及控制增量进行约束,并在控制器当中引入松弛因子,用于提升轨迹跟踪控制器的鲁棒性及跟踪精度;最后,通过二次规划求解,得出控制量。

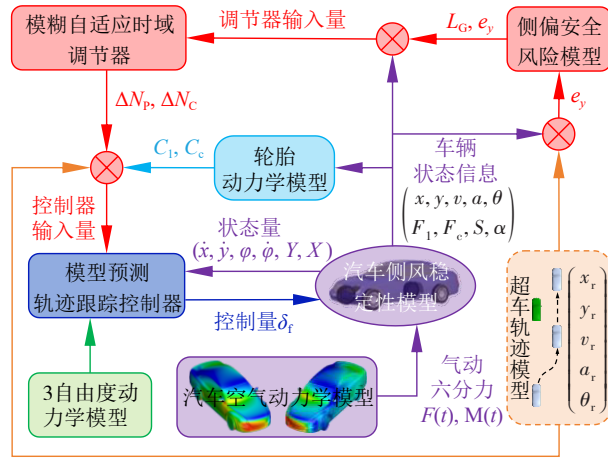


图10 运动控制方案

### 3.2 运动规划模型

根据图2建立桥上超车运动规划模型,超车路径使用五次多项式插值算法对轨迹进行拟合,假设车辆纵向运动和横向运动相对独立,与变道超车模型的坐标系相同,使用自然坐标系,变道期间任意时刻 $t$ 的纵横向位置 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 可以表示成五次多项式方程,如式(9)所示。

$$\begin{cases} X(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \\ Y(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5 \end{cases} \quad (9)$$

将给定的纵横向始末状态量合并,并转成矩阵形式如下所示:

$$\begin{cases} X = T \times M \\ Y = T \times N \end{cases} \quad (10)$$

式中各参数如式(11)和式(12)所示。根据图11轿车变道到车道1、加速以及超车过程的位移、速度、时间等约束条件,联立上式可得系数 $a_0 \sim a_5$ 和 $b_0 \sim b_5$ ,由此可确定变道轨迹方程,同理可得车道3轨迹。

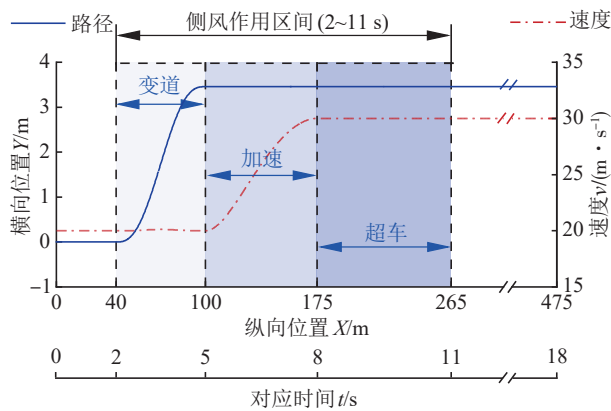


图11 运动规划轨迹

$$\begin{cases} M = [a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0]^T \\ N = [b_5 & b_4 & b_3 & b_2 & b_1 & b_0]^T \end{cases} \quad (11)$$

$$T = \begin{bmatrix} t_0^5 & t_0^4 & t_0^3 & t_0^2 & t_0 & 1 \\ 5t_0^4 & 4t_0^3 & 3t_0^2 & 2t_0 & 1 & 0 \\ 20t_0^3 & 12t_0^2 & 6t_0 & 1 & 0 & 0 \\ t_1^5 & t_1^4 & t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 1 \\ 5t_1^4 & 4t_1^3 & 3t_1^2 & 5t_1 & 1 & 0 \\ 20t_1^3 & 12t_1^2 & 6t_1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

### 3.3 轨迹跟踪控制器设计

根据3自由度动力学微分方程建立状态空间方程,其中,状态变量为 $\xi$ ,控制变量为 $u$ ,如式(13)所示。

$$\begin{cases} \dot{\xi} = f(\xi, u) \\ \xi = [y, \dot{x}, \varphi, \dot{\varphi}, Y, X]^T \\ u = \delta_r \end{cases} \quad (13)$$

参考点采用 $(\xi_r, u_r)$ 表示,在任意参考点处对式(13)进行泰勒展开并忽略高阶项得到式(14),令误差量满足关系式(15),联立式(13)~式(15)可得模型预测控制系统表达式,如式(16)所示。

$$\dot{\xi} = f(\xi_r, u_r) + \frac{\partial f}{\partial \xi} (\xi - \xi_r) + \frac{\partial f}{\partial u} (u - u_r) \quad (14)$$

$$\tilde{\xi} = \xi - \xi_r; \quad \dot{\tilde{\xi}} = \dot{\xi} - \dot{\xi}_r; \quad \tilde{u} = u - u_r \quad (15)$$

$$\dot{\tilde{\xi}} = \frac{\partial f}{\partial \xi} \tilde{\xi} + \frac{\partial f}{\partial u} \tilde{u} = A_1 \tilde{\xi} + B_1 \tilde{u} \quad (16)$$

