

考虑主动尾翼气动性能的车辆稳定性优化控制

王德军¹, 韩超楠¹, 章寿清¹, 李 英², 赵 婧²

(1. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130022; 2. 中国第一汽车股份有限公司, 长春 130022)

摘 要:为解决高速行驶或低附着路面下车辆轮胎与地面之间附着力趋于饱和而行车驱动能力不足的问题,提出了一种考虑主动尾翼作用的驱动可行域建立以及带主动尾翼的车辆稳定性控制方法。首先,从主动尾翼的气动性能分析出发,解析主动尾翼带来的整车气动升力与气动阻力,并将其分解至车辆动力学模型中;其次,在融合主动尾翼的车辆模型基础上,以轮胎摩擦圆为约束,推导考虑主动尾翼的驱动可行域建立;最后,以所得驱动可行域作为输入约束,基于非线性模型预测控制方法,设计考虑主动尾翼作用的车辆稳定性控制器。借助 CarSim 和 Simulink 联合仿真平台,在不同工况下进行了物理仿真实验。结果表明,主动尾翼能够改善车辆轮胎垂直载荷的分布,扩大车辆行驶驱动可行域的范围,且能够在精确完成轨迹跟踪的同时,提升车辆的稳定性与安全性。

关键词:主动空气动力学;主动尾翼;驱动可行域;模型预测控制;车辆稳定性控制

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)09-2502-13

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250276

Vehicle stability optimization control considering active rear wing aerodynamic performance

WANG De-jun¹, HAN Chao-nan¹, ZHANG Shou-qing¹, LI Ying², ZHAO Jing²

(1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. China FAW Group Corporation, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the problem that the adhesive force between the vehicle tire and the ground tends to be saturated under high speed or low adhesion road surface, this paper puts forward a method to establish the driving feasible region considering the action of the active rear wing and control the stability of the vehicle by the active rear wing. Firstly, based on the analysis of the aerodynamic performance of the active rear wing, the aerodynamic lift and aerodynamic drag brought by the active rear wing are analyzed and decomposed into the vehicle model. Secondly, based on the vehicle model with active rear wing, the driving feasible region of active rear wing is established with the tire friction circle as the constraint. Finally, a layered controller was designed based on the active rear wing, and a joint simulation platform of CarSim and Simulink was built. physical simulation experiments were carried out under different working conditions. The results show that the active rear wing can improve the distribution of vertical loads on

收稿日期:2025-04-01.

基金项目:吉林省科技发展规划项目(20220301014GX).

作者简介:王德军(1970-),男,教授,博士.研究方向:车辆稳定性控制.E-mail: djwang@jlu.edu.cn

通信作者:李英(1978-),男,教授级高工,博士.研究方向:车辆稳定性控制.E-mail: liying11@faw.com.cn

vehicle tires, expand the feasible range of vehicle driving, and while accurately completing trajectory tracking, enhance the stability and safety of the vehicle.

Key words: active aerodynamics; active rear wing; driving feasible region; model predictive control; vehicle stability control

0 引言

随着智能驾驶技术的发展,车辆性能不断提高,越来越多的主动安全系统已经被提出并开发,如主动前/后轮转向^[1]、扭矩矢量控制^[2]、差动制动^[3]、直接偏航力矩控制^[4]、主动外倾角控制^[5]、主动侧倾力矩控制^[6]、主动悬架控制^[7]等。尽管如此,在高速行驶或低附着路面的条件下,车辆轮胎与地面之间的附着力容易趋于饱和,限制了现有的主动安全系统的性能。为了避免车辆在极限工况下出现轮胎力饱和的现象,进一步提高车辆道路的安全性,主动空气动力学系统逐渐受到研究学者们的广泛关注。主动尾翼作为一种重要的主动空气动力学装置,在研发初期主要目标在于改善车辆的动态性能表现和行驶安全特性^[8]。

2014年,Diba等^[9]提出了一种非线性车辆模型,利用4个倒翼的主动气动控制系统产生气动力,辅助车辆的机械运动控制系统。仿真结果表明,在变线行驶过程中,采用尾翼控制系统可以减小侧向速度变化。邓召文等^[10]研发了一种基于线性二次调节器的控制策略,对断开式尾翼系统的翼片攻角实施主动调控。研究结果表明,该可调尾翼系统显著增强了高速行驶车辆的侧向动力学稳定性及主动安全性能。查云飞等^[11]在传统固定尾翼及可变攻角主动尾翼的基础上,提出了一种具备侧倾功能的主动倾斜尾翼空气动力学组件。该设计通过在弯道中直接生成附加侧向力,有效缓解车身侧倾现象,显著提升了车辆的操控稳定性与安全性能。Hammad等^[12]设计了一款基于线性二次调节器的主动分离式尾翼控制器,在不同的操作条件下,尾翼的姿态在攻角方面自适应地变化,证明了主动尾翼在提高车辆侧向稳定性方面的潜在能力。

综合来看,主动尾翼在提高车辆的侧向稳定性和安全方面已经得到显著进展,但主动尾翼对车辆驱动能力的影响以及如何将该驱动能力考虑

至车辆稳定性控制中,在目前的研究中尚未得到重视。基于此,本文对主动尾翼提升车辆稳定性控制方法做出以下贡献:① 建立融合主动尾翼的车辆三自由度模型,并在此模型的基础上,基于轮胎摩擦圆理论,推导车辆在行驶过程中所受到纵向合力、侧向合力与横摆合力矩的有效作用边界,即确定驱动可行域范围;② 解析主动尾翼作用设计车辆分层控制器,将考虑主动尾翼的驱动可行域作为上层控制器的控制约束,并设计上层模型预测控制器。最后,通过CarSim和Simulink联合仿真验证了本文所设计控制器的有效性。

1 系统建模与主动尾翼作用解析

1.1 轮胎模型

考虑到轮胎侧偏角与轮胎侧向力之间的关系,选用的轮胎模型为Dugoff轮胎模型^[13]:

$$\begin{cases} F_{xi} = C_{si} \frac{s_{xi}}{1 + s_{xi}} f(\lambda_i), & i = 1, 2, 3, 4 \\ F_{yi} = C_{ai} \frac{\tan(\alpha_i)}{1 + s_{xi}} f(\lambda_i), & i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (1)$$

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

式中: C_{si} 和 C_{ai} 分别为轮胎的纵向滑移刚度和侧偏刚度; α_i 为轮胎侧偏角; s_{xi} 为轮胎滑移率; λ_i 为轮胎所在的工作区域。

$$\lambda_i = \frac{\mu F_{zi}(1 + s_{xi})}{2\sqrt{(C_{si}s_{xi})^2 + (C_{ai}\tan\alpha_i)^2}}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

式中: $\lambda_i < 1$ 表示轮胎处于非线性区域; $\lambda_i \geq 1$ 表示轮胎处于线性区域; F_{zi} 为轮胎载荷。

1.2 参考模型

参考模型是车辆实际状态的对比模型,为后续车辆运动预测提供支持,参考模型的纵向速度、侧向速度和横摆角速度表达式为^[14]:

$$V_{xref} = V_0 + \int_0^t a_x(t) dt \quad (4)$$

$$V_{yref} = 0 \quad (5)$$

$$\omega_{\text{ref}} = \frac{V_{x\text{ref}}/L}{1 + KV_{x\text{ref}}^2} \delta \quad (6)$$

式中: V_0 为纵向速度初始值; a_x 为车辆纵向加速度; $V_{x\text{ref}}$ 为参考纵向速度; $V_{y\text{ref}}$ 为参考侧向速度; ω_{ref} 为参考横摆角速度; $K = m/L^2(l_f/K_r - l_r/K_f)$ 为车辆稳定性因数; $L = l_f + l_r$ 为车辆前轴到后轴之间的距离。

通过坐标转换关系可以推导出车辆在大地球坐标系中的纵向和侧向运动方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_{\text{ref}} = V_{x\text{ref}} \cos \varphi_{\text{ref}} - V_{y\text{ref}} \sin \varphi_{\text{ref}} \\ \dot{y}_{\text{ref}} = V_{x\text{ref}} \sin \varphi_{\text{ref}} + V_{y\text{ref}} \cos \varphi_{\text{ref}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_{ref} 和 y_{ref} 为大地坐标系下的位置坐标; φ_{ref} 为车辆横摆角, 且有 $\dot{\varphi}_{\text{ref}} = \omega_{\text{ref}}$ 。

