

引文格式：

肖程欢, 廉玉波, 廖银生, 等. 基于模型预测的侧风稳定性主动前轮转向控制研究 [J]. 集成技术, 2023, 12(4): 54-63.  
 Xiao CH, Lian YB, Liao YS, et al. Research on crosswind stability control by active front-wheel steering based on model predictive control [J]. Journal of Integration Technology, 2023, 12(4): 54-63.

## 基于模型预测的侧风稳定性主动前轮转向控制研究

肖程欢<sup>\*</sup> 廉玉波 廖银生 童云春 王 鑫

(比亚迪汽车工业有限公司 深圳 518118)

**摘要** 受侧风影响, 高速行驶的车辆易偏离预定行驶轨迹, 增加驾驶员“误操作”的风险, 存在较大安全隐患, 为此, 该文开展了车辆侧风稳定性主动控制研究。该研究通过建立附加气动力作用的三自由度整车动力学模型, 设计主动前轮转向的车辆侧风稳定性模型预测控制器, 并搭建 Simulink-CarSim 联合仿真平台进行验证分析。结果表明, 在单向侧风工况和交变侧风工况下, 带侧风稳定控制的车辆最大侧向偏移量为 0.01 m, 远低于无控制时的偏移量; 横摆角速度平台值保持在“0”左右, 横摆角速度峰值最高降低了 80%, 极大地提高了车辆的侧风稳定性。

**关键词** 侧风稳定性; 模型预测控制; 主动前轮转向; 动力学模型

中图分类号 U 461.6 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20221123001

## Research on Crosswind Stability Control by Active Front-Wheel Steering Based on Model Predictive Control

XIAO Chenghuan<sup>\*</sup> LIAN Yubo LIAO Yinsheng TONG Yunchun WANG Xin

(BYD Automobile Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

\*Corresponding Author: xiaochenghuan2016@163.com

**Abstract** Affected by crosswind, vehicles under high speed are liable to deviate from the expected trajectory, which would cause higher risk of misoperation of the driver and considerable safety hazard. For the consideration of the above situation, the investigation of active control of the vehicle crosswind stability was conducted. In this research, a 3 degrees of freedom vehicle dynamic with aerodynamic force simulation model was established, a prediction controller of the vehicle crosswind stability of an active front-wheel steering vehicle was designed, and a Simulink-CarSim co-simulation platform was built for validation analysis. Results reveal that, under the working condition of unidirectional and multi-directional, the vehicle with crosswind stability controller possesses the biggest deviation value of 0.01 m, which is extremely lower than the value obtained from the vehicle without

收稿日期: 2022-11-23 修回日期: 2023-02-28

作者简介: 肖程欢(通讯作者), 博士, 研究方向为汽车动力学仿真与控制, E-mail: xiaochenghuan2016@163.com; 廉玉波, 高级工程师, 研究方向为电动汽车动力系统及整车集成; 廖银生, 高级工程师, 研究方向为汽车底盘技术; 童云春, 中级工程师, 研究方向为整车动力学性能开发; 王鑫, 中级工程师, 研究方向为整车动力学性能开发。

crosswind stability controller while the platform value of yaw velocity is kept around zero, and the peak value of which is reduced by 80%, which means the crosswind stability was remarkably raised.

**Keywords** crosswind stability; model predictive control; active front-wheel steering; dynamic model

## 1 引言

车辆在高速公路或大跨度桥梁上高速行驶时, 在连续侧风或阵风的作用下, 易偏离行驶方向, 甚至造成横摆失稳<sup>[1]</sup>; 此外, 车身的突然晃动或“失控感”易导致驾驶员心理恐慌, 增加驾驶员“误操作”的风险<sup>[2-3]</sup>。

车辆在侧风环境下高速行驶时, 由空气动力学效应产生的气动侧向力和气动横摆力矩是影响汽车侧风稳定性的关键<sup>[4-5]</sup>。研究表明, 调整前轮转角可有效抵消气动侧向力和气动横摆力矩的影响<sup>[6]</sup>。El-Nashar 等<sup>[7]</sup>提出一种基于卡尔曼滤波算法的四轮转向控制策略, 用于提升车辆的侧风稳定性, 控制效果较好。杨易等<sup>[8]</sup>通过比例积分微分(PID)控制车辆的前轮转角, 并引入差动制动技术, 以提高车辆的侧风稳定性。敖德根等<sup>[9]</sup>在研究汽车侧风稳定性时, 发现正向助力转向偏移过大, 基于此建立了电动助力转向技术的自适应滑模算法控制策略。梁宝钰等<sup>[10]</sup>利用滑模控制和直接横摆力矩控制, 提升了高速车辆的侧风稳定性。李斌<sup>[11]</sup>基于后轮主动转向技术, 设计了后轮主动转向汽车自抗扰控制器, 并通过仿真实验, 验证了该控制器在侧风条件下行驶的稳定性。近几年, 随着无人驾驶技术的发展, 模型预测控制(model predictive control, MPC)得到了越来越多的应用<sup>[12-13]</sup>。MPC 可基于动力学模型预测车辆未来时刻的运动状态, 并通过优化算法进行超前干预控制; 此外, MPC 还可在控制过程中添加动力学和运动学约束条件, 在智能车辆控制领域具有

较大的应用优势<sup>[14-15]</sup>。搭建侧风稳定性的 MPC 策略需建立侧风作用力/力矩的动力学方程, 并进一步推导其状态空间表达式。而侧风作用力/力矩随气动滑移角(与车身姿态有关)实时变化, 二者相互耦合, 增加了该算法在侧风稳定性领域的应用难度。为了将耦合变化的侧风作用力/力矩应用于 MPC 策略, 熊剑波等<sup>[16]</sup>搭建了多体动力学和计算流体力学的耦合仿真平台, 并基于模型预测控制方法建立了主动前轮转向的侧风稳定性控制器, 用于改善车辆的侧风稳定性。