式中 $A_1$ 和 $B_1$ 的表达式为

$$A_1 = [A_{11} \quad A_{12} \quad A_{13} \quad A_{14} \quad 0 \quad 0]$$

$$B_1 = [B_{11} \quad B_{12} \quad 0 \quad B_{14} \quad 0 \quad 0]^T$$

$$B_{11} = \frac{2(C_{cf} + C_{lf}S_f)}{m}; B_{12} = \frac{2C_{cf}}{m} \left( \frac{\dot{\varphi}l_f + v_y}{v_x} - 2\delta_r \right)$$

$$B_{14} = \frac{2l_f(C_{cf} + C_{lf}S_f)}{I_z}; A_{13} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ v_x \cos \varphi - v_y \sin \varphi \\ -v_x \sin \varphi - v_y \cos \varphi \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} \frac{2(C_{cf} + C_{cr})}{mv_x} \\ \dot{\varphi} + \frac{2C_{cf}\delta_r}{mv_x} \\ 0 \\ \frac{2(C_{cr}l_r - C_{cf}l_f)}{I_z v_x} \\ \cos \varphi \\ -\sin \varphi \end{bmatrix}; A_{14} = \begin{bmatrix} \frac{-2(C_{cf}l_f + C_{cr}l_r)}{mv_x} - v_x \\ v_y + \frac{2C_{cf}l_f\delta_r}{mv_x} \\ 1 \\ \frac{-2(C_{cf}l_f^2 + C_{cr}l_r^2)}{I_z v_x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} \frac{2[C_{cf}(v_y + \dot{\phi}l_f) + C_{cr}(v_y - \dot{\phi}l_r)]}{mv_x^2} - \dot{\phi} \\ \frac{2C_{cf}\delta_f(v_y + \dot{\phi}l_f)}{mv_x^2} \\ 0 \\ \frac{2[C_{cr}l_r(\dot{\phi}l_r - v_y) + C_{cf}l_f(\dot{\phi}l_f + v_y)]}{I_z v_x^2} \\ \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{bmatrix}$$

通过1阶差商法离散化可得式(17),引入式(18)式控制量,并构建如式(19)所示新的状态量,新的状态方程如式(20)所示。

$$\dot{\tilde{\xi}}(k+1) = A\tilde{\xi}(k) + B\tilde{u}(k) \quad (17)$$

$$\tilde{u}(k+1) = \tilde{u}(k) + \Delta\tilde{u}(k) \quad (18)$$

$$s(k) = [\tilde{\xi}(k) \quad \tilde{u}(k-1)]^T \quad (19)$$

$$\begin{cases} s(k+1) = \tilde{A}s(k) + \tilde{B}\Delta\tilde{u}(k) \\ \eta(k) = \tilde{C}s(k) \end{cases} \quad (20)$$

式中: $A=I+TA_1, B=TB_1, I$ 为单位矩阵; $T$ 为采样时间; $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$ 由式(21)确定。

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix}; \tilde{B} = [B \quad I]^T; \tilde{C} = [I \quad 0] \quad (21)$$

令控制系统的输出序列为 $\omega = \psi s(k) + \Theta \Delta u$ ,各参数表达式如下所示。

$$\omega = \begin{bmatrix} \eta(k+1) \\ \eta(k+2) \\ \vdots \\ \eta(k+N_c) \\ \vdots \\ \eta(k+N_p) \end{bmatrix}; \psi = \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{A} \\ \tilde{C}\tilde{A}^2 \\ \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_c} \\ \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_p} \end{bmatrix}$$

$$\Delta u = \begin{bmatrix} \Delta\tilde{u}(k) \\ \Delta\tilde{u}(k+1) \\ \vdots \\ \Delta\tilde{u}(k+N_c-2) \\ \Delta\tilde{u}(k+N_c-1) \end{bmatrix}$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{B} & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{C}\tilde{A}\tilde{B} & \tilde{C}\tilde{B} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_c}\tilde{B} & \tilde{C}\tilde{A}^{N_c-1}\tilde{B} & \cdots & \tilde{C}\tilde{A}\tilde{B} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_p-1}\tilde{B} & \tilde{C}\tilde{A}^{N_p-2}\tilde{B} & \cdots & \tilde{C}\tilde{A}^{N_p-N_c}\tilde{B} \end{bmatrix}$$

构建目标函数 $J$ 如式(22)所示,对相应的控制量、控制增量等变量进行约束,即可构建完整的规划

模型。

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(k+i) - \eta_{ref}(k+i)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta u(k+i)\|_R^2 + \rho \varepsilon^2 \quad (22)$$

式中: $N_p$ 为预测时域; $N_c$ 为控制时域; $\rho$ 为权重系数; $\varepsilon$ 为松弛因子; $\eta$ 为误差量; $\eta_{ref}$ 为误差参考量,取值为0; $\Delta u$ 为控制增量。

令 $E = \psi s(k)$ ,则式(22)可化为如式(23)所示的矩阵形式,由式(18)可得约束条件,如式(24)所示。

$$J = [\Delta u^T \quad \varepsilon] \begin{bmatrix} \Theta^T Q \Theta + R & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \varepsilon \end{bmatrix} + [2E^T Q \Theta \quad 0] \begin{bmatrix} \Delta u \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\tilde{u} = u_i + A_I \Delta u \quad (24)$$

其中:

$$\tilde{u} = \begin{bmatrix} \tilde{u}(k) \\ \tilde{u}(k+1) \\ \vdots \\ \tilde{u}(k+N_c-1) \end{bmatrix}; u_i = \begin{bmatrix} \tilde{u}(k-1) \\ \tilde{u}(k-1) \\ \vdots \\ \tilde{u}(k-1) \end{bmatrix}$$

$$A_I = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ I & I & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I & I & I & \cdots & I \end{bmatrix}$$

控制量约束和控制量增量约束满足式(25),根据式(24)得到该约束条件的矩阵形式,如式(26)所示。输出量约束、硬约束以及软约束分别如式(27)、式(28)、式(29)所示。

