

基于自适应模型预测控制的高速行驶工况下 车辆轨迹跟踪控制

徐伟瑞

(重庆交通大学, 重庆 400074)

【摘要】为保证智能车辆在不同附着系数路面上高速行驶时轨迹跟踪的精度和操纵稳定性,利用自适应模型预测控制(AMPC)方法对轮胎侧偏刚度进行在线估算并对高速行驶工况下的车辆动力学模型参数进行实时更新,采用不定步长(NFS)离散化方法延长预测时域,同时将滑移稳定性约束加入目标函数,从而在高速行驶工况下保持较高的稳定性和控制实时性。CarSim与MATLAB/Simulink联合仿真结果表明,所提出的方法可提高高速工况下车辆在不同附着系数路面上行驶时的操纵稳定性,并获得较高的控制精度。

关键词: 高速行驶 自适应模型预测控制 不定步长 轨迹跟踪

中图分类号: U461.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230297

Vehicle Trajectory Tracking Control under High-Speed Driving Conditions Based on Adaptive Model Predictive Control

Xu Weirui

(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

【Abstract】In order to ensure the accuracy of trajectory tracking and maneuvering stability of intelligent vehicles at high speeds on roads with different coefficients of adhesion, the Adaptive Model Predictive Control (AMPC) method was used to estimate the tire cornering stiffness on-line and update the parameters of the vehicle dynamics model in real time under high-speed driving conditions, and the Non-Fixed Step (NFS) discrete method was used to prolong the prediction time domain while the slip stability constraints were added into the objective function, thus maintaining high stability and control in real time under high-speed driving conditions. The proposed method can improve the maneuvering stability and control accuracy when the vehicle is driving on the road with different adhesion coefficients under high-speed driving conditions, as shown in the joint simulation results of CarSim and MATLAB/Simulink.

Key words: High-speed driving, Adaptive Model Predictive Control (AMPC), Non-Fixed Step (NFS), Trajectory tracking

【引用格式】徐伟瑞. 基于自适应模型预测控制的高速行驶工况下车辆轨迹跟踪控制[J]. 汽车工程师, 2023(9): 21-28.

XU W R. Vehicle Trajectory Tracking Control under High-Speed Driving Conditions Based on Adaptive Model Predictive Control[J]. Automotive Engineer, 2023(9): 21-28.

1 前言

轨迹跟踪是智能车辆控制的核心技术之一。目前,智能汽车在轨迹跟踪过程中普遍存

在高速工况下跟踪精度降低的问题,严重时会发生侧偏、滑移,甚至引发事故^[1-2]。为提高车辆稳定性,将横摆角速度和侧偏角作为约束控制目标可以防止车辆失稳或者偏离行驶轨迹^[3]。

传统的模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)算法往往采用固定的预测步长,且无法对车辆侧偏刚度进行估计,车辆在中低速工况下进行轨迹跟踪时只考虑侧向位置偏差和横摆角偏差等即可满足跟踪精度要求,而车辆在高速工况下跟踪具有一定曲率的轨迹时,由于侧偏角较大,用于中低速轨迹跟踪的控制算法往往无法取得理想效果,反而可能带来侧偏、滑移、甩尾甚至侧翻等危险^[4]。

针对车辆高速行驶工况下的操纵稳定性和跟踪精度控制问题,研究人员提出了多种控制方法:王玉琼等^[5]以高速行驶时车辆航向角和侧向位置偏差趋近于零为控制目标,提出后轮侧偏角自抗扰控制算法,以提高车辆的稳定性;柳亚子等^[6]提出了基于轮胎侧向附着力实现前轮转角自适应的控制策略;路宏广等^[7]为实现车辆横、纵向综合跟踪控制,通过引入线性变参数模型来反映纵向速度对轨迹跟踪的影响,使预测模型自适应调节其参数,从而提高车辆跟踪性能;查云飞等^[8]提出基于横摆角速度稳态增益修正系数的单点预瞄模型和线性转向控制系统,以提高车辆行驶稳定性。上述文献采用不同算法对车辆轨迹跟踪问题进行研究,但均未考虑不同附着系数路面对跟踪精度和稳定性的影响以及如何应对高速工况下预测步长不足带来的风险问题。

本文基于车辆高速行驶工况,通过对轮胎侧偏刚度在线估算并实时更新控制器中的相关参数,同时采用不定步长(Non-Fixed Step, NFS)离散化方法设计多约束自适应模型预测控制(Adaptive Model Predictive Control, AMPC)算法,提高高速行驶工况下车辆在不同附着系数路面上行驶时的轨迹跟踪精度,并有效保证车辆的操纵稳定性。

2 智能车辆模型

本文通过控制车辆前轮转角实现轨迹跟踪。在不计空气动力学和车辆悬架影响的条件下,建立高速行驶时车辆三自由度动力学模型,如图1所示。其中, $o-xyz$ 为车身坐标系, $O-XYZ$ 为大地坐标系, $F_{lf,l}$ 、 $F_{lf,r}$ 、 $F_{lr,l}$ 、 $F_{lr,r}$ 、 $F_{cf,l}$ 、 $F_{cf,r}$ 、 $F_{cr,l}$ 、 $F_{cr,r}$ 分别为车辆左前轮、右前轮、左后轮、右后轮受到的纵向力和左前轮、右前轮、左后轮、右后轮受到的侧向力, a 、 b 、 c 分别为车辆质心与前、后轴的距离和半轴长度。