1.3 主动尾翼气动性能分析

主动尾翼在车辆行驶性能优化中扮演了重要角色, 利用空气流动产生额外的下压力, 有效增强了车辆对地面的附着力^[15]。附着力的增大能够抵消部分车辆的气动升力, 抑制车身可能出现的上浮现象, 使车辆以贴近地面的状态更加平稳地行驶。由此带来的空气动力学优势, 不仅增强了车辆的行驶稳定性, 还进一步提高了驾驶安全性, 为用户驾驶安全提供了保障。主动尾翼作用力图解如图 1 所示。

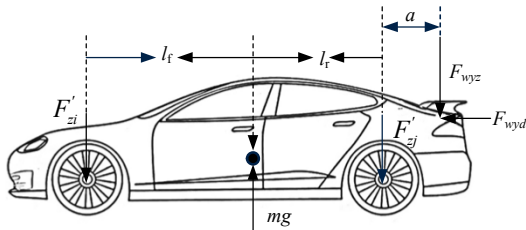


图 1 主动尾翼作用力图解

Fig. 1 Active rear wing force diagram

如图 1 所示, 在不同工况下, 主动尾翼展开角度不同, 当主动尾翼展开到某一角度时, 会对车辆产生相应的下压力 F_{wyd} 以及气动阻力 F_{wyz} 。下压力与气动阻力可表示为:

$$F_{wyd} = \frac{\rho A C_{wyL} V_x^2}{2} \quad (8)$$

$$F_{wyz} = \frac{\rho A C_{wyD} V_x^2}{2} \quad (9)$$

式中: C_{wyL} 和 C_{wyD} 分别为主动尾翼不同角度时对应的气动升力系数和气动阻力系数; ρ 为空气密度; A 为车身迎风面积。

在车辆动力学分析中, 依据力学等效原理, 作

用于车辆的气动阻力可简化为作用于车辆质心的等效力, 其大小及方向保持不变。下压力通过尾翼相对于车辆前后轴的安装位置施加作用, 并传递至车辆前后轴, 影响各轴上的轮胎载荷分布。这种载荷变化会影响车轮的纵向力和侧向力, 对车辆的动力学特性产生影响。主动尾翼作用后轮胎载荷分配情况如式(10)~(13)所示。

$$F'_{z1} = m \left(\frac{gl_f}{2L} - \frac{h_{cg}}{2L} a_x - \frac{l_f h_{cg}}{d_f L} a_y \right) - \frac{F_{wyd} a}{2L} = F_{z1} + \Delta F_{z1} \quad (10)$$

$$F'_{z2} = m \left(\frac{gl_f}{2L} - \frac{h_{cg}}{2L} a_x + \frac{l_f h_{cg}}{d_f L} a_y \right) - \frac{F_{wyd} a}{2L} = F_{z2} + \Delta F_{z2} \quad (11)$$

$$F'_{z3} = m \left(\frac{gl_f}{2L} - \frac{h_{cg}}{2L} a_x - \frac{l_f h_{cg}}{d_f L} a_y \right) + \frac{F_{wyd} (a + L)}{2L} = F_{z3} + \Delta F_{z3} \quad (12)$$

$$F'_{z4} = m \left(\frac{gl_f}{2L} - \frac{h_{cg}}{2L} a_x + \frac{l_f h_{cg}}{d_f L} a_y \right) + \frac{F_{wyd} (a + L)}{2L} = F_{z4} + \Delta F_{z4} \quad (13)$$

式中: F'_{zi} 为主动尾翼作用后总的轮胎载荷; ΔF_{zi} 为主动尾翼附加在轮胎上的轮胎载荷; m 为车辆质量; g 为重力加速度; h_{cg} 为车辆质心到地面的高度; a_y 为车辆侧向加速度; d_f 为车辆前轮之间的轮距; d_r 为车辆后轮之间的轮距, 通常 $d_f + d_r = 2l_s$ 。

根据轮胎模型可知, 轮胎载荷发生变化后会引轮胎的工作区域 λ_i 发生变化, 设新的工作区域为 ϕ_i , 则其表达式为:

$$\phi_i = \frac{\mu F'_{zi} (1 + s_{xi})}{2 \sqrt{(C_{si} s_{xi})^2 + (C_{ai} \tan \alpha_i)^2}}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

其中, $\phi_i < 1$ 表示轮胎处于非线性区域, $\phi_i \geq 1$ 表示轮胎处于线性区域。

由此引起轮胎纵向力和侧向力变化, 即:

$$\begin{cases} F'_{xi} = C_{si} \frac{s_{xi}}{1 + s_{xi}} f(\phi_i), & i = 1, 2, 3, 4 \\ F'_{yi} = C_{ai} \frac{\tan \alpha_i}{1 + s_{xi}} f(\phi_i), & i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (15)$$

$$f(\phi_i) = \begin{cases} \phi_i (2 - \phi_i), & \phi_i < 1 \\ 1, & \phi_i \geq 1 \end{cases} \quad (16)$$

式中: F'_{xi} 和 F'_{yi} 分别为主动尾翼作用后的总的轮胎纵向力和侧向力。

根据式(1)(2)和(15)(16)可以将主动尾翼作用在轮胎上的轮胎纵向力 ΔF_{xi} 和侧向力 ΔF_{yi}

分离出来,分别为:

$$\begin{aligned}\Delta F_{xi} &= F'_{xi} - F_{xi} = \\ &C_{si} \frac{s_{xi}}{1+s_{xi}} f(\phi_i) - C_{si} \frac{s_{xi}}{1+s_{xi}} f(\lambda_i) \quad (17) \\ \Delta F_{yi} &= F'_{yi} - F_{yi} = \\ &C_{ai} \frac{\tan \alpha_i}{1+s_{xi}} f(\phi_i) - C_{ai} \frac{\tan \alpha_i}{1+s_{xi}} f(\lambda_i) \quad (18)\end{aligned}$$

由式(17)(18)可以得到在不同车辆状态时主动尾翼对车辆轮胎纵向力和轮胎侧向力的影响,以便后文分析使用。

1.4 融合主动尾翼的三自由度模型的建立

本文在文献[16]建立的车辆三自由度模型的基础上,将上述分析的主动尾翼的作用力分解至该车辆模型,得到融合主动尾翼的车辆三自由度模型,如图2所示。该模型描述了考虑主动尾翼作用时车辆在行驶中的动态行为。车辆转弯时,主动尾翼作用在质心的气动阻力可以分解为沿纵向的分力 ΔF_x 和沿侧向的分力 ΔF_y ,二者表达式为:

$$\begin{cases} \Delta F_x = F_{wyd} \cos \beta \\ \Delta F_y = F_{wyd} \sin \beta \end{cases} \quad (19)$$

式中: β 为车身侧偏角。

根据图2将每个轮胎纵向力和侧向力分别按车身坐标系的X轴和Y轴进行分解,再将其进行统一的向量合成,得到融合主动尾翼的车辆动力学平衡方程如下:

$$\begin{aligned}\sum F_{xn} &= \sum_{i=1}^4 (F_{xi} + \Delta F_{xi}) \cos \delta_i - \\ &\sum_{i=1}^4 (F_{yi} + \Delta F_{yi}) \sin \delta_i \quad (20)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum F_{yn} &= \sum_{i=1}^4 (F_{xi} + \Delta F_{xi}) \sin \delta_i + \\ &\sum_{i=1}^4 (F_{yi} + \Delta F_{yi}) \cos \delta_i \quad (21)\end{aligned}$$

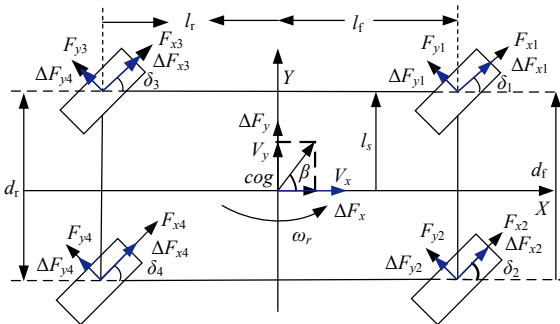


图2 融合主动尾翼的车辆三自由度模型

Fig. 2 A three-degree-of-freedom vehicle model with active rear wing

$$\begin{aligned}\sum M_{zn} &= \sum_{i=1}^4 (-1)^{i-1} l_s ((F_{xi} + \Delta F_{xi}) \cos \delta_i) - \\ &\sum_{i=1}^4 (-1)^{i-1} l_s ((F_{yi} + \Delta F_{yi}) \sin \delta_i) + \\ &\sum_{i=1}^2 l_f ((F_{xi} + \Delta F_{xi}) \sin \delta_i) + \\ &\sum_{i=1}^2 l_f ((F_{yi} + \Delta F_{yi}) \cos \delta_i) + \\ &\sum_{i=3}^4 l_r ((F_{xi} + \Delta F_{xi}) \sin \delta_i) + \\ &\sum_{i=3}^4 l_r ((F_{yi} + \Delta F_{yi}) \cos \delta_i) \quad (22)\end{aligned}$$