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_{\min} \\ \Delta\tilde{u}_{\min} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \Delta\tilde{u} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \tilde{u}_{\max} \\ \Delta\tilde{u}_{\max} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} A_I & 0 \\ -A_I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \varepsilon \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \tilde{u}_{\max} - u_i \\ -\tilde{u}_{\min} + u_i \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\eta = [\Delta\varphi \quad \Delta Y]^T \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} \Theta & 0 \\ -\Theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \varepsilon \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \omega_{\max} - \psi s(k) \\ -\omega_{\min} + \psi s(k) \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} \Theta & -1 \\ -\Theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \varepsilon \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \omega_{\max} - \psi s(k) \\ -\omega_{\min} + \psi s(k) \end{bmatrix} \quad (29)$$

转化为如下的标准二次规划模型,通过求解控制时域内每个周期的规划模型,计算出每个周期的控制增量,得到增量序列,将序列中第1项作为实际增量输出,用于下一时刻控制,如此循环往复,实现滚动优化。

$$\min_{\Delta u} \begin{bmatrix} \Delta u^T & \varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta^T Q \Theta + R & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2E^T Q \Theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \varepsilon \end{bmatrix}$$

$$\text{s. t.} \begin{bmatrix} A_I & 0 \\ -A_I & 0 \\ \Theta & 0 \\ -\Theta & 0 \\ \Theta & -1 \\ -\Theta & 1 \\ 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \varepsilon \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \tilde{u}_{\max} - u_i \\ -\tilde{u}_{\min} + u_i \\ \omega_{\max} - \psi s(k) \\ -\omega_{\min} + \psi s(k) \\ \omega_{\max} - \psi s(k) \\ -\omega_{\min} + \psi s(k) \\ \Delta \tilde{u}_{\max} \\ \Delta \tilde{u}_{\min} \end{bmatrix}$$

### 4 考虑侧风稳定性的自适应调节系统

#### 4.1 侧偏安全风险模型

侧偏危险程度用侧偏风险函数 $f_c$ 确定,如式(30)所示。式中: $E_z$ 为汽车质心的侧向位移; $E_{z_{\max}}$ 为汽车质心允许的最大侧向位移,与道路宽度 $W_{\text{road}}$ 和车身宽度 $W_{\text{car}}$ 有关,道路宽度越窄、车身宽度越宽,汽车允许的最大侧向位移越小,如图12所示。

$$\begin{cases} f_c = \sqrt{1/(1 - E_z/E_{z_{\max}}) - 1} \\ E_z/E_{z_{\max}} = \frac{E_z}{0.5 \times (W_{\text{road}} - W_{\text{car}})} \end{cases} \quad (30)$$

汽车行驶时的侧向位移越大,发生侧偏事故的概率越大,当侧向位移较小时,风险函数 $f_c$ 与 $E_z$ 基本呈线性相关,而当侧向位移较大时,风险函数 $f_c$ 随着 $E_z$ 增加呈指数增加。考虑实际情况,文中将侧偏安全风险划分为8个等级,如表4所示。

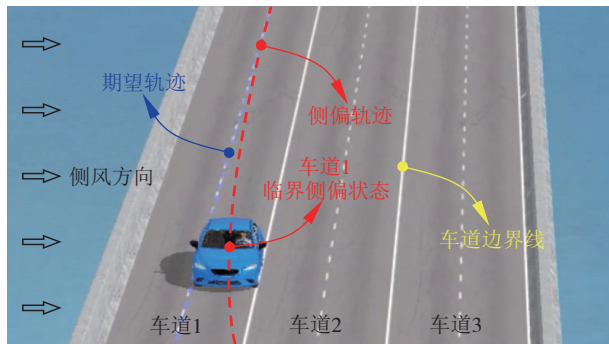


图12 侧偏事故示意图

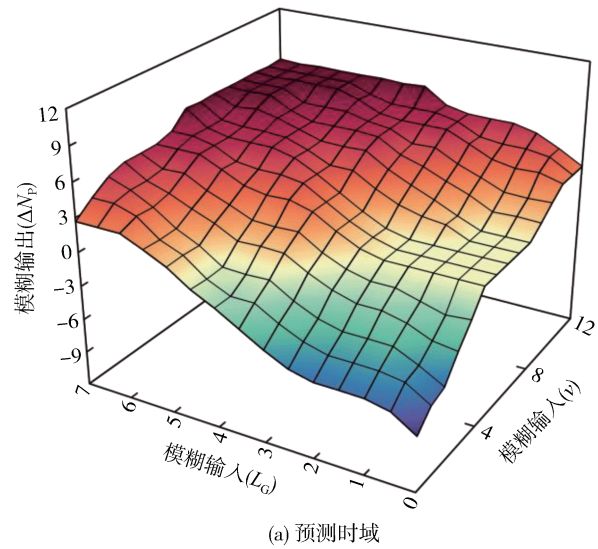
#### 4.2 时域自适应模型

MPC控制器中的时域参数包含预测时域 $N_p$ 和控制时域 $N_c$ , $N_p$ 和 $N_c$ 越大,控制精度越高,但系统稳定性和实时性降低,灵敏度增加,且系统容易发生振荡,甚至无法收敛; $N_p$ 和 $N_c$ 越小,控制器灵敏度降