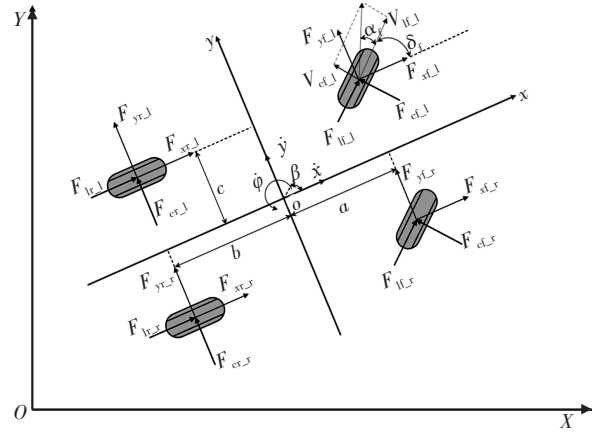


图1 车辆三自由度模型

车辆的动力学方程为:

$$\begin{cases} m(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\varphi}) = F_{xf,l} + F_{xf,r} + F_{xr,l} + F_{xr,r} \\ m(\ddot{y} - \dot{x}\dot{\varphi}) = F_{yf,l} + F_{yf,r} + F_{yr,l} + F_{yr,r} \\ I_z\ddot{\varphi} = a(F_{yf,l} + F_{yf,r}) - b(F_{yr,l} + F_{yr,r}) + \\ c(F_{xf,r} + F_{xr,r} - F_{xf,l} - F_{xr,l}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, m 为车辆质量; \ddot{x} 、 \dot{x} 分别为纵向加速度和纵向速度; \ddot{y} 、 \dot{y} 分别为横向加速度和横向速度; I_z 为车辆绕 Z 轴的转动惯量; $\ddot{\varphi}$ 、 $\dot{\varphi}$ 分别为横摆角加速度和横摆角速度; $F_{xf,l}$ 、 $F_{xf,r}$ 、 $F_{xr,l}$ 、 $F_{xr,r}$ 分别为车身坐标系下左前轮、右前轮、左后轮、右后轮受到的 x 方向的力; $F_{yf,l}$ 、 $F_{yf,r}$ 、 $F_{yr,l}$ 、 $F_{yr,r}$ 分别为车身坐标系下左前轮、右前轮、左后轮、右后轮受到的 y 方向的力。

轮胎纵向力和侧向力分别为:

$$\begin{cases} F_{lf,l} = F_{lf,r} = C_{lf}s_{lf} \\ F_{lr,l} = F_{lr,r} = C_{lr}s_{lr} \\ F_{cf,l} = F_{cf,r} = C_{cf}\alpha_f \\ F_{cr,l} = F_{cr,r} = C_{cr}\alpha_r \end{cases} \quad (2)$$

式中, C_{lf} 、 C_{lr} 分别为前、后轮的纵向刚度; C_{cf} 、 C_{cr} 分别为前、后轮的侧偏刚度; s_{lf} 、 s_{lr} 分别为前、后轮纵向滑移率; α_f 、 α_r 分别为前、后轮侧偏角。

车身坐标系与大地坐标系之间的运动学转换关系为:

$$\begin{cases} \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \\ \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \end{cases} \quad (3)$$

式中, \dot{X} 、 \dot{Y} 分别为车辆在大地坐标系 X 轴、 Y 轴方向的速度; φ 为横摆角。

前、后轮侧偏角为:

$$\begin{cases} \alpha_f = \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} - \delta_f \\ \alpha_r = \frac{\dot{y} - b\dot{\varphi}}{\dot{x}} \end{cases} \quad (4)$$

对车辆前轮转角作小角度假设,有:

$$\begin{cases} \cos \delta_f \approx 1 \\ \sin \delta_f \approx \delta_f \end{cases} \quad (5)$$

忽略前轮驱动力对车辆横摆运动的影响,则有:

$$(F_{lr,l} + F_{lr,r}) \sin \delta_f = 0 \quad (6)$$

得到车辆动力学模型为:

$$\begin{cases} \ddot{y} = \frac{2}{m} \left[C_{cf} \left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) + C_{cr} \times \frac{b\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right] - \dot{x}\dot{\varphi} \\ \ddot{x} = \frac{2}{m} \left[C_{lr} s_f + C_{lr} s_r - C_{cf} \left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) \delta_f \right] + \dot{y}\dot{\varphi} \\ \ddot{\varphi} = \frac{2}{I_z} \left[a C_{cf} \left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) - b C_{cr} \times \frac{b\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right] \end{cases} \quad (7)$$

车辆状态量 ξ 和控制量 u 分别为:

$$\begin{cases} \xi = [\dot{y}, \dot{x}, \varphi, \dot{\varphi}, Y, X]^T \\ u = [\delta_f] \end{cases} \quad (8)$$

式中, (X, Y) 为车辆在大地坐标系中的坐标。

3 自适应模型预测控制器

3.1 侧偏刚度估计

轮胎侧偏刚度对高速工况下车辆的操纵稳定性存在显著影响,作为反映车辆性能的核心参数之一,对其进行在线估算并实时反馈给车辆动力学模型,同时在控制器中进行实时更新,可以提高车辆对不同附着系数路面的适应性^[9]。张志达等^[10]通过横向加速度和横摆角速度对车轮横向力进行估算,将计算值与其估计值求差得到侧偏刚度影响系数,从而实现MPC参数的自适应;Dasol Jeong等^[11]采用双线性时变(Linear Time-Varying, LTV)卡尔曼滤波器估计侧偏刚度,提高了车辆控制精度。