式中: $\sum F_{xn}$ 为主动尾翼作用后车辆的纵向合力; $\sum F_{yn}$ 为主动尾翼作用后车辆的侧向合力; $\sum M_{zn}$ 为主动尾翼作用后车辆的横摆合力矩。

由牛顿第二定律可得车辆运动学平衡方程为:

$$\sum F_{xn} + \Delta F_x = m \cdot (\dot{V}_x - \omega_r V_y) \quad (23)$$

$$\sum F_{yn} + \Delta F_y = m \cdot (\dot{V}_y - \omega_r V_x) \quad (24)$$

$$\sum M_{zn} + \Delta M_z = I_z \cdot \dot{\omega}_r \quad (25)$$

至此,融合主动尾翼的车辆三自由度模型建立完毕,为下文提供理论基础。

2 考虑主动尾翼的驱动可行域建立

驱动可行域的构建基于轮胎摩擦圆约束,结合车辆三自由度模型,可推导出纵向合力、侧向合力及横摆合力矩的可行域^[17]。这些可行域共同定义了路面能够为车辆提供的驱动能力范围,是车辆在不同工况下实现稳定性控制的基础。已知轮胎纵向力和侧向力所受的轮胎摩擦圆约束如图3所示。

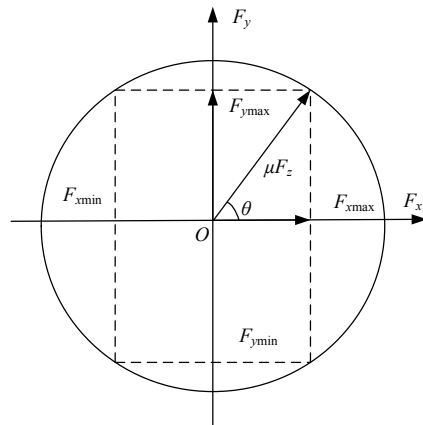


图3 轮胎摩擦圆约束

Fig. 3 Tire friction circle restraint

轮胎摩擦圆约束表示为:

$$\sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2} \leq \mu F_{zi}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (26)$$

设轮胎纵向力与侧向力之间的瞬时夹角为 θ_i , 主动尾翼作用时, 车辆的纵向力和侧向力与轮胎载荷有如下关系:

$$\begin{aligned} -\mu(F_{zi} + \Delta F_{zi}) \cos \theta_i &\leq F_{xi} \leq \\ \mu(F_{zi} + \Delta F_{zi}) \cos \theta_i \end{aligned} \quad (27)$$

$$-\mu(F_{zi} + \Delta F_{zi}) \sin \theta_i \leq F_{yi} \leq \mu(F_{zi} + \Delta F_{zi}) \sin \theta_i \quad (28)$$

式中: $\theta_i = \arctan\left(\frac{a_{yi}}{a_{xi}}\right)$; μ 为路面附着系数; 令 $\zeta_i =$

$$\mu(F_{zi} + \Delta F_{zi}) \cos \theta_i, \chi_i = \mu(F_{zi} + \Delta F_{zi}) \sin \theta_i。$$

由于每个轮胎都有式(27)(28)的约束, 由车辆动力学平衡关系(即式(20)~(22))和车辆运动学平衡方程(即式(23)~(25))可推导出考虑主动尾翼作用时的车辆驱动可行域如下:

纵向合力可行域为:

$$\begin{cases} \Sigma F_{x\max} = \hbar_{x1} + \hbar_{x2} + \Delta F_x \\ \Sigma F_{x\min} = -\Sigma F_{x\max} \end{cases} \quad (29)$$

其中: $\hbar_{x1} = \zeta_1 \cos \delta_1 + \zeta_2 \cos \delta_2 + \zeta_3 \cos \delta_3 + \zeta_4 \cos \delta_4$,

$$\hbar_{x2} = \chi_1 \sin \delta_1 + \chi_2 \sin \delta_2 + \chi_3 \sin \delta_3 + \chi_4 \sin \delta_4。$$

侧向合力可行域为:

$$\begin{cases} \Sigma F_{y\max} = \varpi_{y1} + \varpi_{y2} + \Delta F_y \\ \Sigma F_{y\min} = -\Sigma F_{y\max} \end{cases} \quad (30)$$

其中:

$$\varpi_{y1} = \chi_1 \cos \delta_1 + \chi_2 \cos \delta_2 + \chi_3 \cos \delta_3 + \chi_4 \cos \delta_4,$$

$$\varpi_{y2} = \zeta_1 \sin \delta_1 + \zeta_2 \sin \delta_2 + \zeta_3 \sin \delta_3 + \zeta_4 \sin \delta_4。$$

横摆合力矩可行域为:

$$\begin{cases} \Sigma M_{z\max} = \lambda_{x1} + \lambda_{x2} + \lambda_{y1} - \lambda_{y2} + \Delta M_z \\ \Sigma M_{z\min} = -\Sigma M_{z\max} \end{cases} \quad (31)$$

其中:

$$\lambda_{x1} = (\zeta_1 \cos \delta_1 - \zeta_2 \cos \delta_2 + \zeta_3 \cos \delta_3 - \zeta_4 \cos \delta_4) l_s,$$

$$\lambda_{x2} = (-\chi_1 \sin \delta_1 + \chi_2 \sin \delta_2 - \chi_3 \sin \delta_3 + \chi_4 \sin \delta_4) l_s,$$

$$\lambda_{y1} = (\zeta_1 \sin \delta_1 + \zeta_2 \sin \delta_2 + \chi_1 \cos \delta_1 + \chi_2 \cos \delta_2) l_t,$$

$$\lambda_{y2} = (\zeta_3 \sin \delta_3 + \zeta_4 \sin \delta_4 + \chi_3 \cos \delta_3 + \chi_4 \cos \delta_4) l_t。$$

至此, 考虑主动尾翼的联合驱动可行域构建已完成。驱动可行域约束为 $U = \{u | u_{\min} < u < u_{\max}\}$, 为下文上层控制器提供了控制约束, 满足:

$$u_{\max} = \begin{bmatrix} \Sigma F_{x\max} \\ \Sigma F_{y\max} \\ \Sigma M_{z\max} \end{bmatrix}, u_{\min} = \begin{bmatrix} \Sigma F_{x\min} \\ \Sigma F_{y\min} \\ \Sigma M_{z\min} \end{bmatrix}。$$

3 考虑主动尾翼作用的分层控制器设计

基于上文得到的考虑主动尾翼驱动可行域约束, 本节研究主动尾翼对整车稳定性控制的影响。此处控制器采用分层式控制结构。上层控制器计算虚拟控制量为车辆稳定行驶所需要的纵向合力、侧向合力以及横摆合力矩, 下层分配控制器是将这些力和力矩分配到各个车轮上, 根据力矩平衡条件和分配后的轮胎纵向力求出各轮驱动力矩/制动力矩, 再据轮胎逆模型和分配后的轮胎侧向力求出四轮的转向角度。

模型预测控制又称为滚动时域控制, 通过实时滚动优化机制得到最优控制的闭环解, 具有多目标优化、滚动优化、带约束处理、鲁棒性高以及处理多变量系统等多种优点^[18]。本文选取模型预测控制器作为上层控制器。

由式(23)~(25)可得车辆三自由度模型具体展开的状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{V}_x = \omega_r V_y + \frac{\Sigma F_{xn} + \Delta F_x}{m} \\ \dot{V}_y = -\omega_r V_x + \frac{\Sigma F_{yn} + \Delta F_y}{m} \\ \dot{\omega}_r = \frac{\Sigma M_{zn} + \Delta M_z}{I_z} \end{cases} \quad (32)$$

则该运动控制系统的一般形式为:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = Cx \end{cases} \quad (33)$$

其中, 状态量为 $x = [V_x, V_y, \omega_r]^T$, 控制量分为两部分, 一部分是主动尾翼作用后车辆的合力与和合力矩, 表达式为 $u_1 = [\Sigma F_{xn}, \Sigma F_{yn}, \Sigma M_{zn}]^T$, 另一部分为主动尾翼作用后气动阻力产生的力与力矩, 表达式为 $u_2 = [\Delta F_x, \Delta F_y, \Delta M_z]^T$, 二者相加得到实际模型预测控制器的控制量, 其表达式为 $u = u_1 + u_2, C = \text{diag}(1, 1, 1)$ 。