虽然计算流体力学耦合仿真平台能准确得到不同车身姿态下的气动力, 但气动力的计算效率较低, 不利于控制策略的快速迭代验证。因此, 本文基于 CarSim 和 Simulink 的快速联合仿真平台, 建立了侧风作用力/力矩耦合作用下的车辆三自由度动力学模型, 并在此基础上推导了侧风作用下的动力学状态空间表达式, 进一步设计了主动前轮转向的侧风稳定性 MPC 器。该控制器可通过主动前轮转向抵消侧风产生的气动侧向力和气动横摆力矩, 使车辆保持预定轨迹行驶, 提高车辆的侧风稳定性。

## 2 车辆动力学模型

侧风作用下, 车辆在横向、纵向和横摆方向的三自由度动力学模型如图 1 所示。其中,  $XOY$  为全局坐标系,  $CG$  为车辆的质心,  $CP$  为车辆的风压中心。由于  $CG$  与  $CP$  一般不重合, 因此, 侧风的侧向作用力在质心  $CG$  处具有等效的横摆力矩  $M_{zair}$ , 使车辆产生横摆运动。 $v_1$  为实际车

速,  $v_{air}$  为侧风风速, 假设侧风方向垂直于车辆纵向, 则流经车身空气的合成风速为  $v_{air\_car}$ 。

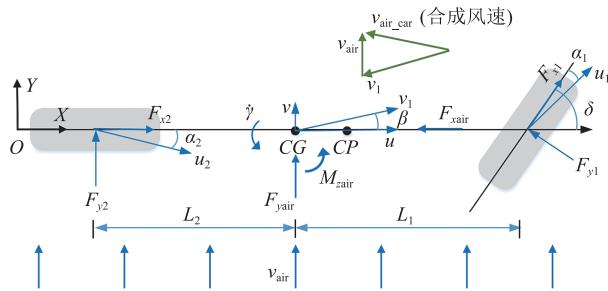


图 1 三自由度车辆模型

Fig. 1 Vehicle model with three degrees of freedom

假设车辆的前轮转角  $\delta$  和质心侧偏角  $\beta$  较小, 可近似  $\sin \delta=0$  和  $\cos \delta=1$ 。车辆横向、纵向和横摆方向的动力学方程如公式(1)~(5)所示。

$$ma_y = F_{y1} + F_{y2} + F_{yair} \quad (1)$$

$$ma_x = F_{x1} + F_{x2} - F_{xair} \quad (2)$$

$$I_z \ddot{\gamma} = F_{y1}L_1 - F_{y2}L_2 + M_{zair} \quad (3)$$

$$a_y = \dot{v} + u\dot{\gamma} \quad (4)$$

$$a_x = \dot{u} - v\dot{\gamma} \quad (5)$$

其中,  $m$  为整车质量的转动惯量;  $I_z$  为整车绕  $Z$  轴的转动惯量;  $u$  为车辆质心处的纵向车速;  $v$  为车辆质心处的横向车速;  $\gamma$  为车辆质心处的横摆角度;  $F_{x1}$  为车辆前轴的纵向力;  $F_{y1}$  为车辆前轴的侧向力;  $F_{x2}$  为车辆后轴的纵向力;  $F_{y2}$  为车辆后轴的侧向力;  $F_{xair}$  为车辆质心处所受的气动阻力;  $F_{yair}$  为车辆质心处所受的气动侧向力;  $M_{zair}$  为车辆质心处所受的气动横摆力矩;  $L_1$  为质心到前轴的距离;  $L_2$  为质心到后轴的距离。

当车辆的前后轮胎侧偏角较小时, 可将前后轴的轮胎力模型简化为线性轮胎模型, 满足:

$$F_{y1} = 2C_{cl} \left( \delta - \frac{v + L_1 \dot{\gamma}}{u} \right) \quad (6)$$

$$F_{y2} = 2C_{c2} \frac{L_2 \dot{\gamma} - v}{u} \quad (7)$$

$$F_{x1} = 2C_{ll} S_1 \quad (8)$$

$$F_{x2} = 2C_{l2} S_2 \quad (9)$$

其中,  $C_{cl}$  为前轮的侧偏刚度;  $C_{c2}$  为后轮的侧偏刚度;  $C_{ll}$  为前轮的纵向刚度;  $C_{l2}$  为后轮的纵向刚度;  $S_1$  为前轮的滑移率;  $S_2$  为后轮的滑移率。

此外, 在全局坐标系  $XOY$  中, 整车质心的运动学方程可表示为:

$$\dot{X} = u \cos \gamma - v \sin \gamma \quad (10)$$

$$\dot{Y} = u \sin \gamma + v \cos \gamma \quad (11)$$

其中,  $X$  为整车质心在全局坐标系中的纵向位移;  $Y$  为整车质心在全局坐标系中的侧向位移。

假设侧风区的风向与车辆的行驶方向呈  $90^\circ$  夹角, 风速为  $v_{air}$ , 车辆在侧风区的行驶车速为  $v_1$ , 那么流经车身表面的合成风速为  $v_{air\_car}$ , 在质心侧偏角较小的情况下, 可将合成风速  $v_{air\_car}$  近似表达为:

$$v_{air\_car}^2 = u^2 + v_{air}^2 \quad (12)$$

整车所受的气动力可表示如下:

$$F_{yair} = \frac{1}{2} \rho (u^2 + v_{air}^2) \cdot C_{yair} \cdot M \quad (13)$$

$$F_{xair} = \frac{1}{2} \rho (u^2 + v_{air}^2) \cdot C_{xair} \cdot M \quad (14)$$

$$M_{zair} = \frac{1}{2} \rho (u^2 + v_{air}^2) \cdot C_{zair} \cdot M \cdot (L_1 + L_2) \quad (15)$$

其中,  $\rho$  为空气密度, 取值  $1.206 \text{ kg/m}^3$ ;  $M$  为车辆纵向投影面积;  $C_{yair}$  为气动侧向力系数;  $C_{xair}$  为气动阻力系数;  $C_{zair}$  为气动横摆力矩系数。