轮胎侧偏角对汽车附着系数、滑移率、侧偏力等均有重要影响。由式(2)所知:当轮胎侧偏角处于小角度时,轮胎侧偏刚度对侧偏力的影响较大,轮胎侧偏力与侧偏角呈线性关系;当轮胎侧偏角较大,超过安全范围时,车辆载荷会向外偏移,轮胎与地面接触区域会偏向一侧,其转向特性受到影响,车辆操纵稳定性变差,会发生失稳甚至侧偏,并加重轮胎磨损,降低轮胎使用寿命。为保障汽车操纵稳定性和安全性,本文利用侧偏角、侧偏力和侧偏刚度的关系,采用带遗忘系数的递推最小二乘法(Recursive Least Square, RLS)对轮胎侧偏刚度进行估计,并实时更新车辆动力学模型中的参数,以实

现控制器中参数的自适应。

轮胎侧偏力和侧偏刚度的回归方程为:

$$Y_m(k) = \varphi^T(k) \Phi(k) + e(k) \quad (9)$$

式中, $Y_m(k)$ 为输出向量,即侧偏力; $\varphi(k)$ 为侧偏角回归向量; $\Phi(k)$ 为待估计的参数向量,即侧偏刚度; $e(k)$ 为噪声向量。

为使实际值与估计值的平方差最小,建立代价函数:

$$J = \sum_{i=1}^N \lambda_m^{N-i} [Y_m(i) - \varphi^T(i) \hat{\Phi}(i)]^2 \quad (10)$$

式中, λ_m 为遗忘系数; N 为对应观测数据长度; $\hat{\Phi}(i)$ 为模型参数估计值。

将 J 极小化,即对 $\hat{\Phi}(i)$ 求偏导,使其为0,在第 k 步可得:

$$\hat{\Phi}(k) = \left[\sum_{i=1}^k \lambda_m^{N-i} \varphi(i) \varphi^T(i) \right]^{-1} \left[\sum_{i=1}^k \lambda_m^{N-i} \varphi(i) Y_m(i) \right] \quad (11)$$

式(11)可表示为:

$$\hat{\Phi}(k) = P(k) B(k) \quad (12)$$

式中, $P(k) = \left[\sum_{i=1}^k \lambda_m^{N-i} \varphi(i) \varphi^T(i) \right]^{-1}$; $B(k) = \left[\sum_{i=1}^k \lambda_m^{N-i} \varphi(i) Y_m(i) \right]$ 。

设递推增益为:

$$K(k) = P(k) \varphi(k) \quad (13)$$

经计算可得侧偏刚度估计的RLS递推公式为:

$$\begin{cases} P(k) = \lambda_m^{-1} P(k-1) [E - K(k) \varphi^T(k)] \\ \hat{\Phi}(k) = \hat{\Phi}(k-1) + K(k) [Y_m(k) - \varphi^T(k) \hat{\Phi}(k-1)] \\ K(k) = P(k-1) \varphi(k) [\lambda_m + \varphi^T(k) P(k-1) \varphi(k)]^{-1} \end{cases} \quad (14)$$

式中, E 为单位矩阵。

3.2 预测模型及其约束

由式(3)、式(7)、式(8)可得车辆动力学线性状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A\xi + Bu \\ \eta = C\xi \end{cases} \quad (15)$$

式中, $A = \left(\frac{\partial \ddot{y}}{\partial \xi}, \frac{\partial \ddot{x}}{\partial \xi}, \frac{\partial \ddot{\varphi}}{\partial \xi}, \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial \xi}, \frac{\partial \dot{Y}}{\partial \xi}, \frac{\partial \dot{X}}{\partial \xi} \right)^T$; $B = \left(\frac{\partial \ddot{y}}{\partial \delta_f}, \frac{\partial \ddot{x}}{\partial \delta_f}, \frac{\partial \ddot{\varphi}}{\partial \delta_f}, \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial \delta_f}, \frac{\partial \dot{Y}}{\partial \delta_f}, \frac{\partial \dot{X}}{\partial \delta_f} \right)^T$; η 为输出向量; C 为输出矩阵。

要实现高速工况下跟踪控制的实时性与稳定性,一方面需要采用较高精度的动力学模型,另一

方面需要更长的预测距离来提前规避障碍危险。固定预测步长无法满足需求,本文采用不定步长的离散化方法^[12]调整 AMPC 的预测时域步长,增大预测距离,即将预测时域步长分为短步长 T_s 和长步长 T_l ,以保证车辆动力学线性模型离散化后的预测精度,获得 MPC 的理想控制效果。

常用的状态空间离散化方法有欧拉法和零阶保持法,为提高算法的控制精度和保证高稳定性,本文选取零阶保持法。在短步长阶段,即 $k=0,1,\dots,N_s$ 时,以 T_s 为预测步长,将连续线性化动力学状态空间通过 Z 变换进行离散化,以更精确地拟合原曲线。在长步长阶段,即 $k=N_s+1,\dots,N_p$ (其中 N_p 为预测时域)时,以 T_l 为预测步长,如图 2 所示,由于零阶保持法会使该预测周期范围内的控制量在较长步长内表现为常值,导致控制精度降低,如果在长步长时仍采用阶梯式的采样保持,误差会相对增大,因此在长步长阶段拟采用具有一定斜率的一阶保持法,使控制精度相对提升。