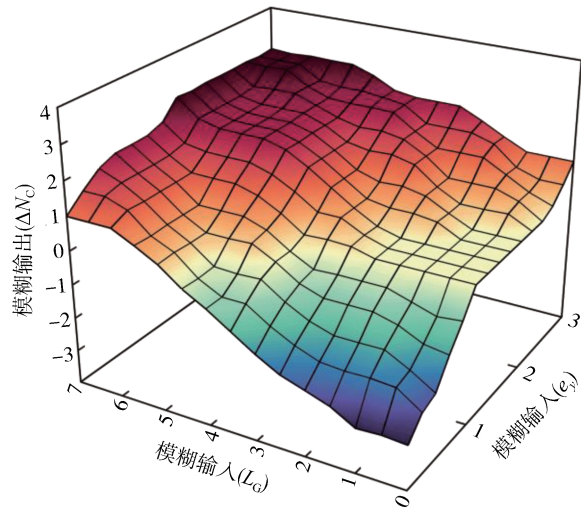
表4 侧偏安全风险等级划分

侧偏安全风险等级	风险阈值
$L_G=0$	$E_z/E_{z_{\max}} < 0.02$
$L_G=1$	$0.02 \leq E_z/E_{z_{\max}} < 0.1$
$L_G=2$	$0.1 \leq E_z/E_{z_{\max}} < 0.2$
$L_G=3$	$0.2 \leq E_z/E_{z_{\max}} < 0.3$
$L_G=4$	$0.3 \leq E_z/E_{z_{\max}} < 0.4$
$L_G=5$	$0.4 \leq E_z/E_{z_{\max}} < 0.5$
$L_G=6$	$0.5 \leq E_z/E_{z_{\max}} < 0.6$
$L_G=7$	$E_z/E_{z_{\max}} \geq 0.6$

低,实时性更好,但控制精度有所下降。当车速发生变化时,固定 $N_p$ 的取值将不再适用于所有行车场景,此时将会导致轨迹跟踪精度及鲁棒性降低。因此,传统的固定时域控制器无法满足智能汽车行车要求,文中采用如图13所示的模糊设计规则,其中,各变量的论域如表5所示。



(a) 预测时域



(b) 控制时域

图13 模糊系统响应曲面

以侧偏安全风险等级 $L_c$ 与当前横向误差 $e_y$ 为输入,控制时域增量 $\Delta N_c$ 为输出;以侧偏安全风险等级 $L_c$ 与当前车速 $v$ 为输入,预测时域增量 $\Delta N_p$ 为输出,设计模糊控制算法,实现时域自适应调整,保证车辆稳定性和提高跟踪精度。选用Mamdani型模糊推理方法、三角分布隶属度函数设计模糊系统。当侧偏安全风险等级过高、车速较大时,车辆即将失稳或轨迹跟踪误差过大,须适当增加 $N_p$ 和 $N_c$ 。当危险等级较低、车速较小时,可适当降低 $N_p$ 和 $N_c$ ,提升计算效率,减轻计算负担。

表5 论域划分

变量	$e_y$	$L_c$	$v$	$\Delta N_p$	$\Delta N_c$
基本论域	[0, 1]	[0, 7]	[0, 120]	[-8, 8]	[-3, 3]
模糊论域	[0, 3]	[0, 7]	[0, 12]	[-8, 8]	[-3, 3]

根据模糊推理计算得到模糊输出量,由式(31)所示的质心法进行解模糊运算,解模糊之后将模糊控制器的输出取整,按照式(32)赋值给控制器,实现时域的自适应调整。

$$df_g(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \eta(x_i)}{\sum_{i=1}^n \eta(x_i)} \quad (31)$$

$$\begin{cases} N_p = N_{p0} + \text{Round}(\Delta N_p) \\ N_c = N_{c0} + \text{Round}(\Delta N_c) \end{cases} \quad (32)$$

式中: $\eta(x)$ 为输出量的隶属度函数; $df_g(x)$ 表示输出量的清晰值; $N_{c0}$ 为初始控制时域; $N_{p0}$ 为初始预测时域;Round为取整函数。

## 5 结果分析与验证

通过CarSim和Simulink搭建仿真场景进行联合仿真,验证AHMPC控制器的有效性及实用性,仿真场景共分为第1车道超车和第3车道超车,控制器预测时域 $N_{p0}$ 取定20,初始控制时域 $N_{c0}$ 取定4,采样时间0.02 s。为了验证文中所提控制器的优势,与固定时域及文献[6]中设计的变权重模型预测控制器(T-S FMPC)进行对比,T-S FMPC控制器以横向误差和横摆角误差为输入,设计模糊调节器对权重系数矩阵进行调整,对照组时域取值如表6所示。

### 5.1 车道1超车工况

图14为主超车轿车由车道2变道至车道1完成超车行驶的控制效果曲线。AHMPC控制器的轨迹跟踪精度要远远高于其它3类MPC控制器,对比

表6 对照组时域参数取值

控制器类型	$N_c$	$N_p$
I型	1	20
II型	7	30
T-S FMPC	3	20

如下。

在变道阶段,从第2 s开始出现侧风干扰,此时搭载AHMPC控制器的轿车对突然出现的侧风干扰做出了良好的表现。首先,通过上一采样时刻的轨迹跟踪误差计算侧偏安全风险等级,结合跟踪误差及当前车速自适应调整时域,更新时域增量输出,对侧风环境干扰造成的偏移,通过增加控制量的方式进行补偿,提高轿车的跟踪精度,该阶段的最大横向误差为0.098 m,最大航向误差为0.644°。变道过程中,所受气动载荷逐步增加,其它3类MPC控制器由于灵敏度高,抗干扰能力弱,在阶跃风环境中产生较大的跟踪误差,其中I型控制器最大横向误差达到了0.251 m,最大航向误差为0.815°,而AHMPC横向误差大幅降低,仅为I型的39%。