经实验测试, 该动力学模型在线性稳定的工况下, 质心横向位移  $Y$  和横摆角度  $\gamma$  具有较高的计算精度, 可用于较高车速下的模型预测控制器设计<sup>[17-19]</sup>。

### 3 模型预测控制器设计

#### 3.1 控制器总体结构

基于 MPC 算法的侧风稳定性主动控制器, 可在车辆驶入侧风区时主动保持车辆直线行驶, 无须驾驶员调整干涉, 从而提升驾驶安全性和驾

乘舒适性。其核心思想在于: 以保持直线行驶的期望动力学状态为参考状态, 根据车辆所受的气动阻力、气动侧向力和气动横摆力矩, 由车辆动力学模型预测状态空间, 利用决策层目标函数求得最优解, 得到所需的前轮转角控制序列, 从而实现控制目标。该控制器的控制逻辑如图 2 所示。

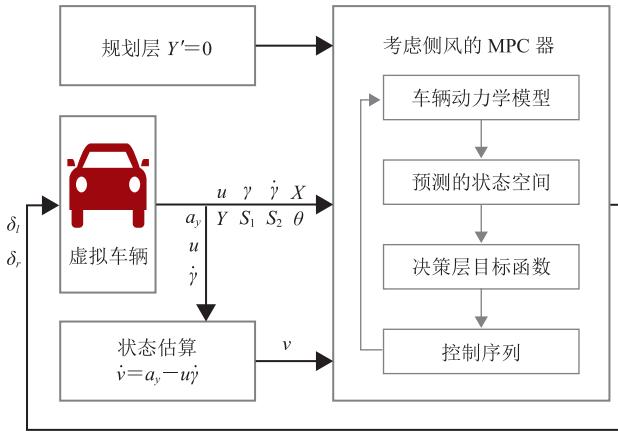


图 2 控制器总体结构

Fig. 2 Overall structure of controller

### 3.2 考虑侧风的决策层 MPC 算法

由公式(1)~(15)可进一步得到考虑侧风的状态空间表达式:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{B}u' \quad (16)$$

其中,  $\boldsymbol{\varepsilon} = [v \ u \ \gamma \ \dot{\gamma} \ Y \ X]^T$ ;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-2(C_{cl} + C_{c2})}{mu} & -\dot{\gamma} + \frac{2C_{cl}(v + L_1\dot{\gamma}) + 2C_{c2}(v - L_2\dot{\gamma})}{mu^2} + \frac{\rho u C_{yair} M}{m} & 0 & -u + \frac{2(L_2 C_{c2} - L_1 C_{cl})}{mu} & 0 & 0 \\ \dot{\gamma} - \frac{2C_{cl}\delta}{mu} & \frac{2C_{cl}\delta(v + L_1\dot{\gamma})}{mu^2} - \frac{\rho u C_{xair} M}{m} & 0 & v - \frac{2L_1 C_{cl}\delta}{mu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{2(L_2 C_{c2} - L_1 C_{cl})}{I_z u} & \frac{2L_1 C_{cl}(v + L_1\dot{\gamma}) - 2L_2 C_{c2}(v - L_2\dot{\gamma})}{I_z u^2} + \frac{\rho u C_{Mz} M (L_1 + L_2)}{I_z} & 0 & -2(L_1^2 C_{cl} + L_2^2 C_{c2}) & 0 & 0 \\ \cos \gamma & \sin \gamma & u \cos \gamma - v \sin \gamma & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & -v \cos \gamma - u \sin \gamma & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{2C_{cl}}{m} & \frac{2C_{cl}\left(2\delta - \frac{v + L_1\dot{\gamma}}{u}\right)}{m} & 0 & \frac{2L_1 C_{cl}}{I_z} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad u' = \delta.$$

令参考状态  $\boldsymbol{\varepsilon}_r = [v_r \ u_r \ \gamma_r \ \dot{\gamma}_r \ Y_r \ X_r]^T$ , 则状态偏差  $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_r$ , 控制偏差  $\tilde{u} = u' - u'_r$ , 公式(16)可进一步表示为公式(17)。

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}} = \mathbf{A}\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{B}\tilde{u} \quad (17)$$

采用一阶向前差分方法进行离散化处理, 可得到离散的状态空间表达式如公式(18)所示。

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(k+1) = \mathbf{A}_k \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(k) + \mathbf{B}_k \tilde{u}(k) \quad (18)$$

其中,  $\mathbf{A}_k = \mathbf{I} + T_s \mathbf{A}$ ;  $\mathbf{B}_k = T_s \mathbf{B}$ ;  $\mathbf{I}$  为单位向量;  $T_s$  为采样周期。

决策层目标函数可进一步定义为:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}(k)] &= \frac{1}{2} \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}(k)^T \mathbf{H} \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}(k) + \mathbf{f}(k)^T \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}(k)^T + \mathbf{d}(k) \\ \text{s.t.} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} u_{\min}(k) - u'_r(k) &\leq \tilde{u}(k) \leq u_{\max}(k) - u'_r(k) \\ &\vdots \\ u_{\min}(k+N_c-1) - u'_r(k+N_c-1) &\leq \tilde{u}(k+N_c-1) \leq u_{\max}(k+N_c-1) - u'_r(k+N_c-1) \end{aligned}$$

$$\text{其中, } \mathbf{H} = 2(\bar{\mathbf{B}}^T \bar{\mathbf{Q}} \bar{\mathbf{B}} + \bar{\mathbf{R}}); \quad \mathbf{f}(k) = \bar{\mathbf{B}}^T \bar{\mathbf{Q}} \bar{\mathbf{A}} \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(k);$$

$$\mathbf{d}(k) = 2\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(k)^T \bar{\mathbf{A}}^T \bar{\mathbf{Q}} \bar{\mathbf{A}} \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(k); \quad \bar{\mathbf{Q}} = \text{diag}(\mathbf{Q}, \dots, \mathbf{Q});$$