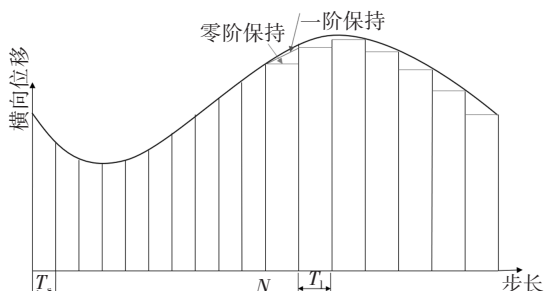


图2 不定步长离散化方法

离散后的动力学状态空间为:

$$\begin{cases} \xi(k+1) = \begin{bmatrix} A_s \\ A_l \end{bmatrix} \xi(k) + \begin{bmatrix} B_s \\ B_{l1} \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ B_{l2} \end{bmatrix} u(k+1) + \omega(k) \\ \eta(k) = C_d \xi(k) \end{cases} \quad (16)$$

式中, $A_s=I+T_s A$ 、 $A_l=I+T_l A$ 分别为短步长和长步长下的状态量矩阵; $B_s=T_s B$ 为短步长下的控制量矩阵; $B_{l1}=(T_l B+ABT_l^2)/2$ 、 $B_{l2}=T_l B/2$ 分别为长步长下的状态量矩阵和控制量矩阵; C_d 为输出矩阵; $\omega(k)$ 为噪声矩阵。

输出矩阵 C_d 输出横摆角和横向位移:

$$C_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.3 稳定性约束

为了分析高速行驶时车辆的稳定性,可通过建立包络线约束^[13]来描述车辆的操纵稳定性。如吴西涛等^[14]为探索车辆前轮转角与车辆稳定性的关系,建立了车辆横摆角速度与质心侧偏角的关系曲线。

由于高速行驶时基于横摆角速度-侧向速度的相平面能够很好地体现车辆的滑移、横摆和侧偏角特性,可通过控制车辆前轮主动转向来保证车辆的行驶稳定性。如图 3 所示,以包络线相平面限定车辆横摆角速度和横向速度控制极限,以保证车辆在各工况下行驶的极限稳定状态。

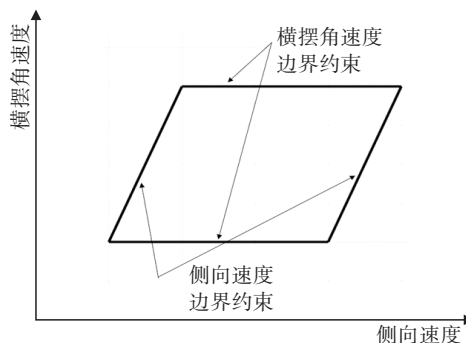


图3 稳定性包络线

为在保证操纵稳定性的前提下,实现较高精度的轨迹跟踪控制,需要车辆侧向位移误差和横摆角误差足够小,并保证车辆前轮转角变化率尽量小,令:

$$\begin{cases} \ddot{y} = 0 \\ \ddot{\phi} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

另一方面,如 3.2 节所述,车辆后轮侧偏角的约束范围也是影响车辆稳定性的重要参数之一,可通过控制该范围来控制包络线约束。根据式(4)可得车辆后轮侧偏角 α_r 的约束范围,横摆角速度 $\dot{\phi}$ 的约束范围为:

$$\dot{\phi} = \frac{\overline{C}_{cr} \alpha_r (1 + b/a)}{m \dot{x}} \quad (19)$$

式中, \overline{C}_{cr} 为后轮侧偏刚度估计值。

由后轮侧偏角约束范围可得侧向速度与横摆角速度关系:

$$\left| \frac{\dot{y} - b\dot{\phi}}{\dot{x}} \right| \leq \alpha_r \quad (20)$$

即

$$\dot{\phi} \leq \frac{\dot{y} + \alpha_r \dot{x}}{b} \quad \text{或} \quad \dot{\phi} \geq \frac{\dot{y} - \alpha_r \dot{x}}{b} \quad (21)$$

由式(19)和式(20)组成如图 3 所示的滑移横摆稳定性包络线。由式(19)可知,横摆角速度只与侧偏角和纵向速度有关,而与侧向速度无关,稳定性包络线中上、下界为平行于横轴的直线;由式(20)和式(21)可知,侧向速度的边界大小与横摆角速度呈正线性相关,侧向速度越小,横摆角速度越小,车辆越稳定。