在加速及并行阶段,轿车右侧车身完全暴露在侧风环境下,虽然所受风载荷不会发生突变,但由于载荷数值较大,因此,产生了较大的跟踪误差,侧偏安全风险等级较高。但系统及时调整时域增量,从而降低控制器灵敏度,提高跟踪精度,车辆逐渐趋于规划好的轨迹。加速阶段的车速不断增加,预测时域增量相应增长,由于跟踪误差的降低,从而降低控制时域增量,减轻计算负担。

超车完成之后,搭载AHMPC的轿车能够快速返回既定路线,降低跟踪误差,且由于该阶段的横向误差较小,危险等级降低,因此,控制时域增量输出为-3,预测时域增量输出降低为3,减轻了计算负荷,提高了计算效率。

### 5.2 车道3超车工况

图15为主超车轿车由车道2变道至车道3完成超车行驶的控制效果曲线,相比其它3类MPC控制器,AHMPC控制器的轨迹跟踪精度具有明显的提升,对比如下。

在变道阶段,从第2 s开始出现侧风干扰,与此同时,其他3类控制器对外界扰动敏感,在风干扰刚出现时就发生了较大的偏移,AHMPC控制器及时对干扰造成的偏移进行补偿,降低横向误差,提高跟踪精度。虽然车道1和车道3超车的气动载荷相差较大,但AHMPC控制器均表现出了较好的控制效果,

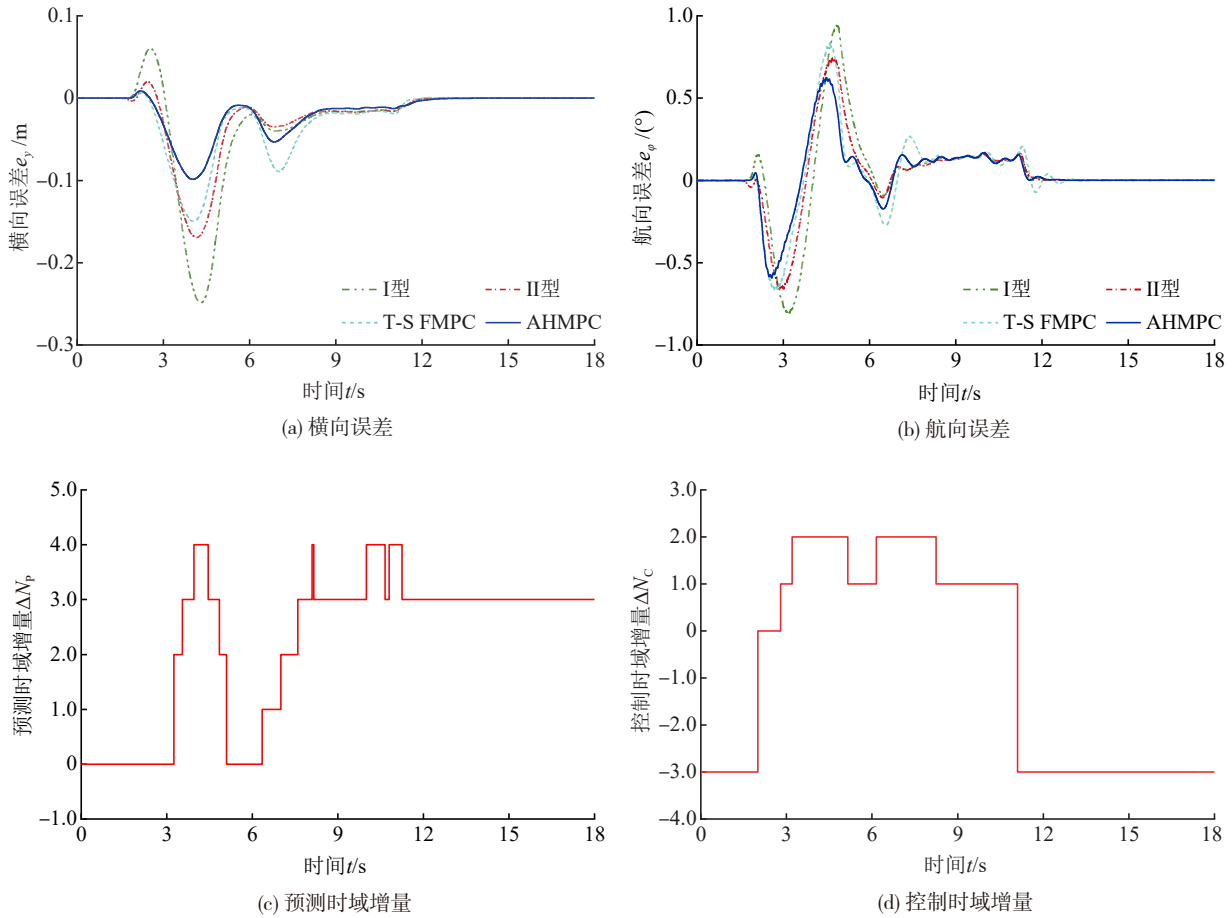


图14 轿车车道1超车控制效果

说明改进控制器的鲁棒性较佳,可以应对不同极端风环境下的气动干扰。

在加速及并行阶段,轿车在逐渐接近和远离被超车时,流场变化剧烈,对控制器扰动较大,从而产生较大的跟踪误差,侧偏安全风险增加,为补偿外界干扰,AHMPC控制器不断调整时域增量,提升稳定性,如图15(c)和图15(d)所示。