$$\bar{\mathbf{R}} = \text{diag}(\mathbf{R}, \dots, \mathbf{R});$$

$$\hat{\mathbf{u}}_{\min}(k) = [u_{\min}(k), \dots, u_{\min}(k+N_c-1)]^T;$$

$$\hat{\mathbf{u}}_{\max}(k) = [u_{\max}(k), \dots, u_{\max}(k+N_c-1)]^T;$$

$$\hat{\mathbf{u}}_r(k) = [u_r(k), \dots, u_r(k+N_c-1)]^T;$$

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}(k) = [\tilde{u}(k), \dots, \tilde{u}(k+N_c-1)]^T;$$

$$\bar{A} = \left[ A^T, \dots, (A^{N_c})^T, \dots, (A^{N_p})^T \right];$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} B & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ AB & B & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ A^{N_c-1}B & A^{N_c-2}B & \cdots & AB & B \\ A^{N_c}B & A^{N_c-1}B & \cdots & A^2B & AB \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ A^{N_p-1}B & A^{N_p-2}B & \cdots & A^{N_p-N_c-1}B & A^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}.$$

其中,  $\mathbf{Q}$  为状态变量的权重系数矩阵;  $\mathbf{R}$  为控制变量的权重系数矩阵;  $N_p$  为预测步长;  $N_c$  为控制步长;  $u_{\min}$  为控制变量  $u'$  的最小值;  $u_{\max}$  为控制变量  $u'$  的最大值。

如公式(18)~(19)所示, 在  $k$  时刻可得到控制时域  $[k, k+N_p]$  的状态序列, 从而优化计算得到控制时域  $[k, k+N_c]$  的控制序列,  $k+1$  时刻重复上述预测优化过程, 如此滚动即可完成控制优化问题。

## 4 仿真验证及分析

### 4.1 验证环境

为验证该算法的有效性, 本文利用 CarSim 建立某车的动力学模型, 结合 Matlab/Simulink 搭建的模型预测控制器进行联合仿真。验证环境具体如下: 车辆以 100 km/h 的车速直线行驶进入侧风区, 设置两种不同的侧风型式, 即单向侧风和双向交变侧风; 侧风风速为 20 m/s, 达到 8 级风速的标准, 两种不同侧风工况输入如图 3 所示; 设置路面附着系数为 1, 所选车辆参数如表 1 所示。

此外, 在不同的气动滑移角  $\theta$  下, 车体受到不同的气动力作用。该车型的空气动力学相关气动力系数与气动滑移角度  $\theta$  存在如下关系:

$$C_{yair} = 0.5 \times \sin \theta \quad (20)$$

$$C_{M_z} = 0.05 \times \sin \theta \quad (21)$$

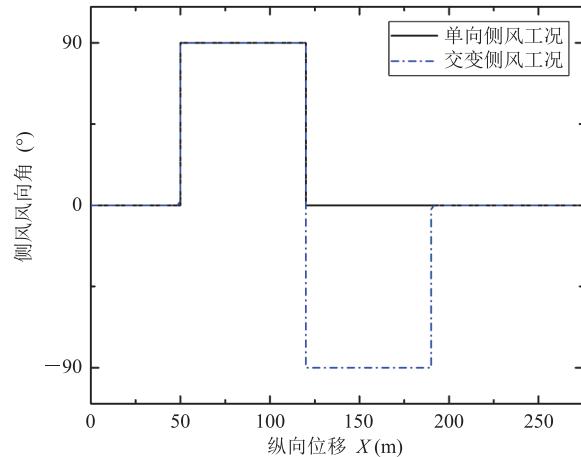


图 3 不同工况的侧风分布

Fig. 3 Crosswind distribution under different conditions

表 1 车辆参数

Table 1 Vehicle parameters

参数	数值	参数	数值
整车质量 $m$ (kg)	1 830	前轮侧偏刚度 $C_{c1}$ (N/rad)	66 900
横摆转动惯量 $I_z$ (kg·m <sup>2</sup> )	3 234	后轮侧偏刚度 $C_{c2}$ (N/rad)	62 700
质心到前轴距离 $L_1$ (m)	1.40	前轮纵向刚度 $C_{l1}$ (N/rad)	66 900
质心到后轴距离 $L_2$ (m)	1.65	后轮纵向刚度 $C_{l2}$ (N/rad)	62 700
整车纵向投影面积 $M$ (m <sup>2</sup> )	2.8	空气密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.206

$$C_{xair} = \begin{cases} 0.3 + 0.03 \times \sin(4|\theta|), & |\theta| \leq \frac{\pi}{8} \\ 0.33 \times \sin\left(\frac{4}{3}|\theta| - \frac{\pi}{6}\right), & \frac{\pi}{8} < |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (22)$$

### 4.2 仿真结果讨论

在单向侧风工况下, 车辆以 100 km/h 的车速驶入侧风风速为 20 m/s 的侧风区, 带 MPC 和不带控制时, 车辆所受的气动阻力、气动侧向力和气动横摆力矩如图 4 所示。MPC 虽然会使车辆的行驶姿态尽量保持初始状态(行驶方向与风向角保持 90°), 从而使车辆所受的气动力(图 4(a))和气动力矩(图 4(b))略大于不带控制时的受力状态, 但这种差异很小, 基本可忽略。

图 5(a)为单向侧风工况下, 带 MPC 车辆与不带控制车辆的行驶轨迹对比图, 其中, 侧风区的起点为  $X=50$  m, 止点为  $X=120$  m。当车辆不带控制时(方向盘转角固定 0 输入), 受气动侧向