3.4 目标函数

目标函数及其约束条件为:

$$\begin{aligned}
J = & \sum_{i=1}^{N_c} \left\| \boldsymbol{\eta}(k+ik) - \boldsymbol{\eta}_{\text{ref}}(k+ik) \right\|_Q^2 + \\
& \sum_{i=0}^{N_c-1} \left\| \Delta \boldsymbol{u}(k+ik) \right\|_R^2 + \rho \boldsymbol{\varepsilon}^2 \\
\text{s.t. } & \begin{cases} \boldsymbol{u}_{\min} \leq \boldsymbol{u} \leq \boldsymbol{u}_{\max} \\ \Delta \boldsymbol{u}_{\min} \leq \Delta \boldsymbol{u} \leq \Delta \boldsymbol{u}_{\max} \\ \tilde{Y}_{\min} \leq \tilde{Y}(k) \leq \tilde{Y}_{\max} \\ 0 \leq \boldsymbol{\varepsilon} \leq \boldsymbol{\varepsilon}_{\max} \\ -3^\circ \leq \alpha_r \leq 3^\circ \end{cases} \quad (22)
\end{aligned}$$

式中, $\boldsymbol{\eta}_{\text{ref}}$ 为参考轨迹向量; N_c 为控制时域; ρ 为权重系数; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为松弛因子; Q 、 R 为权重矩阵; \boldsymbol{u}_{\min} 、 \boldsymbol{u}_{\max} 分别为最小、最大前轮转角; $\Delta \boldsymbol{u}_{\min}$ 、 $\Delta \boldsymbol{u}_{\max}$ 分别为最小、最大前轮转角增量; $\tilde{Y}(k)$ 、 \tilde{Y}_{\min} 、 \tilde{Y}_{\max} 分别为横向位移及最小、最大横向位移; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为最大松弛因子。

式(22)的第1项以实际轨迹与参考轨迹之间的偏差体现轨迹跟踪精度;第2项为系统在控制时域内对控制增量的累加,表现为对平顺性与稳定性的要求;第3项为松弛因子,其作用是避免在控制周期内目标函数无法求解的情况发生。

4 仿真分析

基于 CarSim 和 MATLAB/Simulink 联合仿真平台,在复杂工况下,对设计的基于 NFS 并考虑滑移、前轮转角、侧偏角、横向偏差、道路边界等多约束的 AMPC 方法进行仿真验证,并将所设计的控制算法与传统固定步长和侧偏刚度的控制算法进行对比。