完成超车之后,阶跃风干扰消失,车辆须尽快将自身姿态调整至目标姿态,快速回正方向,降低横向误差,此时,由于控制器的时域参数较大,出现了振荡现象,AHMPC控制器及时调整时域增量,减轻振荡,系统快速稳定,回到目标姿态,同时降低计算负担,提升计算效率。

### 5.3 算法实时性及控制效果对比

文中的仿真试验是在搭载i7-13700K处理器和32GB RAM的平台上运行。由图16可知,不同仿真场景下AHMPC控制器的平均求解时间均小于2ms,符合实时性要求。在车道1上超车时,相比于耗时

最低的I型MPC控制器仅增加了0.53ms;而在车道3上超车时,相比于耗时最低的I型MPC控制器仅增加了0.43ms。相较而言,搭载II型控制器的轿车由于自身的控制时域及预测时域较大,所带来的计算负担为所有试验组中最重的,该类型控制器的实时性在本次试验中表现最差。而T-S FMPC中的调节器只对权重系数矩阵进行调整,因此实时性良好,但上述3种控制器的轨迹跟踪精度较差。

如图17所示,搭载传统I型、II型及T-S FMPC控制器的轿车在车道1和车道3上的行驶过程中,侧偏安全风险波动明显,轿车在行驶过程中的稳定性较差,而搭载AHMPC控制器的轿车,较大程度降低了侧偏安全风险,汽车行驶稳定性提升效果明显,侧偏安全风险等级始终处于较低等级。综上,本文提出的AHMPC控制器在满足实时性要求的基础上,具备良好的跟踪性能及鲁棒性,能提高车辆在极端风环境下的行驶稳定性,保证车辆风致行车安全。