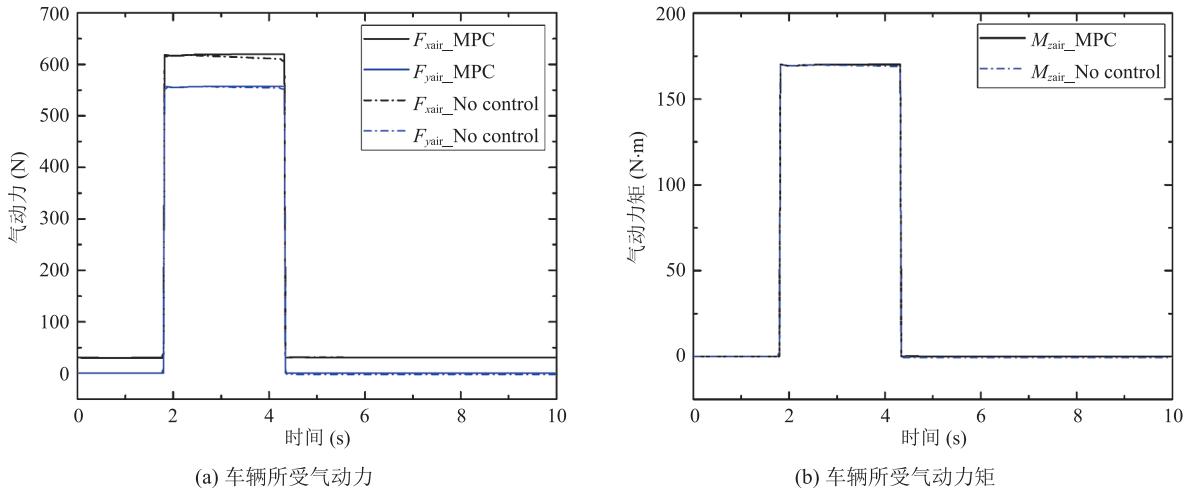


图 4 单向侧风工况下的气动力和气动力矩

Fig. 4 Aerodynamic force and moment under one-way crosswind condition

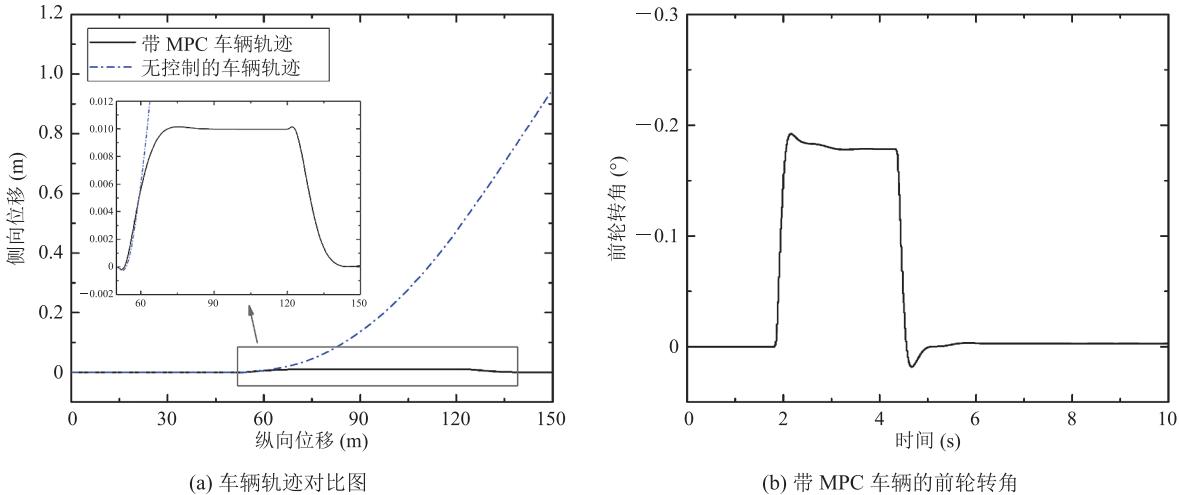


图 5 单向侧风工况下的车辆行驶轨迹及前轮转角

Fig. 5 Vehicle driving track and front wheel angle under one-way crosswind condition

力和气动横摆力矩的作用, 车辆不断向驾驶员左侧偏航, 使得车辆的侧向偏移距离逐渐增大。当  $X=90\text{ m}$  时, 侧向偏移为  $0.14\text{ m}$ , 而当  $X=120\text{ m}$  时, 侧向偏移为  $0.48\text{ m}$ , 因此, 车辆在强侧风区行驶时, 具有较大的行驶风险。采用 MPC 后, 车辆的侧向偏移在  $0.01\text{ m}$  左右, 远低于无控制时产生的侧向偏移, 这表明本文的 MPC 器可有效增强车辆在侧风区的行驶安全。图 5(b)为单向侧风工况下, 带 MPC 车辆的前轮转角, 最大转角为  $0.2^\circ$ , 整体数值较小, 角度变化较平顺。

图 6(a)为单向侧风工况下, 带 MPC 车辆与不带控制车辆的横摆角速度变化。当无控制的车辆进入侧风区时, 受侧风的作用产生横摆力矩, 进而产生一个瞬态的横摆角速度第一峰值(约  $1.0^\circ/\text{s}$ ), 随后维持在一个较稳定的平台值(约  $0.83^\circ/\text{s}$ ), 如图 6(a)中“无控制”曲线所示。同理, 当车辆离开侧风区时, 也会产生一个瞬态的驶出峰值(约  $-0.16^\circ/\text{s}$ )。当车辆带 MPC 时, 进入侧风区的横摆角速度第一峰值降至  $0.2^\circ/\text{s}$ , 降低了  $80\%$ , 平台值则变成了“0”, 横摆角速度驶出

峰值略微增加至 $-0.2^{\circ}/\text{s}$ 。整体而言，MPC 器可有效降低车辆的横摆角速度，因此，该控制器具有良好的侧风稳定控制效果。

图 6(b)为单向侧风工况下，带 MPC 车辆与不带控制车辆的侧向加速度变化。由图 6(b)可知，车辆进入侧风区后，侧向加速度平台值由 $0.04 g$ 降为 0，效果显著。驶出侧风区后，侧向加速度存在一个瞬间的“回弹”，无控制车辆回复至 $0.01 g$ ，而施加 MPC 的车辆回复至 $-0.03 g$ 左右，二者的绝对数值均很小，对车内乘员舒适性