本文主要选取高、低附着系数条件下不同车速工况,车辆跟踪的参考轨迹为长距离大角度弯道的双移线轨迹,如图4所示。

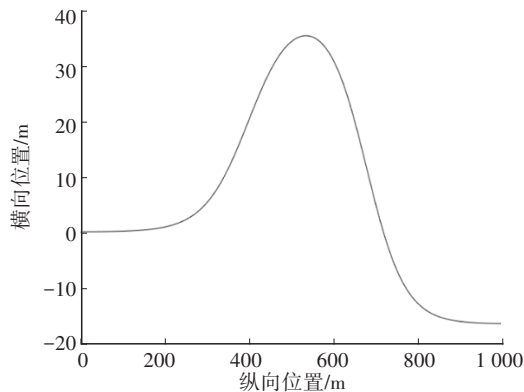


图4 参考双移线轨迹

4.1 高附着系数不同车速工况

在附着系数为0.85的路面上,分别以70 km/h、90 km/h、120 km/h的车速进行联合仿真,仿真结果如

图5~图8所示。与传统采用固定预测步长和无侧偏刚度估计的MPC算法进行控制效果对比,结果如图9所示。

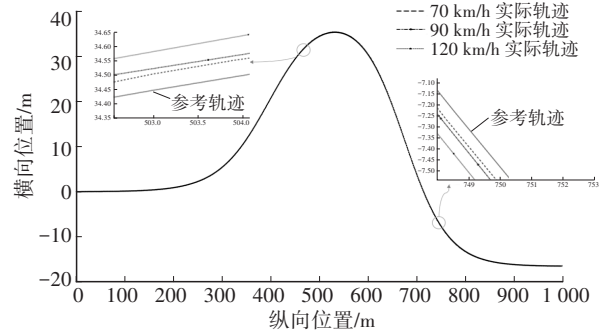


图5 轨迹跟踪对比

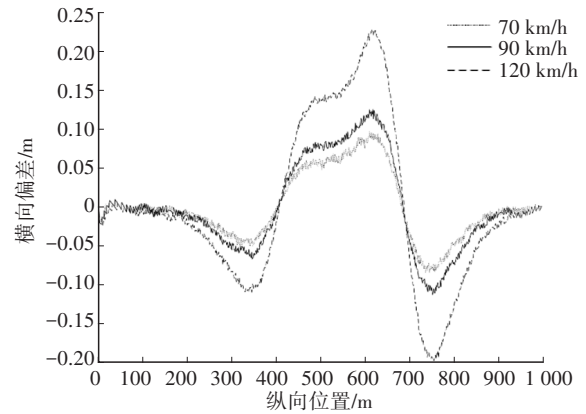


图6 侧向位置偏差

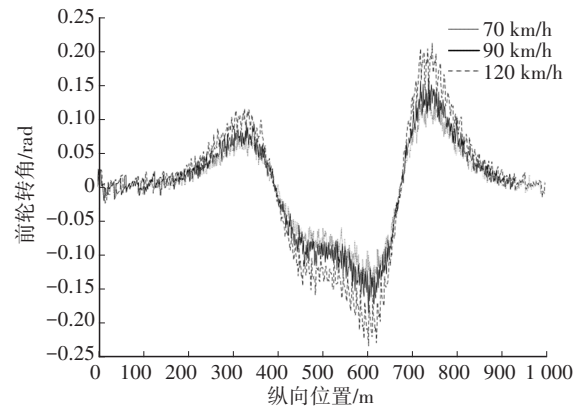
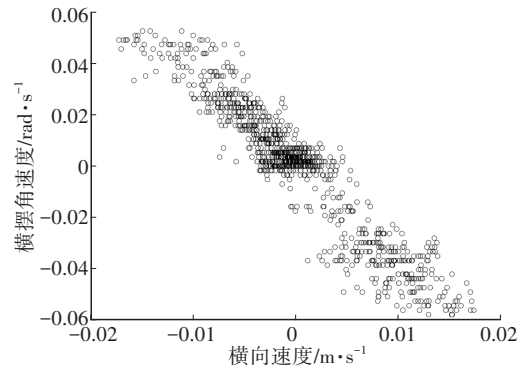
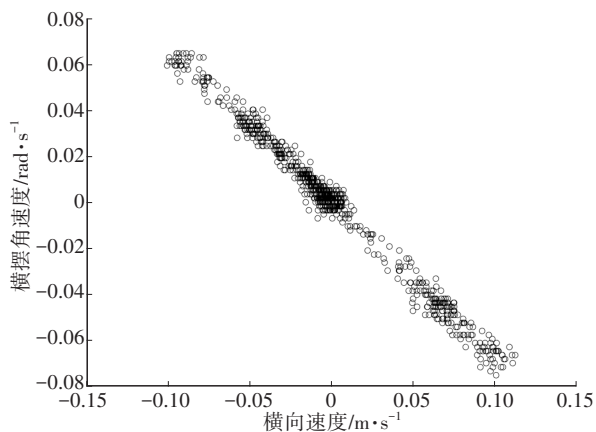


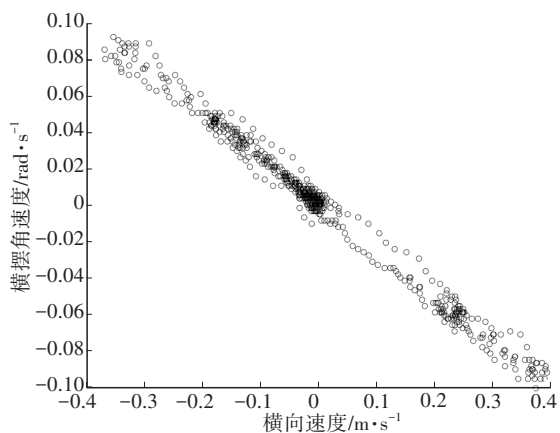
图7 前轮转角



(a) 70 km/h



(b) 90 km/h



(c) 120 km/h

图8 不同车速下横摆角速度与侧向速度的关系

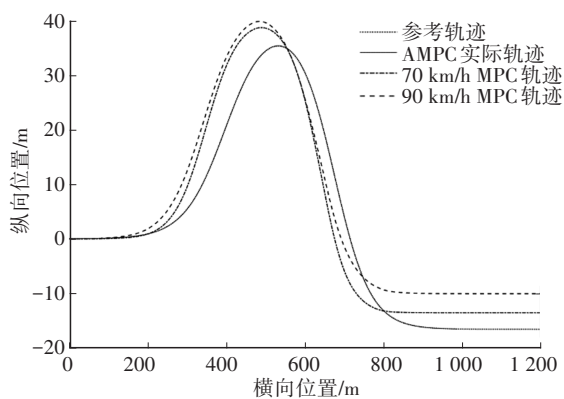


图9 传统MPC算法与AMPC算法跟踪结果对比

由图5和图6可知,在不同速度条件下,车辆的轨迹跟踪精度均较高,侧向位置偏差保持在0.25 m以内,车辆弯道行驶时跟踪误差相对较大,直线轨迹跟踪时精度最高;由图7可知,高速车辆的前轮转角均控制在其饱和和约束范围内;由图8可知,不同车速的横摆角速度-侧向速度曲线均处于滑移包络线内,车辆具有较高的操纵稳定性,且车速越低越稳定。由图9可知,传统的MPC算法在高速工况下进行轨迹跟踪时容易失稳,本文所设计的AMPC算法