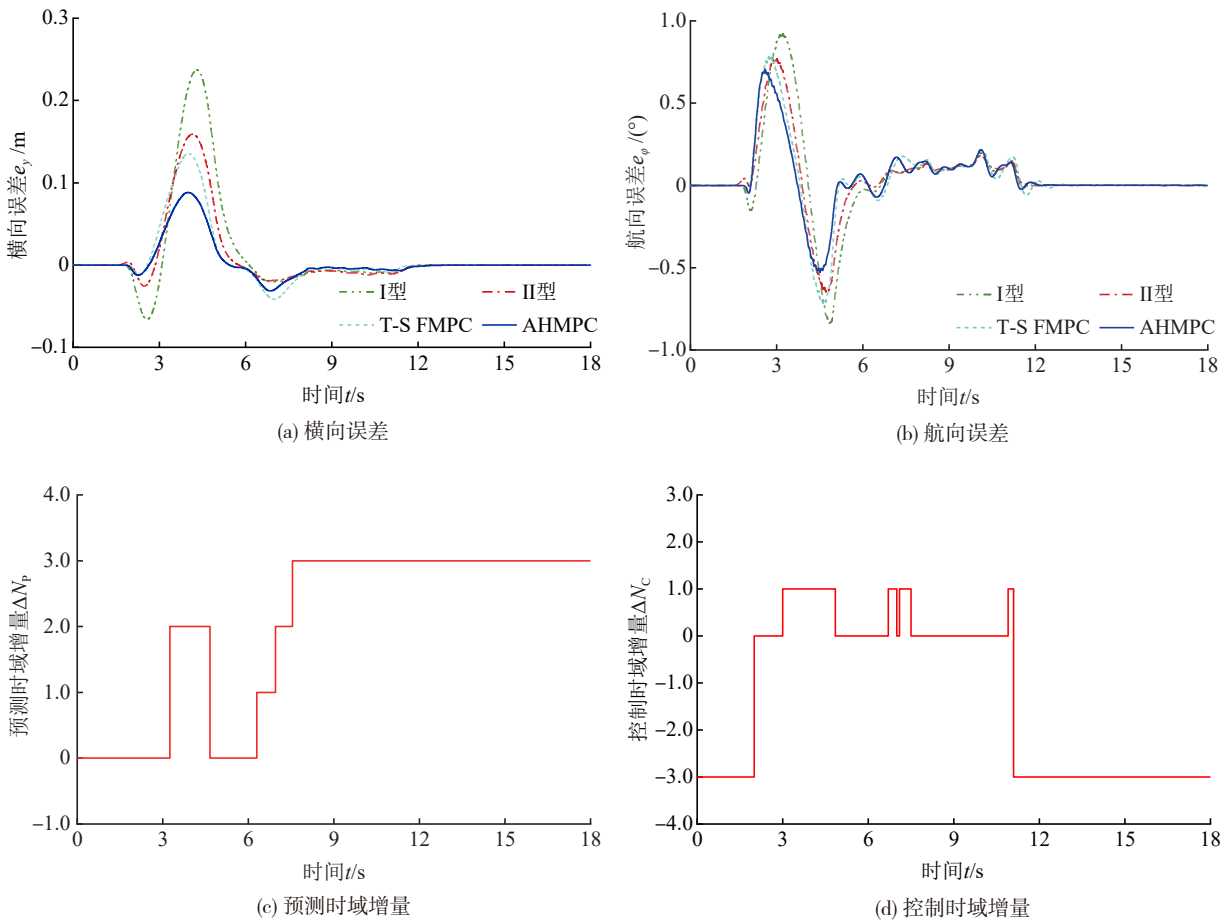


图15 轿车车道3超车控制效果

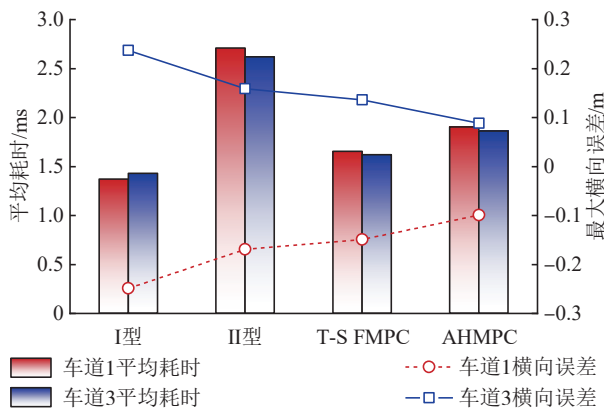


图16 不同控制算法对比

### 6 结论

(1)轿车在迎风侧第1车道超车时,气动侧力和气动横摆力矩的峰值更高;而在背风侧第3车道超

车时,其峰值较低,但变化幅度较大。与第3车道超车相比,轿车在第1车道行驶时的气动侧力和气动横摆力矩峰值分别增长了15.2%和68.8%。

(2)考虑侧风稳定性的AHMPC控制器能够更好地补偿气动干扰,车道1上行驶过程中的横向误差控制在0.098 m以内,航向误差控制在0.645°以内;车道3上行驶过程中的横向误差控制在0.088 m以内,航向误差控制在0.729°以内。与传统MPC及T-S FMPC相比,侧风稳定性提升明显。

(3)相较于传统MPC及T-S FMPC控制器,考虑侧风稳定性的AHMPC控制器的求解平均耗时并不是最优,但能满足实时性的要求。轿车在车道1超车时,相对于平均耗时最低的I型控制器,平均耗时仅增加了0.53 ms,但横向误差减小了60.9%,航向误差减小了20.9%;轿车在车道3超车时,相对于I型控制器,平均耗时仅增加了0.43 ms,但横向误差减小了62.8%,航向误差减小了21.8%。