和车辆稳定性的影响可忽略。

对车辆进入双向交变侧风区的行驶状态进行分析。车辆以 $100 \text{ km/h}$ 的车速驶入侧风风速为 $\pm 72 \text{ km/h}$ 的交变侧风区，带 MPC 和不带控制时车辆所受的气动阻力、气动侧向力和气动横摆力矩如图 7 所示。由图 7 可知，带 MPC 和不带控制时车辆所受的气动力(图 7(a))和气动力矩(图 7(b))存在一定的差异，这种差异很小，基本可忽略。

图 8(a)为交变侧风工况下，带 MPC 车辆与

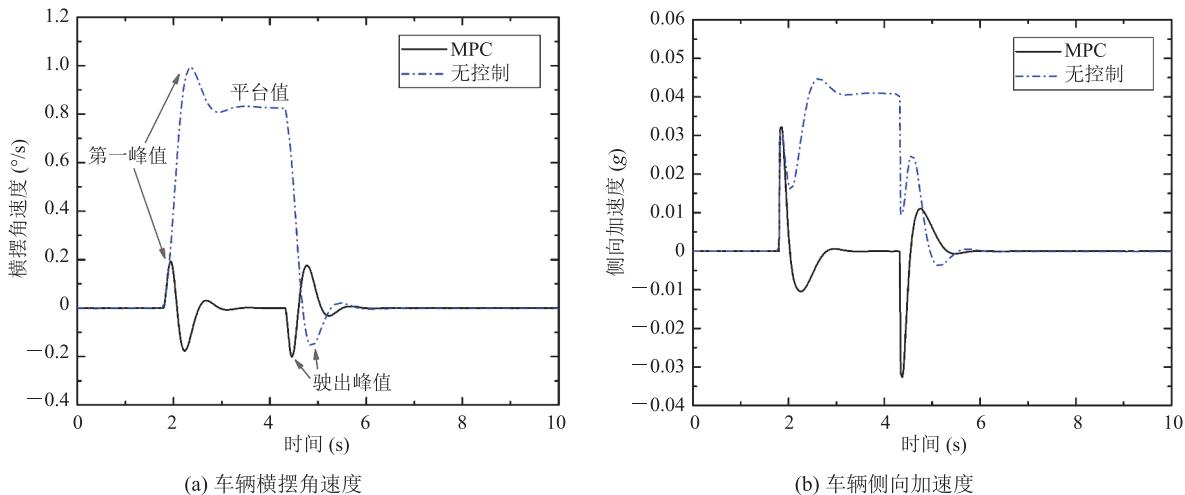


图 6 单向侧风工况下的横摆角速度和侧向加速度

Fig. 6 Yaw rate and lateral acceleration under one-way crosswind condition

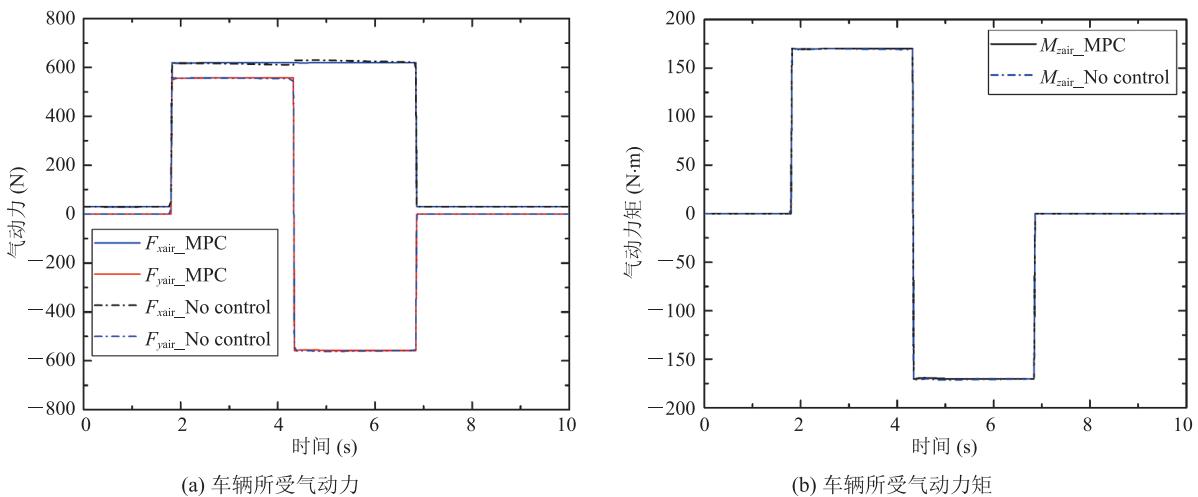


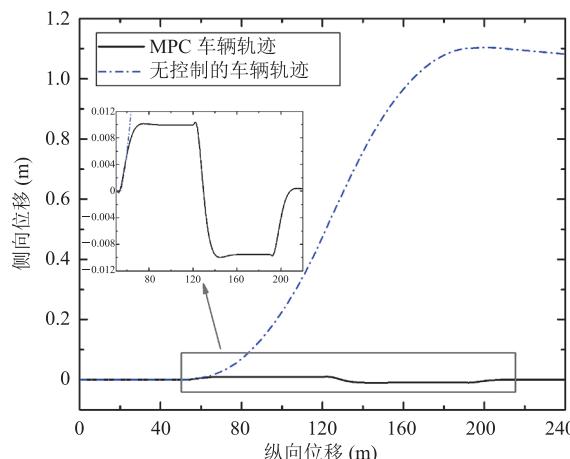
图 7 交变侧风工况下的气动力和气动力矩

Fig. 7 Aerodynamic force and moment under alternating crosswind condition

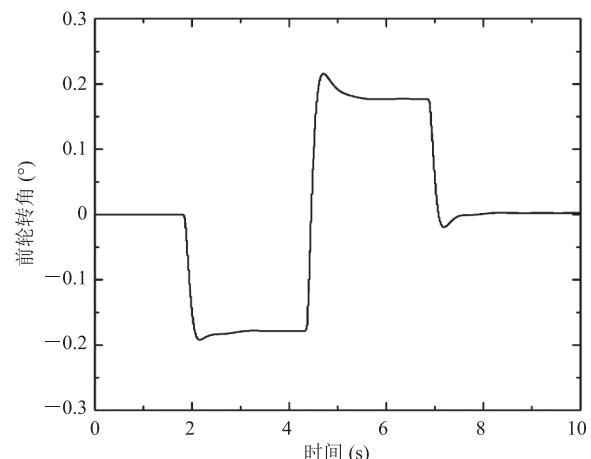
不带控制车辆的行驶轨迹对比图。当车辆不带控制时(方向盘转角固定0输入), 车辆在气动侧向力和气动横摆力矩的作用下, 不断向驾驶员左侧偏航, 这使得车辆的侧向偏移距离逐渐增大。当离开第一侧风区时( $X=120\text{ m}$ ), 侧向偏移达到 $0.48\text{ m}$ ; 当离开第二侧风区时, 侧向偏移达到 $1.1\text{ m}$ , 交变侧风使车辆往左侧偏航的趋势逐渐缓慢。采用MPC后, 车辆的侧向偏移有效减小, 侧向偏移整体在 $\pm 0.01\text{ m}$ 左右, 极大地增强了车辆在交变侧风区的行驶安全性。图8(b)为双向交

变侧风工况下, 带MPC车辆的前轮转角, 最大转角维持在 $\pm 0.2^\circ$ 左右, 整体数值较小, 角度变化较平顺。