高速工况下跟踪误差小,能有效进行轨迹跟踪。

4.2 低附着系数路面不同车速工况

在附着系数为0.5的路面上,分别以70 km/h、90 km/h、120 km/h的车速进行联合仿真,仿真结果如图10~图13所示。

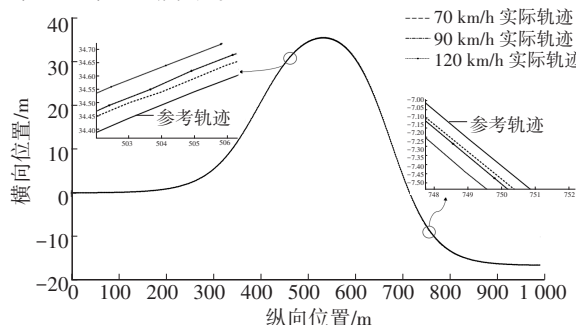


图10 轨迹跟踪对比

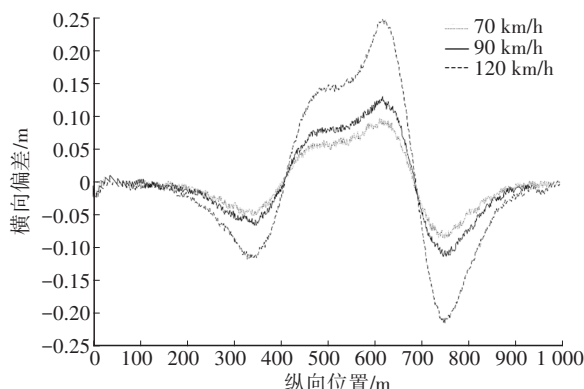


图11 侧向位置偏差

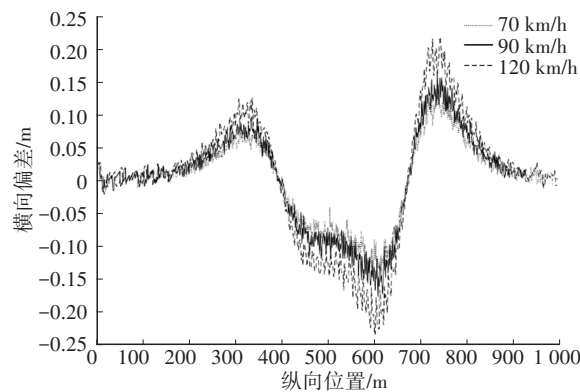
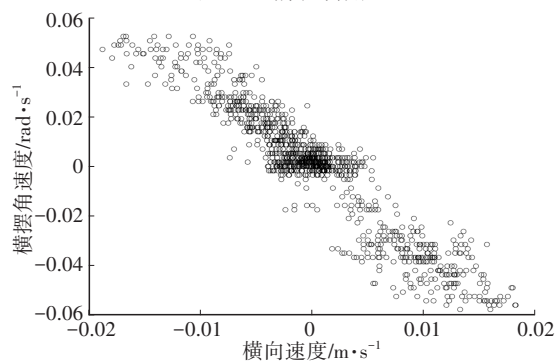


图12 前轮转角



(a) 70 km/h

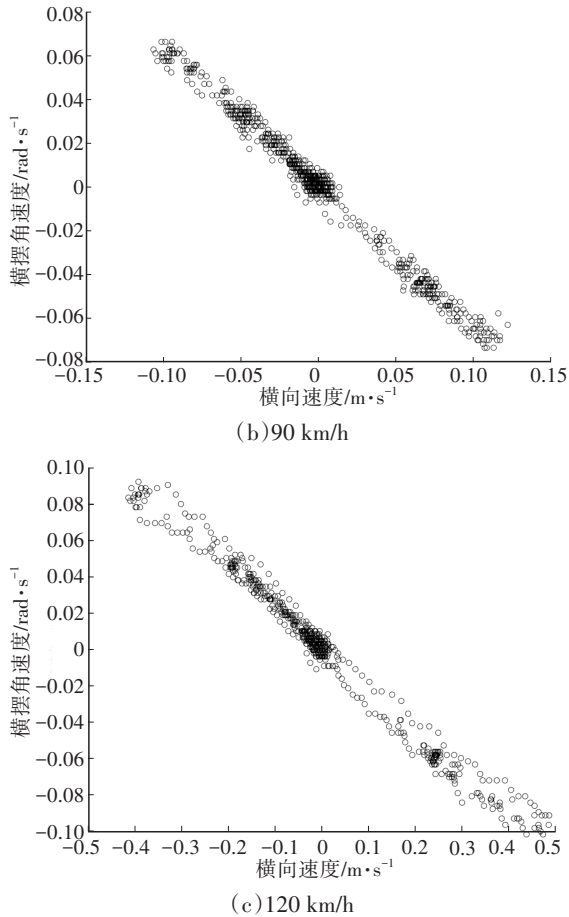


图13 不同车速下横摆角速度与侧向速度的关系

由图10和图11可知,侧偏刚度的实时估计和控制器的不定步长离散化设计使得车辆适应低附着系数路面工况下的行驶,其轨迹跟踪精度也较高,侧向位置偏差保持在0.3 m以内;由图12可知,车辆前轮转角保持在其约束范围内;由图13可知,车辆横摆角速度和侧向速度仍处于包络线内,车辆整体仍具有较好的操纵稳定性。

以上仿真结果表明,本文提出的方法在高速行驶工况下车辆轨迹跟踪中可适应不同附着系数路面条件,具有较强鲁棒性,并能有效避免高速行驶时车辆的滑移失稳,保障操纵稳定性和轨迹跟踪精度。

5 结束语

针对高速工况下车辆在不同附着系数路面条件下的轨迹跟踪问题,本文对高速车辆的轮胎侧偏刚度进行在线估计并实时更新模型预测控制算法中的控制参数,实现其自适应,在离散化时改变常规条件下模型预测控制算法的预测时域固定步长为不定步长,设计成短步长和长步长来增大预测步