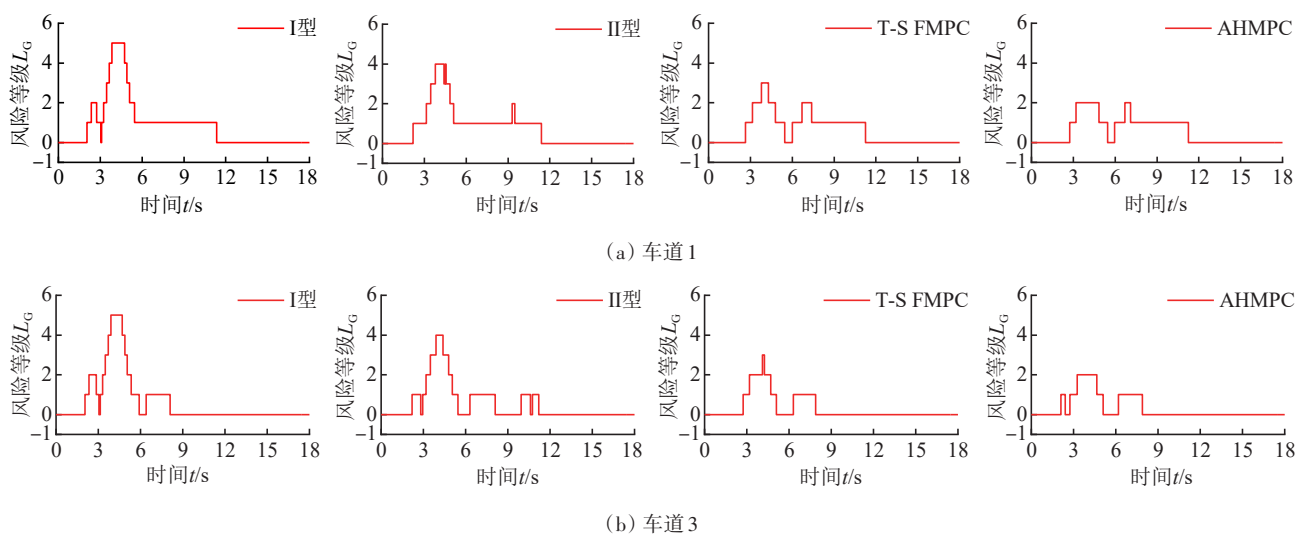


图17 侧偏安全风险等级变化

## 参考文献

- [1] GUO H Y, CAO D P, CHEN H, et al. Model predictive path following control for autonomous cars considering a measurable disturbance: implementation, testing, and verification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 118: 41–60.
- [2] KIM M, LEE D, AHN J, et al. Model predictive control method for autonomous vehicles using time-varying and non-uniformly spaced horizon[J]. IEEE Access, 2021, 9: 86475–86487.
- [3] 周维, 过学迅, 裴晓飞, 等. 基于RRT与MPC的智能车辆路径规划与跟踪控制研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(9): 1151–1158.  
ZHOU W, GUO X X, PEI X F, et al. Study on path planning and tracking control for intelligent vehicle based on RRT and MPC [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(9): 1151–1158.
- [4] 关龙新, 顾祖飞, 张超, 等. 考虑系统复杂扰动的智能车模型预测路径跟踪控制[J]. 汽车工程, 2022, 44(12): 1844–1855.  
GUAN L X, GU Z F, ZHANG C, et al. Model predictive path following control of intelligent vehicles considering system complex disturbances[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(12): 1844–1855.
- [5] CHOI Y, LEE W, KIM J, et al. A variable-sampling time model predictive control algorithm for improving path-tracking performance of a vehicle[J]. Sensors, 2021, 21(20): 6845.
- [6] 李韶华, 杨泽坤, 王雪玮. 基于T-S模糊变权重MPC的智能车轨迹跟踪控制[J]. 机械工程学报, 2023, 59(4): 199–212.  
LI S H, YANG Z K, WANG X W. Trajectory tracking control of an intelligent vehicles based on T-S fuzzy variable weight MPC [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(4): 199–212.
- [7] 杜荣华, 胡鸿飞, 高凯, 等. 基于变预测时域MPC的自动驾驶汽车轨迹跟踪控制研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 275–288.  
DU R H, HU H F, GAO K, et al. Research on trajectory tracking control of autonomous vehicles based on MPC with variable predictive horizon [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(24): 275–288.
- [8] ZHANG B, ZONG C F, CHEN G Y, et al. An adaptive-prediction-horizon model prediction control for path tracking in a four-wheel independent control electric vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(12): 3246–3262.
- [9] XIAO Z X, HU M H, FU C Y, et al. Model predictive trajectory tracking control of unmanned vehicles based on radial basis function neural network optimisation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2023, 237(2–3): 347–361.
- [10] ELBANHAWI M, SIMIC M, JAZAR R. Receding horizon lateral vehicle control for pure pursuit path tracking[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(3): 619–642.
- [11] TANG X Z, SHI L F, WANG B, et al. Weight adaptive path tracking control for autonomous vehicles based on PSO-BP neural network[J]. Sensors, 2023, 23(1): 412.
- [12] 梁宝钰, 汪怡平, 刘珣, 等. 基于滑模理论的高速车辆侧风稳定性控制研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(1): 123–130.  
LIANG B Y, WANG Y P, LIU X, et al. Study on crosswind stability control of high-speed vehicle based on sliding mode theory [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1): 123–130.
- [13] JI J, KHAJEPOUR A, MELEK W W, et al. Path planning and tracking for vehicle collision avoidance based on model predictive control with multi-constraints [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 952–964.
- [14] ZHAO F Z, WU W Y, WU Y, et al. Model predictive control of soft constraints for autonomous vehicle major lane-changing behavior with time variable model [J]. IEEE Access, 2021, 9: 89514–89525.

(下转第1852页)

- Germany, 2006: 885–890.
- [15] 余卓平, 曾德全, 熊璐, 等. 基于激光雷达的无人车路面附着系数估计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 124–127.
- YU Z P, ZENG D Q, XIONG L, et al. Estimation of road friction coefficient for autonomous vehicles based on LiDAR[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(7): 124–127.
- [16] HAN Z, LIU W, GAO Z, et al. A method for real-time road surface identification of intelligent tire systems based on random convolutional kernel neural network[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024: 1–15.
- [17] GUO H, ZHAO X, LIU J, et al. A fusion estimation of the peak tire-road friction coefficient based on road images and dynamic information[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 189: 110029.
- [18] 庾文坤. 多源信息融合的路面附着系数估计算法研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- TUO W K. Research on road friction coefficient estimation algorithm based on multi-source information fusion[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.
- [19] 张雷, 关可人, 丁晓林, 等. 基于图像识别与动力学融合的路面附着系数估计方法[J]. 汽车工程, 2023, 45(7): 1222–1234, 1262.
- ZHANG L, GUAN K R, DING X L, et al. Road friction coefficient estimation method based on image recognition and dynamics fusion[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(7): 1222–1234, 1262.
- [20] 员荣祥. 基于图像信息和车辆状态的路面附着系数估计研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- YUAN R X. Research on road friction coefficient estimation based on image information and vehicle status[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [21] 刘惠. 视觉与动力学信息融合的智能车辆路面附着系数估计[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- LIU H. Estimation of road friction coefficient for intelligent vehicles based on the fusion of vision and dynamics information[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [22] KASHANI A, OLSEN M, PARRISH C, et al. A review of LiDAR radiometric processing: from Ad Hoc intensity correction to rigorous radiometric calibration[J]. Sensors, 2015, 15(11): 28099–28128.
- [23] 侯欣辰, 冷搏, 曾德全, 等. 基于激光反射强度特征的智能汽车路面估计方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(z1): 141–147.
- HOU X C, LENG B, ZENG D Q, et al. Road surface estimation method for intelligent vehicles based on laser reflection intensity characteristics[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(z1): 141–147.
- [24] LIU B, ZHAO D, ZHANG H. Road classification using 3D LiDAR sensor on vehicle[J]. Measurement Science & Technology, 2023, 34(6): 65201.
- [25] HEINZLER R, SCHINDLER P, SEEKIRCHER J, et al. Weather influence and classification with automotive lidar sensors[C]. 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Paris, France, 2019: 1527–1534.
- [26] SEBASTIAN G, VATTEM T, LUKIC L, et al. Range weather net for LiDAR-only weather and road condition classification[C]. 2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Nagoya, Japan, 2021.
- [27] 韩栋斌, 徐友春, 李华, 等. 无人车三维激光雷达反射强度校准[J]. 军事交通学院学报, 2017, 19(10): 85–90.
- HAN D B, XU Y C, LI H, et al. Calibration of 3D LiDAR reflection intensity for unmanned vehicles[J]. Journal of Military Transportation University, 2017, 19(10): 85–90.
- [28] 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017: 385.
- YU F, LIN Y. Vehicle system dynamics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017: 385.

(上接第1841页)

- [15] HU C F, ZHAO L X. Overtaking control strategy based on model predictive control with varying horizon for unmanned ground vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2021, 235(1): 78–92.
- [16] WANG H R, WANG Q D, CHEN W W, et al. Path tracking based on model predictive control with variable predictive horizon[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(12): 2676–2688.