根据模型预测控制器的基本原理, 首先需要将如式(32)所示的车辆三自由度模型的状态空间方程利用前向欧拉法进行离散化处理:

$$\begin{cases} V_x(k+1) = V_x(k) + \\ T \left(\omega_r(k) V_y(k) + \frac{\Sigma F_{nx}(k) + \Delta F_x(k)}{m} \right) \\ V_y(k+1) = V_y(k) - \\ T \left(\omega_r(k) V_x(k) - \frac{\Sigma F_{ny}(k) + \Delta F_y(k)}{m} \right) \\ \omega_r(k+1) = \omega_r(k) + \frac{\Sigma M_{nz}(k) + \Delta M_z(k)}{m} \end{cases} \quad (34)$$

式中: T 为控制系统的采样时间; k 为当前时刻。

令控制系统的参考序列为 $R(k)$, 输出序列为 $Y(k)$, 控制输入序列为 $U(k)$, 则:

$$Y(k) = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ y(k+2|k) \\ y(k+3|k) \\ \vdots \\ y(k+N_p|k) \end{bmatrix}, U(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+N_c-1) \end{bmatrix},$$

$$R(k) = \begin{bmatrix} V_{xref}(k) \\ V_{yref}(k) \\ \omega_{rref}(k) \end{bmatrix} \quad (35)$$

控制器设计目标首先是保证车辆的稳定性, 第一个目标函数表达式为:

$$J_1 = \sum_{i=1}^{N_p} \|Y(k+i|k) - R(k)\|_Q^2 =$$

$$\sum_{i=1}^{N_p} (Q_1 (V_x(k+i|k) - V_{xref}(i))^2 +$$

$$Q_2 (V_y(k+i|k) - V_{yref}(i))^2 +$$

$$Q_3 (\omega_r(k+i|k) - \omega_{rref}(i))^2) \quad (36)$$

式中: $Q = \text{diag}(Q_1, Q_2, Q_3)$ 是车辆稳定性权重矩阵。

此外, 还需确保车辆在行驶过程中的舒适性, 避免因控制动作剧烈变化导致的不良驾驶体验。

第二个控制目标表达式为:

$$J_2 = \sum_{j=0}^{N_c-1} \|\Delta U(k)\|_P^2 =$$

$$\sum_{j=0}^{N_c-1} [P_1 (\Sigma F_{xm}(k+j) + \Delta F_x(k+j))^2 +$$

$$P_2 (\Sigma F_{ym}(k+j) + \Delta F_y(k+j))^2 +$$

$$P_3 (\Sigma M_{zn}(k+j) + \Delta M_z(k+j))^2] \quad (37)$$

式中: $P = \text{diag}(P_1, P_2, P_3)$ 是车辆舒适性权重矩阵。

最后, 衡量车辆能否按照预期轨迹行驶的一个关键性能指标是质心侧偏角 γ , 为保证车辆沿

参考轨迹行驶, γ 需被有效控制, 使其始终保持在合理的范围内, 即:

$$|\gamma| < \gamma_{\max} \quad (38)$$

式中: $\gamma = \arctan \frac{V_y}{V_x} \approx \frac{V_y}{V_x}$, $\gamma_{\max} = 0$ 。

第三个目标函数表达式为:

$$J_3 = \sum_{m=1}^{N_p} \|\gamma(k+m|k) - \gamma_{\max}\|_R^2 =$$

$$\sum_{m=1}^{N_p} R \left(\frac{V_y(k+m|k)}{V_x(k+m|k)} - \gamma_{\max} \right)^2 \quad (39)$$

式中: R 为质心侧偏角权重系数。

控制过程中对控制量进行约束, 即驱动可行域约束。经过上述对控制目标和约束条件的分析, 可以将车辆稳定性控制问题转化为约束优化问题:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \|Y(k+i|k) - R(k)\|_Q^2 +$$

$$\sum_{j=0}^{N_c-1} \|\Delta U(k)\|_P^2 + \sum_{m=1}^{N_p} \|\gamma(k+m|k) - \gamma_{\max}\|_R^2 \quad (40)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \text{式(32)(33)} \\ \Sigma F_{x\min} \leq \Sigma F_{xm} + \Delta F_x \leq \Sigma F_{x\max} \\ \Sigma F_{y\min} \leq \Sigma F_{ym} + \Delta F_y \leq \Sigma F_{y\max} \\ \Sigma M_{z\min} \leq \Sigma M_{zm} + \Delta M_z \leq \Sigma M_{z\max} \\ |\gamma| < \gamma_{\max} \end{cases}$$

由于预测模型的非线性特性, 且约束条件中既包含等式也包含不等式, 这使式(40)这一优化问题成为一个典型的非线性优化问题。本文采用粒子群优化算法对模型预测控制器进行求解, 粒子群算法具有并行计算的特征, 且能够实时提高硬件在线计算速度, 可以保证求解算法实时性。根据粒子群算法原理, 在每个时刻动态更新系统状态, 有效地求解这一优化问题。在 k 时刻求得最优化问题的最优解 $U_k(k)$ 。然后, 将求解的首个元素作用于系统, 即:

$$U_k(k) \stackrel{\text{def}}{=} \{u(k|k), u(k+1|k), \dots, u(k+N_c-1|k)\}$$

$$u^*(k) = [\Sigma F_x^*(k), \Sigma F_y^*(k), \Sigma M_z^*(k)] =$$

$$[1, 0, \dots, 0] U_k(k) \quad (41)$$

重复上述过程, 直至求解结束得到最优控制序列 $U^*(k)$, 可以表示为:

$$U^*(k) = [u^*(k), u^*(k+1), \dots, u^*(k+N_c-1)] \quad (42)$$

下层分配控制器采用文献[19]中使用的基于

伪逆算法的轮胎力分配方法。

4 仿真验证与结果分析

完成车辆稳定性分层控制器设计后,需要通过仿真实验验证在不同工况下主动尾翼对车辆稳定性的控制效果,控制系统整体框架如图 4 所示。本文在 Matlab/Simulink 中搭建了车辆的上层模

型预测控制器和下层轮胎力分配控制器,通过 CarSim 运行被控车辆。由于主动尾翼对低附着路面行驶的车辆影响更大,故本文共验证了 4 种工况,高附着单移线工况、低附着单移线工况、高附着稳态回转工况和低附着稳态回转工况。表 1 为车辆模型中的参数。表 2 为主动尾翼在不同工况下的作用力范围。

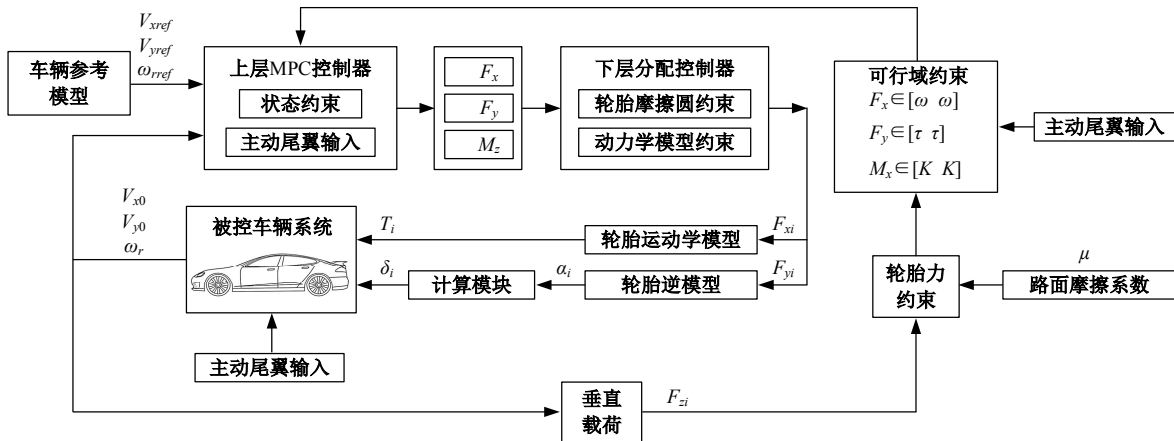


图 4 控制系统框架图

Fig. 4 Control system structure

表 1 车辆模型的参数列表

Table 1 Parameter list of vehicle model			
参数	符号	单位	数值
车辆质量	m	kg	1 359.8
质心与地面高度	h	m	0.512
前轮轮距	d_f	m	1.414
后轮轮距	d_r	m	1.414
前轴间距	l_f	m	1.062
后轴间距	l_r	m	1.485
前轮侧偏刚度	K_f	N/rad	66 930.0
后轮侧偏刚度	K_r	N/rad	62 700.0
整车转动惯量	I_z	kg·m ²	1 992.54