长,同时,为保证车辆行驶时的稳定性,对高速车辆添加横摆角速度约束和侧偏角约束,从而保障了高速工况下车辆的控制精度和稳定性要求。

参考文献

- [1] 邵毅明,陈亚伟,束海波. 自动驾驶汽车的轨迹跟踪控制[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(8): 1-6.
SHAO Y M, CHEN Y W, SHU H B. Trajectory Tracking Control of Self-Driving Cars[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2019, 38(8): 1-6.
- [2] ZHANG S, ZHAO X, ZHU G H, et al. Adaptive Trajectory Tracking Control Strategy of Intelligent Vehicle[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2020, 16(5).
- [3] 杜军琼,李军. 车辆稳定性技术的研究[J]. 汽车工程师, 2021(8): 26-29.
DU J Q, LI J. Research on Vehicle Stability Technology[J]. Automotive Engineer, 2021(8): 26-29.
- [4] HUSKIĆ G, BUCK S, HERRB M, et al. High-Speed Path Following Control of Skid-Steered Vehicles[J]. The International Journal of Robotics Research, 2019, 38(9): 1124-1148.
- [5] 王玉琼,高松,王玉海,等. 高速无人驾驶车辆轨迹跟踪和稳定性控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(10): 1922-1929+1947.
WANG Y Q, GAO S, WANG Y H, et al. Trajectory Tracking and Stability Control of High-Speed Unmanned Vehicles[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2021, 55(10): 1922-1929+1947.
- [6] 柳亚子,江洪,于文浩,等. 高速转向工况下的无人驾驶车辆路径跟踪[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(3): 68-74.
LIU Y Z, JIANG H, YU W H, et al. Path Tracking of Driverless Vehicles under High-Speed Steering Conditions [J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(3): 68-74.
- [7] 路宏广,聂小芮,顾凯峰. 基于自适应模型预测的智能汽车轨迹跟踪控制研究[J]. 汽车文摘, 2021(2): 51-56.
LU H G, NIE X R, GU K F. Research on Intelligent Vehicle Trajectory Tracking Control Based on Adaptive Model Prediction[J]. Automotive Digest, 2021(2): 51-56.
- [8] 查云飞,于淼,马芳武,等. 基于线控转向的智能驾驶车辆路径跟踪研究[J]. 汽车技术, 2021(3): 7-13.
CHA Y F, YU M, MA F W, et al. Path Tracking Study of Intelligent Driving Vehicles Based on Steer-by-Wire[J]. Automotive Technology, 2021(3): 7-13.
- [9] 林棻,张华达,赵又群,等. 基于轮胎侧偏刚度估计的路

- 面附着条件辨识[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 16-24.
- LIN F, ZHANG H D, ZHAO Y Q, et al. Identification of Pavement Attachment Conditions Based on Tire Lateral Deflection Stiffness Estimation[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(11): 16-24.
- [10] 张志达, 郑玲, 张紫微, 等. 基于自适应模型预测的智能汽车横向轨迹跟踪控制[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 305-316.
- ZHANG Z D, ZHENG L, ZHANG Z W, et al. Lateral Trajectory Tracking Control of Intelligent Vehicles Based on Adaptive Model Prediction[J]. Chinese Journal of Highway, 2022, 35(7): 305-316.
- [11] JEONG D, KO G, CHOI S B. Estimation of Sideslip Angle and Cornering Stiffness of an Articulated Vehicle Using a Constrained Lateral Dynamics Model[J]. Mechatronics, 2022, 85.
- [12] 刘凯, 陈慧岩, 龚建伟, 等. 高速无人驾驶车辆的操控稳定性研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(5): 514-521.
- LIU K, CHEN H Y, GONG J W, et al. Research on Maneuvering Stability of High-Speed Driverless Vehicles [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(5): 514-521.
- [13] BROWN M, FUNKE J, ERLIEN S, et al. Safe Driving Envelopes for Path Tracking in Autonomous Vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2017, 61: 307-316.
- [14] 吴西涛, 魏超, 翟建坤, 等. 考虑横摆稳定性的无人车轨迹跟踪控制优化研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(6): 130-142.
- WU X T, WEI C, ZHAI J K, et al. Optimization of Trajectory Tracking Control of Unmanned Vehicle Considering Pendulum Stability[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(6): 130-142.
- (责任编辑 斛 畔)
- 修改稿收到日期为2023年8月4日。

(上接第20页)

- for Autonomous Vehicles[J]. Practical Automotive Technology, 2023, 48(10): 197-203.
- [10] 李海华, 万热华, 陈小玲, 等. 一种基于逆透视变换的车道线检测方法[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(2): 97-100.
- LI H H, WAN R H, CHEN X L, et al. A Lane Line Detection Method Based on Inverse Perspective Transformation[J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2021(2): 97-100.
- [11] 张亚秋, 刘雅莉, 赵珣. 一种基于横向距离判断的车道偏离预警算法[J]. 电视技术, 2022, 46(7): 8-12.
- ZHANG Y Q, LIU Y L, ZHAO X. A Lane Departure Warning Algorithm Based on Lateral Distance Judgment[J]. TV Technology, 2022, 46(7): 8-12.
- [12] 顾友霖, 郑再象, 刘洋, 等. 基于霍夫变换的车道线检测跟踪及车道偏离预警[J]. 南方农机, 2023, 54(9): 129-132.
- GU Y L, ZHENG Z X, LIU Y et al. Lane Line Detection Tracking and Lane Departure Warning Based on Hough Transform[J]. Southern Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 129-132.
- [13] 刘彬, 魏为民. 基于深度学习的快速车道线检测方法[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(5): 34-39.
- LIU B, WEI W M. A Fast Lane Line Detection Method Based on Deep Learning[J]. Automobile Practical Technology, 2023, 48(5): 34-39.
- (责任编辑 斛 畔)
- 修改稿收到日期为2023年8月18日。