

基于变论域的高速行驶智能汽车模糊模型 预测控制方法研究

何 洋 李 刚* 余孝楠

辽宁工业大学汽车与交通工程学院,锦州,121001

摘要:为提高高速行驶智能汽车的轨迹跟踪能力和行驶稳定性,提出一种变论域模糊模型预测控制(VUFMPC)方法。在传统的智能汽车模型预测控制(MPC)方法基础上,将输出误差及其变化率作为输入,误差权重和控制增量的调整因子作为输出,建立模糊模型预测控制器(FMPC)。针对模糊论域无法自适应调整的问题,引入变论域模糊控制(VUFC)方法,根据输出误差自适应调整 FMPC 的论域。采用硬件在环试验方法进行对比分析。试验结果表明:相较于 MPC 和 FMPC,VUFMPC 的最大跟踪误差减小 78.8%和 53.6%,均值误差减小 38.1%和 31.6%,横向速度优化量分别为 52.3%~50.7%和 33.5%~30.9%。VUFMPC 使高速行驶的智能汽车轨迹跟踪误差更小,行驶更稳定。

关键词:智能汽车;轨迹跟踪;变论域;预测控制

中图分类号:TP273.1;U461.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Fuzzy Model Predictive Control Method for High Speed Intelligent Vehicles Based on Variable Universe

HE Yang LI Gang* YU Xiaonan

School of Automobile and Traffic Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou, Liaoning, 121001

Abstract: In order to improve the ability of trajectory tracking and driving stability of high speed intelligent vehicles, a variable universe fuzzy model predictive control method(VUFMPC) was proposed. Based on the traditional method of trajectory tracking model predictive control (MPC) of intelligent vehicles, a fuzzy model predictive controller(FMPC) was established by taking the output errors and the rate of change as inputs, and the adjustment factors of error weight and control increment as outputs. For the universe inability to adaptively adjust, variable universe fuzzy control method (VUFC) was introduced to adaptively adjust the universe of FMPC based on output errors. Finally, this method was verified through hand-in-loop experiments. The experimentd results show that compared to MPC and FMPC, the maximum tracking error is reduced by 78.8% and 53.6%, the average tracking error is reduced by 38.1% and 31.6%, the optimization quantity of lateral speedy is in 52.3%~50.7% and 33.5%~30.9% respectively. VUFMPC reduces the tracking errors and makes driving more stable for a high speed intelligent vehicles.

Key words: intelligent vehicle; trajectory tracking; variable universe; predictive control

0 引言

智能汽车轨迹规划的核心问题之一是轨迹跟踪控制,尤其对于高速行驶的智能汽车,其轨迹跟踪能力和行驶稳定性是影响行驶安全的重要因素。目前高速行驶智能汽车轨迹跟踪方法主要分为传统控制方法,如 PID 控制、LQR 控制、滑模控制、预瞄控制、模糊控制等;智能控制方法包括神

经网络、强化学习、模型预测控制等^[1-2]。文献[3]提出一种基于 Q 学习的变论域模糊 PID 控制方法,通过动态改变域的大小来保证系统的实时性和自适应性,提高了车辆行驶稳定性和控制精度。文献[4]提出了一种考虑前馈控制和转角补偿的线性二次调节器 LQR-双比例-积分-微分的横纵向协同控制方法,通过前轮转角补偿机制使高速行驶汽车有较高的轨迹跟踪精度和转向稳定性。文献[5]针对智能车辆轨迹跟踪过程的车辆稳定性多目标控制问题,设计了自适应螺旋滑模控制器,保证车辆稳定性的同时,减小了轨迹跟踪误

收稿日期:2024-03-20

基金项目:国家自然科学基金(51675257);辽宁省自然科学基金(2022-MS-376);2024 年辽宁省教育厅高校基本科研项目(LJ212410154021)

差。文献[6]采用一种终端滑模算法的车辆轨迹跟踪控制方法,根据径向基函数神经网络算法逼近控制模型中的系统变量,用模糊逻辑对控制器增益参数进行控制,该控制器能够较好地实现车辆轨迹跟踪和稳定控制。文献[7]结合模糊控制和滑模控制方法,实现了抖振缓解和跟踪精度之间的平衡,提高了车辆轨迹跟踪过程中的行驶稳定性。文献[8]提出了一种线性时变模型预测(LTV-MPC)控制方法,利用线性时变理论构建车辆的轨迹跟踪误差模型,采用二次规划方法求解,使车辆具有较高的轨迹跟踪精度和行驶稳定性。文献[9]设计了一种非线性模型预测控制器(NMPC),通过引入事件触发机制,保证了跟踪精度,同时改善了车辆的横向稳定性。文献[10]提出基于不同车速和路面附着系数的参数自适应MPC算法,可保持车辆行驶稳定性,借助前馈神经网络识别路面附着系数,实现了多参数自适应轨迹跟踪控制。