表 2 主动尾翼作用力范围

Table 2 Range of active rear wing force	
参数	数值/N
主动尾翼产生气动阻力范围	-1 500~-200
主动尾翼产生下压力范围	-600~2 000

4.1 高附着单移线工况(工况 1)仿真验证

设置路面摩擦因数为 0.8,模拟车辆行驶在干燥良好路面。设置车辆的参考速度为 27.78 m/s,车辆参考模型的前轮转角(见图 5)是输入幅值为 0.065 rad,周期为 2.5 s,输出为正弦信号,总仿真时间为 5 s,在 1 s 时开始转弯,如图 5 所示。

图 6 为车辆状态的控制效果图,可以看出,在仿真工况下不考虑主动尾翼作用和考虑主动尾翼作

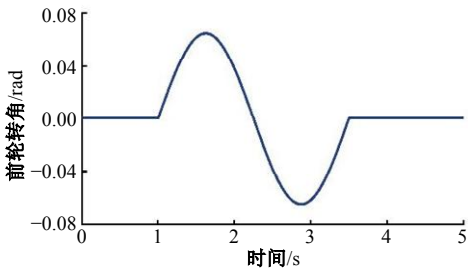


图 5 前轮转角输入(工况 1)

Fig. 5 Front wheel angle input (case 1)

用时的车辆都能稳定行驶。但考虑主动尾翼作用时的车辆状态变化幅度更小,位移跟踪效果更好。

图 7 为车辆运动轨迹的对比图,可以看出,在不考虑主动尾翼作用的情况下,车辆轨迹与二自由度参考模型的车辆轨迹存在部分偏差,但在考虑主动尾翼作用的情况下,车辆轨迹与参考车辆轨迹几乎重合,说明主动尾翼有效改善了车辆在动态工况下的稳定性和响应能力,尤其是在路径过渡阶段,主动尾翼的控制作用使得车辆表现出更优的操控性能和轨迹跟踪能力,确保了车辆能够更加精确地跟随预设轨迹。

图 8 为不考虑主动尾翼作用和考虑主动尾翼作用时的车辆驱动可行域对比图。不考虑主动尾翼时,纵向合力可行域范围为 $\Sigma F_{x\max}$ 和 $\Sigma F_{x\min}$,侧向合力可行域范围为 $\Sigma F_{y\max}$ 和 $\Sigma F_{y\min}$,横摆合力矩

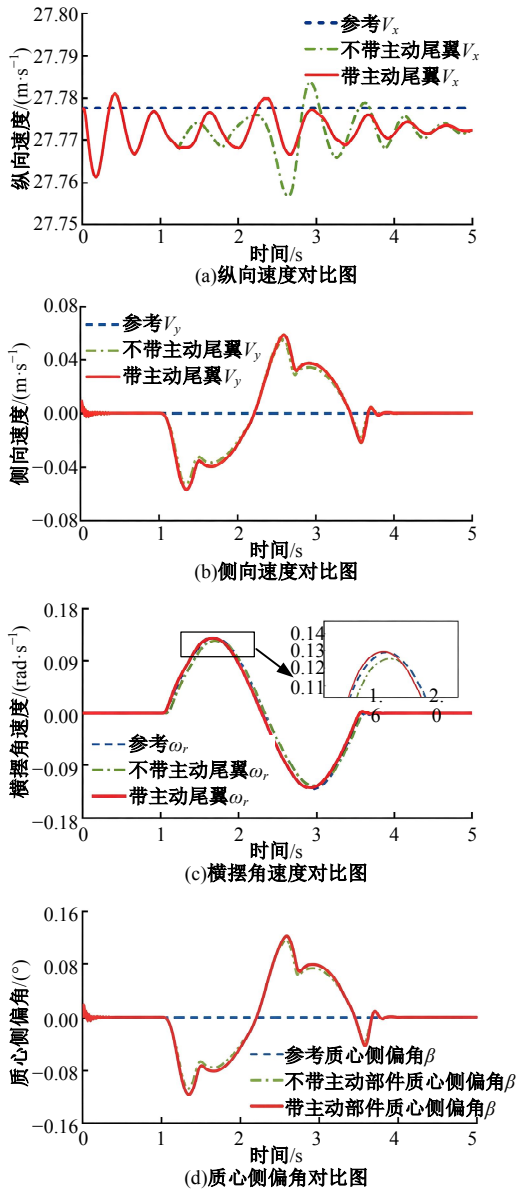


图6 车辆状态控制效果图(工况1)

Fig. 6 Vehicle status control effect (case 1)

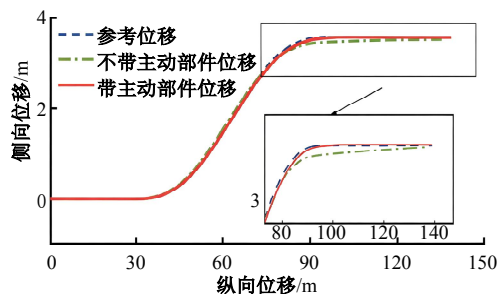


图7 运动轨迹对比图(工况1)

Fig. 7 Comparison of motion trajectories (case 1)

可行域范围为 ΣM_{zmax} 和 ΣM_{zmin} 。考虑主动尾翼时,纵向合力可行域范围为 ΣF_{xmax} 和 ΣF_{xmin} ,侧向合力可行域范围为 ΣF_{ymax} 和 ΣF_{ymin} ,横摆合力矩可行域

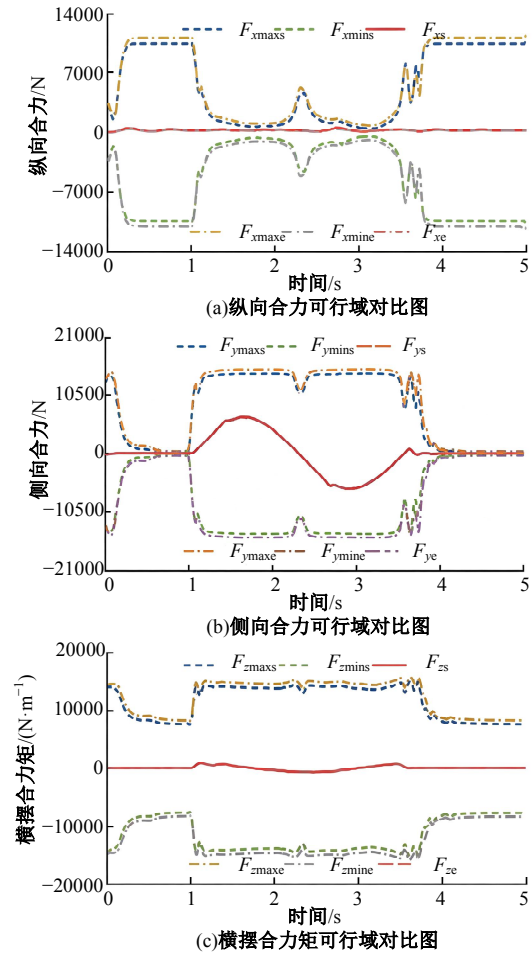


图8 车辆驱动可行域对比图(工况1)

Fig. 8 Comparison of Vehicle drive feasible region (case 1)

范围为 ΣM_{zmax} 和 ΣM_{zmin} 。 ΣF_{xs} 、 ΣF_{ys} 、 ΣM_{zs} 为不考虑主动尾翼时的实际纵向合力、侧向合力以及横摆合力矩值, ΣF_{xe} 、 ΣF_{ye} 、 ΣM_{ze} 为考虑主动尾翼时的实际纵向合力、侧向合力以及横摆合力矩值。

从图8可以看出,考虑主动尾翼作用时的车辆纵向合力可行域、侧向合力可行域以及横摆合力矩可行域相对于不考虑主动尾翼作用时的车辆纵向合力可行域、侧向合力可行域以及横摆合力矩可行域均有所扩大。通过图中数据对比可知,考虑主动尾翼作用时的车辆纵向合力可行域范围比不考虑主动尾翼的纵向合力可行域范围扩大了6.73%、侧向合力可行域范围扩大了5.91%、横摆合力矩可行域范围扩大了6.07%。上述分析表明,主动尾翼提升了车辆的操纵极限和动态性能,车辆在纵向、侧向及横摆维度上的综合性能优化使其能够更好地应对复杂的工况,增强了车辆安全性、稳定性和操控能力。