图9(a)为交变侧风工况下, 带MPC车辆与不带控制车辆的横摆角速度变化。当车辆进入第一侧风区时, 受侧风影响产生横摆力矩, 因此, 横摆角速度产生第一峰值(约 $1.0^\circ/\text{s}$ ), 随后维持一个较稳定的平台值(约 $0.83^\circ/\text{s}$ ); 当车辆驶入第二侧风区时, 横摆角速度产生第二峰值(约 $-1.2^\circ/\text{s}$ ), 随后维持一个较稳定的平台值(约



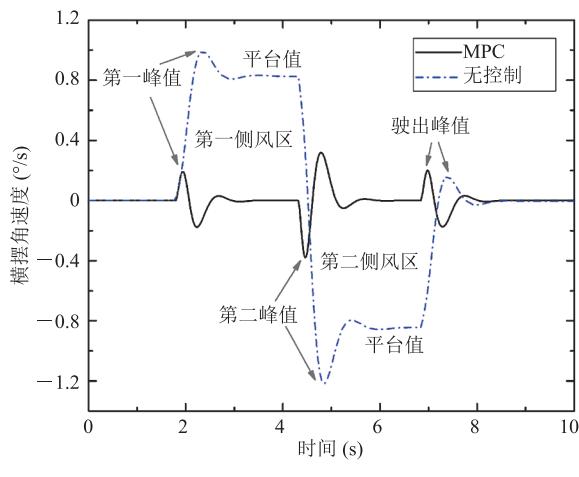
(a) 车辆行驶轨迹



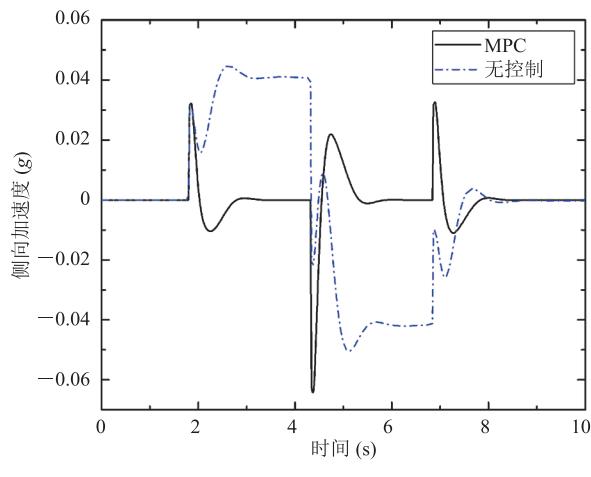
(b) MPC 车辆的前轮转角

图8 交变侧风工况下车辆行驶轨迹及前轮转角

Fig. 8 Vehicle driving track and front wheel angle under alternating crosswind condition



(a) 车辆横摆角速度



(b) 车辆侧向加速度

图9 交变侧风工况下的横摆角速度和侧向加速度

Fig. 9 Yaw rate and lateral acceleration under alternating crosswind condition

$-0.84^{\circ}/s$ ), 驶出侧风区后的驶出峰值约为 $0.16^{\circ}/s$ , 如图9(a)中“无控制”曲线所示。车辆带MPC后, 进入第一侧风区的横摆角速度峰值(第一峰值)降至 $0.2^{\circ}/s$ , 降低了80%, 平台值则变成了“0”; 进入第二侧风区后, 横摆角速度峰值(第二峰值)降为 $-0.4^{\circ}/s$ , 降低66.7%, 而驶出峰值略微增加至 $0.2^{\circ}/s$ 。尽管驶出峰值略微增加, 但第一峰值、第二峰值和两个侧风区的平台值均显著下降, 这表明MPC对车身横摆的控制效果显著。

图9(b)为交变侧风工况下, 带MPC车辆与不带控制车辆的侧向加速度变化。由图9(b)可知, 车辆进入第一侧风区和第二侧风区后, 侧向加速度平台值由 $\pm 0.04 g$ 降为0, 效果显著。车辆驶入第二侧风区后, 侧向加速度存在瞬间的“反弹”, 无控制车辆瞬间至 $-0.02 g$ , 而施加MPC的车辆瞬间至 $-0.06 g$ 左右, 二者均处于较小的侧向加速度, 对车内乘员舒适性和车辆稳定性的影响可忽略。