4.2 低附着单移线工况(工况 2)仿真验证

设置路面摩擦因数为 0.4, 模拟车辆行驶在湿滑路面。设置车辆参考速度为 25 m/s, 由于路面摩擦因数的降低, 将车辆参考模型的前轮转角的输入幅值降低到 0.06 rad, 周期调整为 3 s, 输出为正弦信号, 总仿真时间为 6 s, 在 1.5 s 时开始转弯, 整个过程的单移线即为车辆完成同向换道, 如图 9 所示。

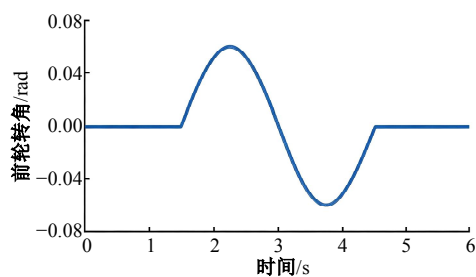


图 9 前轮转角输入(工况 2)

Fig. 9 Front wheel angle input (case 2)

图 10 为车辆状态控制效果图。从图 10(a)(b)(c)可以看出, 在未考虑主动尾翼作用的情况下, 车辆状态明显偏离既定的参考状态, 在 3.5 s 时仿真报错无法运行下去。考虑主动尾翼作用的情况下, 车辆状态与参考状态保持较小误差, 说明此时的车辆行驶状态接近理想情况。

图 11 为车辆运动轨迹的对比图, 可以看出当未考虑主动尾翼作用时, 车辆在即将完成换道时偏离了参考位移, 车辆失稳导致仿真中止, 其原因是路面附着系数较小, 车辆在转向过程中未能获得足够的驱动力和侧向力来克服离心力和路面摩擦力。考虑主动尾翼作用时, 车辆能完全跟踪上参考位移并完成换道, 主动尾翼给车辆提供了驱动力并扩大驱动力的范围, 确保了车辆获得足够的转向力和稳定性, 使车辆能够稳定的行驶。

图 12 为不考虑主动尾翼作用和考虑主动尾翼作用时的车辆驱动可行域对比图。车辆驱动可行域代表了车辆可执行的驱动能力的临界范围, 车辆驱动力不能长期处于临界状态, 当可行域不再能限制纵向合力和侧向合力时, 即仿真进行到 3 s 之后, 纵向合力和侧向合力超出可行域范围, 在下层控制器分配时轮胎力超出摩擦圆的限制, 出现无解情况, 从而导致仿真中止。当考虑主动尾翼作用时, 车辆的可行域和驱动能力都有所增加, 其中纵向合力可行域增加了 8.53%、侧向合力可行域增加了 9.74%、横摆合力矩可行域增加了

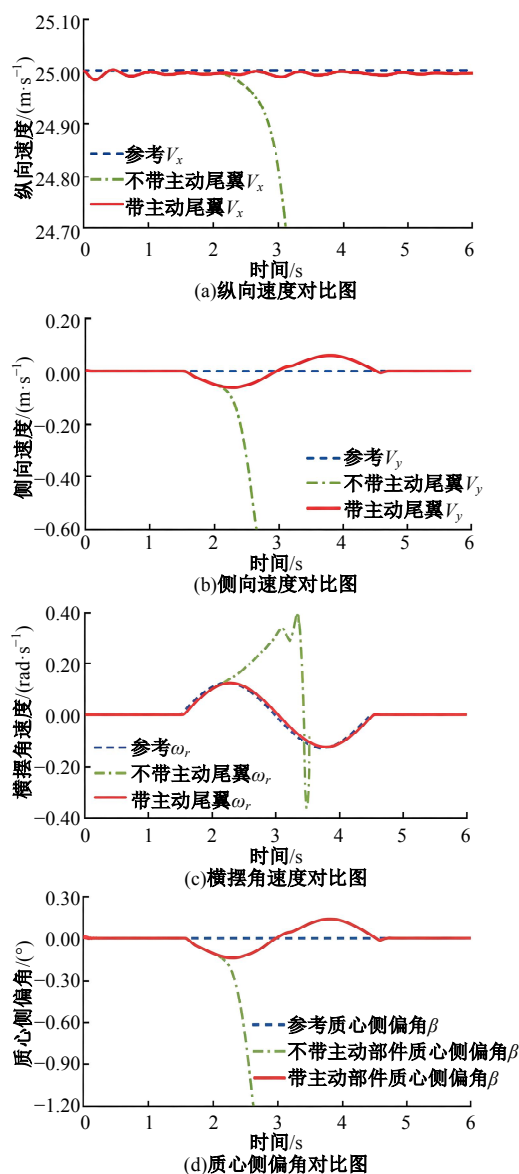


图 10 车辆状态控制效果图(工况 2)

Fig. 10 Vehicle status control effect (case 2)

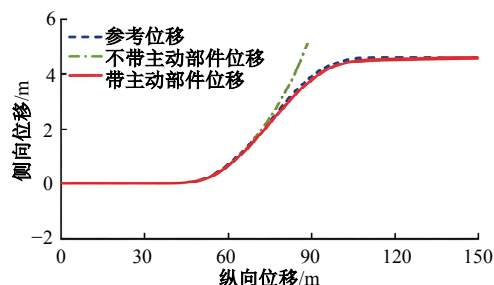


图 11 运动轨迹对比图(工况 2)

Fig. 11 Comparison of motion trajectories (case 2)

9.89%。主动尾翼增加了车辆载荷, 车辆载荷在车辆转弯时直接影响了车辆侧向力, 故主动尾翼对车辆侧向合力的影响要大于对纵向合力的影响。

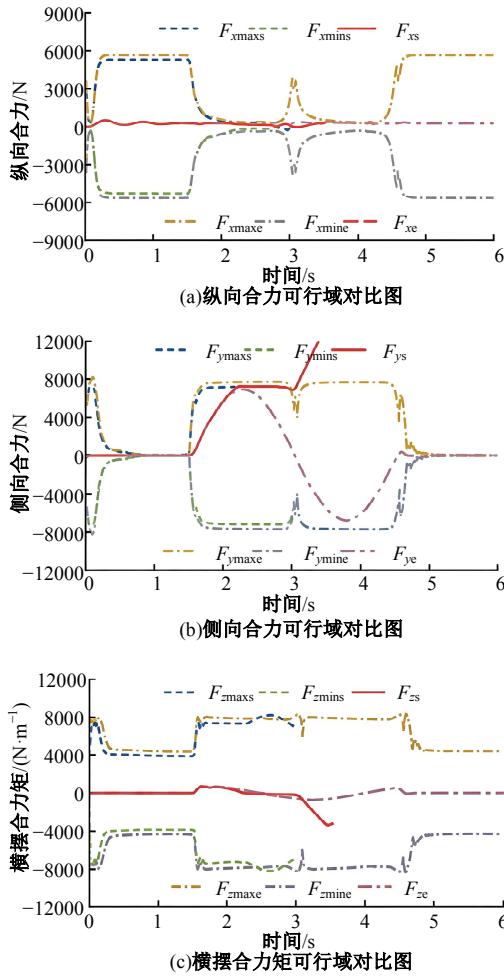


图12 车辆驱动可行域对比图(工况2)

Fig. 12 Comparison of vehicle drive feasible region (case 2)

4.3 高附着稳态工况(工况3)仿真验证

稳态回转工况为车辆在恒定速度行驶过程中,将方向盘转至某一固定角度,观察车身的动态响应。设置初始速度为25 m/s,路面摩擦因数设为0.8,车辆稳定行驶时前轮转角固定为0.1 rad,如图13所示,总仿真时间为30 s。

图14为车辆状态的控制效果图,可以看出,在本次仿真工况下不考虑主动尾翼作用和考虑主

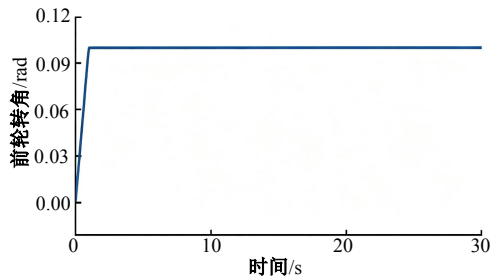


图13 前轮转角输入(工况3)

Fig. 13 Front wheel Angle input (case 3)

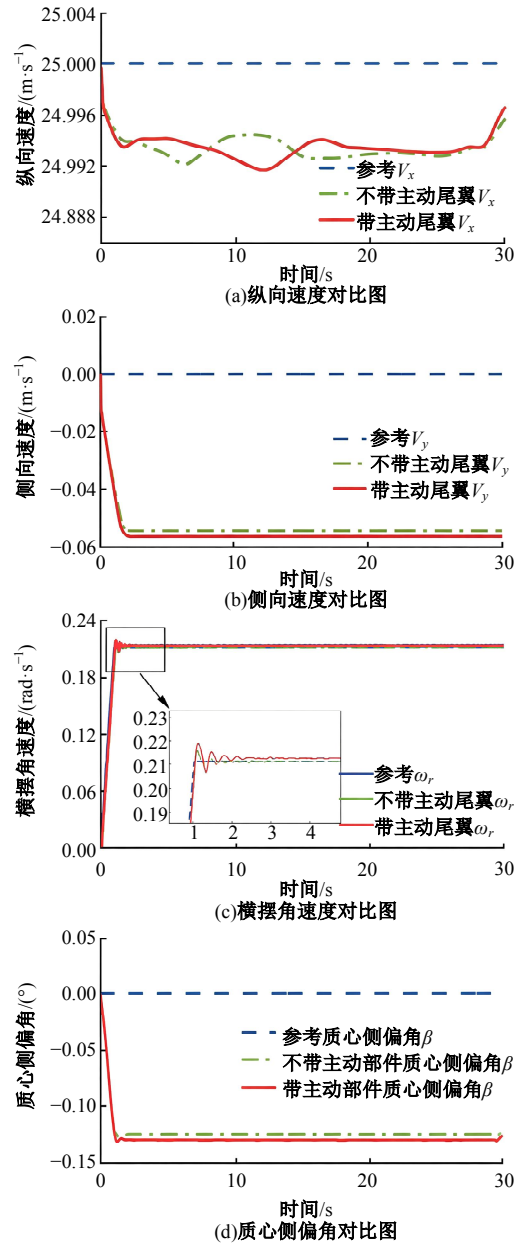


图14 车辆状态控制效果图(工况3)

Fig. 14 Vehicle status control effect (case 3)

动尾翼作用车辆都能稳定地运行下去。考虑主动尾翼作用时车辆的侧向速度、横摆角速度以及质心侧偏角均比不考虑主动尾翼作用时的大,这是由于考虑主动尾翼作用时增加了车辆后轴的稳定性,使得车辆的动态响应更加敏感,在高速情况下,车辆的转向灵敏度得到提升。

图15为车辆运动轨迹的对比图,可以看出不考虑主动尾翼作用时车辆轨迹同二自由度参考模型的车辆轨迹几乎重合,考虑主动尾翼作用时的车辆转弯半径比不考虑主动尾翼作用时车辆的转弯半径小1.89 m。这是由于考虑主动尾翼作用

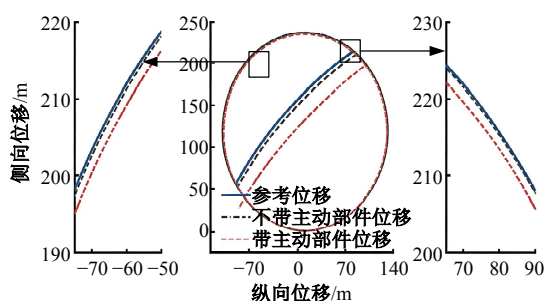


图 15 运动轨迹对比图(工况 3)

Fig. 15 Comparison of motion trajectories (case 3)

时车辆承受了更大的侧向力,使车辆的转弯半径更小,这也表明在相同的操控输入下,主动尾翼不仅优化了车辆的空气动力学特性,也优化了车辆的侧向动力学性能,降低了车辆欠转向的风险,同时也为车辆提供了一定的安全裕度,以便应对路面附着系数降低或速度突然增大等情况。

图 16 为不考虑主动尾翼作用和考虑主动尾翼作用时的车辆驱动可行域对比图。考虑主动尾翼作用时的纵向合力可行域、侧向合力可行域以

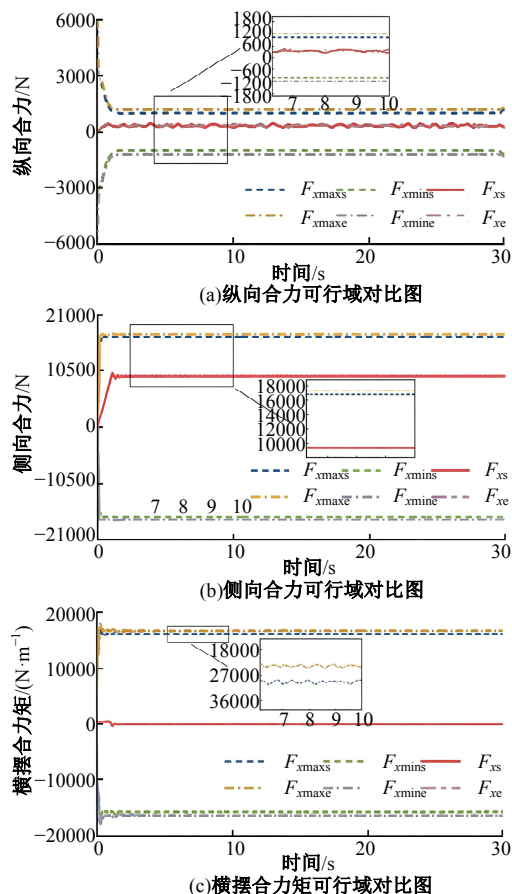


图 16 车辆驱动可行域对比图(工况 3)

Fig. 16 Comparison of vehicle drive feasible region (case 3)

及横摆合力矩可行域均有所扩大。通过数据对比可知,考虑主动尾翼作用时的车辆纵向可行域范围比不考虑主动尾翼的纵向可行域范围扩大了 7.86%、侧向合力可行域范围扩大了 6.02%、横摆合力矩可行域范围扩大了 7.23%。由上述数据分析可知,当车辆考虑主动尾翼作用时,车辆在稳态工况下能够承受更大的驱动力或制动力,提升了车辆的转弯极限,使车辆能以更小的半径或更大的速度完成转弯,使驾驶员能更加精准地控制车辆的动态行为。

4.4 低附着稳态工况(工况 4)仿真验证

当路面摩擦因数为 0.4 时,设置车辆的初始速度仍为 25 m/s,将车辆参考模型的前轮转角变小。设前轮转角为 0.06 rad,总仿真时间延长至 50 s,输入曲线如图 17 所示。

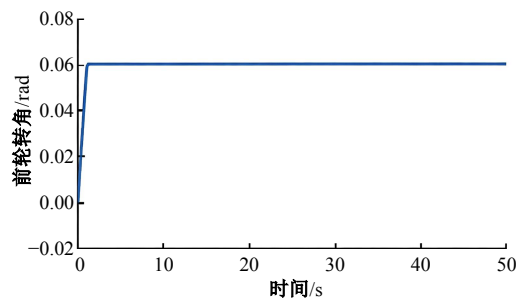


图 17 前轮转角输入(工况 4)

Fig. 17 Front wheel angle input (case 4)

图 18 为车辆状态的控制效果图,可以看出,在本次仿真工况下不考虑主动尾翼作用时,车辆的状态明显偏离既定的参考状态,在 2.5 s 时仿真中断,车辆出现失稳状态,考虑主动尾翼作用时的车辆在整个仿真过程中能稳定运行。说明车辆在该稳态回转下处于高度稳定和平衡状态。

图 19 为车辆运动轨迹的对比图,可以看出未考虑主动尾翼作用时的车辆轨迹偏离了参考轨迹,这是由于低路面摩擦因数导致车辆轮胎与路面之间的附着力降低,使轮胎无法提供足够的纵向力与侧向力来维持车辆的稳定行驶,车辆出现侧滑现象。考虑主动尾翼作用时的车辆轨迹几乎与参考轨迹重合,说明即使在低路面摩擦因数下,主动尾翼通过调整车辆的轮胎载荷,给轮胎提供了额外的抓地力,使车辆能产生足够的纵向力与侧向力,从而改善轨迹的跟踪性能。