## 5 结 论

为提高车辆在侧风区高速行驶的稳定性, 本文通过建立考虑气动力的车辆三自由度动力学模型, 推导状态空间表达式, 并进一步设计主动前轮转向的MPC器。由主动前轮转向产生的侧向力, 可抵消侧风产生的气动侧向力和气动横摆力矩, 使车辆保持在预定轨迹行驶, 提高了车辆的侧风稳定性, 并得到如下结论:

(1) 单向侧风工况下, 采用MPC时, 车辆的侧向偏移整体在 $0.01 m$ 左右, 远低于无控制时的 $0.48 m (X=120 m)$ ; 横摆角速度第一峰值由 $1.0^{\circ}/s$ 降至 $0.2^{\circ}/s$ , 降低了80%, 平台值则由 $0.83^{\circ}/s$ 变成了0; 侧向加速度的平台值由 $0.04 g$ 降为0, 控制效果明显。

(2) 交变侧风工况下, 采用MPC时, 车辆

的侧向偏移整体在 $\pm 0.01 m$ 左右, 远低于无控制时的 $0.48 m (X=120 m)$ 和 $1.1 m (X=190 m)$ ; 进入第一侧风区的横摆角速度峰值(第一峰值)由 $1.0^{\circ}/s$ 降至 $0.2^{\circ}/s$ , 降低80%; 进入第二侧风区的横摆角速度峰值(第二峰值)由 $-1.2^{\circ}/s$ 降为 $-0.4^{\circ}/s$ , 降低66.7%; 车辆的侧向加速度平台值由 $\pm 0.04 g$ 降为0, 具有很好的控制效果。

## 参 考 文 献

- [1] Schroeck D, Krantz W, Widdecke N, et al. Unsteady aerodynamic properties of a vehicle model and their effect on driver and vehicle under side wind conditions [J]. SAE International Journal of Passenger Cars Mechanical Systems, 2011, (1): 108-119.
- [2] Gajendra SM, Nagpurwala QH, Nassar A, et al. Numerical investigations on crosswind aerodynamics and its effect on the stability of a passenger car [C] // Proceedings of the SAE Technical Papers, 2009: 1-8.
- [3] Maruyama Y, Yamazaki F. Driving simulator experiment on the moving stability of an automobile under strong crosswind [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2006, 94(4): 191-205.
- [4] Hucho WH, Emmelmann HJ. Theoretical prediction of the aerodynamic derivatives of a vehicle in cross wind gusts [J]. SAE Transactions, 1973, 82: 892-900.
- [5] Klein RH, Hogue JR. Effects of crosswinds on vehicle response—full-scale tests and analytical predictions [J]. Society of Automotive Engineers Preprint, 1980, 89(3): 2578-2590.
- [6] Tran VT. Crosswind feedforward control—a measure to improve vehicle crosswind behavior [J]. Vehicle System Dynamics, 1994, 23(1): 165-209.
- [7] El-Nashar MA, Abdelhady MB, Oraby WA, et al. Enhanced vehicle lateral in crosswind by limited state Kalman filter four wheel steering system [C] // Proceedings of the SAE World Congress & Exhibition, 2007: 1-15.

- [8] 杨易, 秦小飞, 徐永康, 等. 基于 AFS 与 DYC 的车辆侧风稳定性控制研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 14-19.  
Yang Y, Qin XF, Xu YK, et al. Study of vehicle crosswind stability control based on AFS and DYC [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(5): 14-19.
- [9] 敖德根, 米根锁. 自适应滑模控制器的 EPS 侧风反向控制研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(1): 103-108.  
Ao DG, Mi GS. Study on reverse control of EPS based on adaptive sliding mode controller under crosswind [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(1): 103-108.
- [10] 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 BY, Wang YP, Liu X, et al. Study on crosswind stability control of high-speed vehicle based on sliding model theory [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1): 123-130.
- [11] 李斌. 基于后轮主动转向系统高速汽车侧风稳定性研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2015.  
Li B. Research on crosswind stability of high speed vehicle based on rear wheel active steering system [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2015.
- [12] 陈虹. 模型预测控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 32-76.  
Chen H. Model predictive control [M]. Beijing: Science Press, 2013: 32-76.
- [13] Hrovat D, Cairano SD, Tseng HE, et al. The development of model predictive control in automotive industry: a survey [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, 2012: 295-302.
- [14] 张世义, 顾小川, 唐爽, 等. 采用变时域模型预测的车辆路径跟踪控制方法 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 141-149.  
Zhang SY, Gu XC, Tang S, et al. Vehicle path tracking control method using varying horizon of model predictive control [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2021, 42(2): 141-149.
- [15] 李绍松, 郭孔辉, 仇韬, 等. 极限工况下主动前轮转向汽车稳定性控制 [J]. 汽车工程, 2020, 42(2): 191-198.  
Li SS, Guo KH, Qiu T, et al. Stability control of vehicle with active front steering under extreme conditions [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(2): 191-198.
- [16] 熊剑波, 汪怡平, 张倩文, 等. 基于模型预测控制的汽车侧风稳定性研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(2): 36-43.  
Xiong JB, Wang YP, Zhang QW, et al. Cross-wind stability of high-speed vehicle based on model predictive control [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 44(2): 36-43.
- [17] 龚建伟, 刘凯, 齐建永. 无人驾驶车辆模型预测控制 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2020: 116-146.  
Gong JW, Liu K, Qi JY. Model predictive control for self-driving vehicles [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2020: 116-146.
- [18] Falcone P, Borrelli F, Tseng HE, et al. Linear time-varying model predictive control and its application to active steering systems: stability analysis and experimental validation [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2007, 18(8): 862-875.
- [19] Falcone P, Borrelli F, Asgari J, et al. Predictive active steering control for autonomous vehicle systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(3): 566-580.