图 20 为不考虑主动尾翼作用和考虑主动尾翼作用时的车辆驱动可行域对比图,可以看出,未考虑主动尾翼作用时的车辆实际纵向合力和侧向

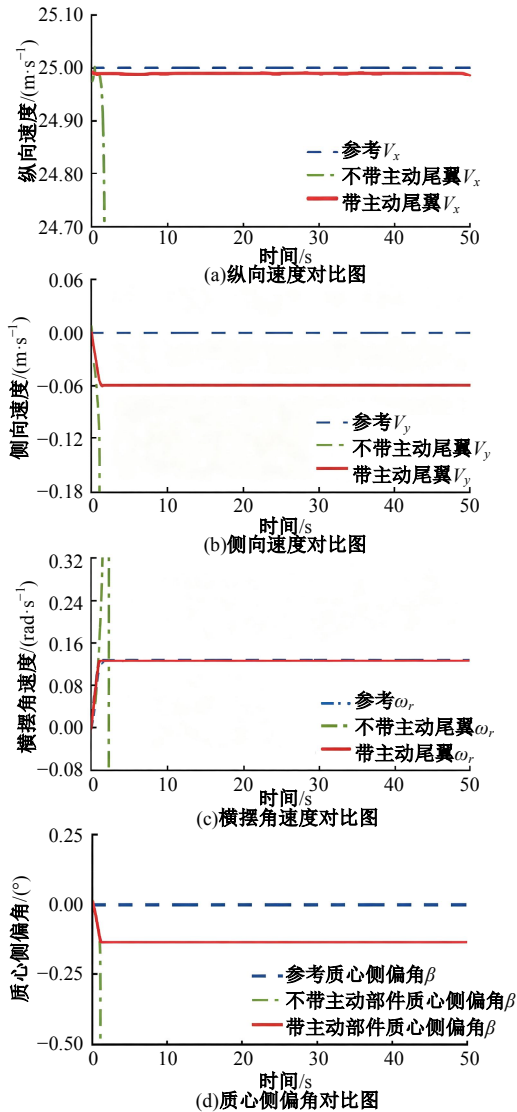


图18 车辆状态控制效果图(工况4)

Fig. 18 Vehicle status control effect (case 4)

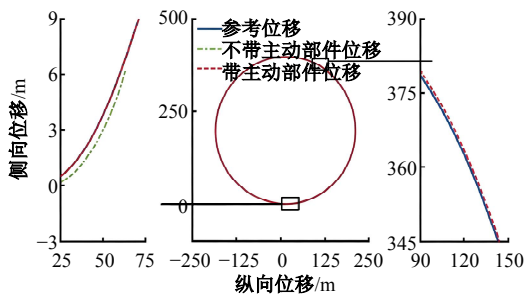


图19 运动轨迹对比图(工况4)

Fig. 19 Comparison of motion trajectories (case 4)

合力在1~2 s之间分别与纵向合力可行域和侧向合力可行域的最大值相等,说明此时车辆的驱动能力已经达到临界状态,在2.5 s之后合力超出可行域范围,下层分配控制器分配出的轮胎力超出轮胎摩擦圆极限,致使最优化求解出现无解情况,

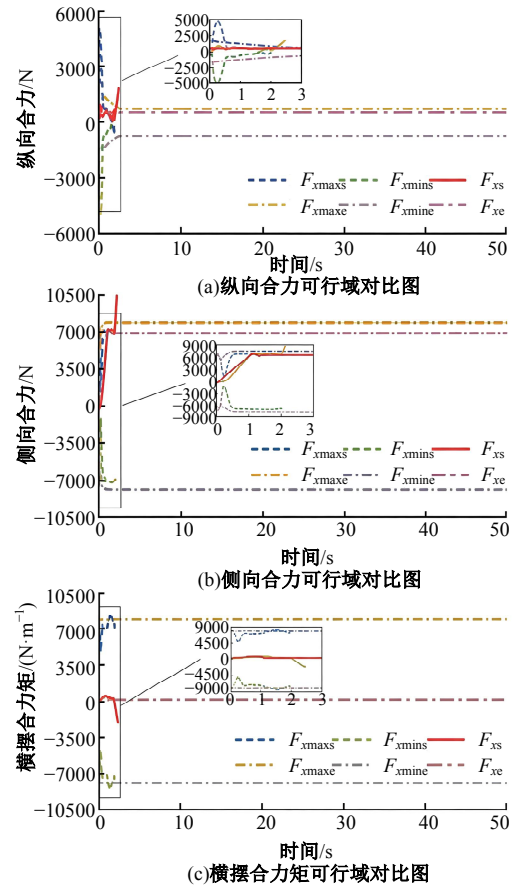


图20 车辆驱动可行域对比图(工况4)

Fig. 20 Comparison of vehicle drive feasible region (case 4)

仿真中止。考虑主动尾翼作用时的车辆纵向合力可行域、侧向合力可行域以及横摆合力矩可行域均有所扩大,其中,车辆纵向合力可行域扩大了9.07%,侧向合力可行域扩大了9.85%,横摆合力矩可行域扩大了9.72%。实际的纵向合力与侧向合力也在可行域范围内,说明在主动尾翼作用后的当前行驶条件下,车辆能在动态极限范围内运行,未出现失控或偏离稳定状态的情况,具备更高的操纵性和稳定性。

5 结束语

在汽车工业持续发展和车辆性能稳步提升的背景下,车辆行驶速度极限逐渐增大,传统的车辆主动安全系统在预防交通事故方面的局限性日益凸显。本文围绕新兴的主动空气动力学控制系统,考虑主动尾翼对车辆驱动可行域的影响,设计车辆稳定性控制系统,搭建 CarSim 和 Matlab/Simulink 的联合仿真平台对所提控制器的有效性和可行性进行了验证。结果显示,主动尾翼作用后

能有效提高车辆在不同工况下的稳定性,尤其是在低附着路面和高速转弯等复杂情况下,车辆的气动性能得到了优化,紧急情况下加大了高速避险的成功率,车辆稳定性和操纵性得到了显著改善。

参考文献:

- [1] Changoski V, Gjurov I, Jordanoska V. Improving vehicle dynamics employing individual and coordinated sliding mode control in vehicle stability, active front wheel steering and active rear wheel steering systems in co-simulation environment[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022, 1271(5): 012026.
- [2] Ji W F, Jin H L, Yan B L, et al. An integrated control framework for torque vectoring and active suspension system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 37(1): 75-86.
- [3] Wang W C, Li G, Liu S W. Research on trajectory tracking control of a semi-trailer train based on differential braking[J]. World Electric Vehicle Journal, 2024, 15(1): 30-45.
- [4] Hu J, Zhang K F, Zhang P, et al. Direct yaw moment control for distributed drive electric vehicles based on hierarchical optimization control framework[J]. Mathematics, 2024, 12(11): 1715-1721.
- [5] Komp D, Kumar S, Hajek M, et al. Effect of active camber morphing on rotor performance and control loads[J]. Aerospace Science & Technology, 2021, 108(3): 106311.
- [6] Hyundong H, Youngil K, Eunhyek J, et al. An integrated control of differential braking, front/rear traction, and active roll moment for limit handling performance[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4288-4300.
- [7] Wei C Y, Han L T. Study on modeling and control for a novel active suspension[J]. International Journal for Automotive Technology, 2024, 25(3): 11-18.
- [8] 严扬, 刘志国, 高华云. 汽车造型设计概论[M]. 清华大学出版社, 2005.
- [9] Diba F, Barari A, Esmailzadeh E. Handling and safety enhancement of race cars using active aerodynamic systems[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(9): 1171-1190.
- [10] 邓召文, 易强, 高伟. 基于 LQR 的断开式可调尾翼系统高速操纵稳定性研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(4): 151-158.
Deng Zhao-wen, Yi Qiang, Gao Wei. Study on high-speed handling stability of split adjustable rear wing system based on LQR[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(4): 151-158.
- [11] 查云飞, 石小山, 吴昊, 等. 基于主动倾斜式尾翼的车辆气动特性研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(3): 489-500.
Cha Yun-fei, Shi Xiao-shan, Wu Hao, et al. Study of vehicle aerodynamics characteristic Based on active tilting rear wing[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(3): 489-500.
- [12] Hammad M, Qureshi K, He Y. Safety and lateral dynamics improvement of a race car using active rear wing control [J]. SAE Technical Papers, 2019(1): 148-156.
- [13] Kissai M. Fundamentals on vehicle and tire modelling [J]. Vehicle Dynamics: Fundamentals and Ultimate Trends, 2022, 12(6): 1-59.
- [14] 余志生. 汽车理论[M]. 6 版. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [15] Arash H A, Stefano M. Numerical analysis of the influence of an actively controlled spoiler on the handling of a sports car[J]. Journal of Vibration & Control, 2018, 24(22): 5437-5448.
- [16] Wang D J, Gu T B, Zhang K R. Fault tolerant control of 4-wheel independent drive vehicle subject to actuator faults based on feasible region[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(2): 1652-1666.
- [17] Wang D J, Qu Z, Ding J N. Tire force distribution method with the constraints of executable drive space consideration[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 11427-11439.
- [18] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [19] 程晶晶. 考虑输入受限的车辆稳定鲁棒控制研究[D]. 长春: 吉林大学通信工程学院, 2022.
Cheng Jing-jing. Research on vehicle robust stability control considering input constraints[D]. Chang Chun: College of Communication Engineering, Jilin University, 2022.