目前对高速行驶的智能汽车轨迹跟踪及稳定控制的研究仍然较少,传统的PID或LQR控制方法虽然计算简单、具有实时性,但当道路曲率连续变化较大时汽车轨迹跟踪误差大、跟踪目标的准确性低,行驶不稳定且系统只能对当前状态进行控制,无法预测未来的变化。滑模控制方法对初始条件和参数扰动较为敏感,需要适当的调节和补偿系统,但会引起系统超调问题。深度学习需先验知识或预先训练实现模型的参数学习,难以在线优化行驶轨迹,且计算复杂度高、耗时多。尽管采用传统MPC控制方法能够实现模型的预测控制,并能够预测系统未来的状态,但当汽车行驶速度较快、转向半径较小时,尤其对于高速行驶智能汽车稳定控制问题,MPC控制能力不足^[11]。

为此,本文针对高速行驶的智能汽车轨迹跟踪及稳定控制问题,提出变论域模糊模型预测控制方法,结合模糊控制原理和模型预测控制原理,将输出误差及其变化率作为模糊变量的输入,误差权重和控制增量权重调节因子作为输出,由输入、输出关系制定模糊规则,实现控制器参数根据跟踪误差自适应整定,再引入变论域模糊控制方法,使模糊论域随着跟踪误差大小自适应伸缩调整,从而提高系统的适应性和控制精度。

1 汽车状态方程

1.1 汽车动力学模型

理论上智能汽车可视为无限多自由度系统,

建立这样的系统比较困难。智能汽车轨迹跟踪过程只要能够表现其动力学约束,模型预测控制器就可以实现既定控制的目的^[12]。为此,对汽车动力学模型作如下假设与简化:①忽略垂向运动;②忽略悬架运动的影响;③忽略轮胎力的横、纵向耦合关系;④忽略轮胎的横向载荷转移;⑤忽略空气动力学对其横摆特性的影响。

根据上述假设与简化,建立汽车转向动力学模型如图1所示。

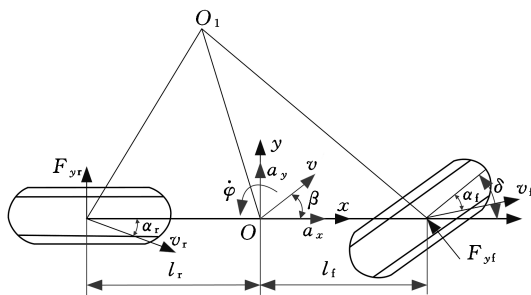


图1 汽车转向动力学模型

Fig.1 Vehicle yaw dynamic model

Oxy 为汽车坐标系, O 为汽车质心, O_1 为汽车瞬时转动中心,质心加速度在 x 轴、 y 轴方向的分量分别为 a_x 与 a_y ,其关系式为

$$\begin{cases} a_x = \dot{v}_x - v_y \dot{\varphi} \\ a_y = \dot{v}_y + v_x \dot{\varphi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_x 、 v_y 分别为汽车质心在 x 轴、 y 轴方向的速度分量; $\dot{\varphi}$ 为横摆角速度。

沿 y 轴方向的合力与绕质心的力矩为

$$\begin{cases} \sum F_y = ma_y = m(\dot{v}_y + v_x \dot{\varphi}) = F_{yf} \cos \delta + F_{yr} \\ \sum M_z = I_z \ddot{\varphi} = l_f F_{yf} \cos \delta - l_r F_{yr} \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为簧载质量; l_f 、 l_r 分别为汽车质心至前、后轴的距离; δ 为前轮转角; F_{yf} 与 F_{yr} 分别为前、后轮胎侧向力; $\ddot{\varphi}$ 为横摆角加速度; I_z 为汽车绕 z 轴转动惯量。

将式(2)整理为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_y \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_{yf} + F_{yr}}{m} \\ \frac{l_f F_{yf}}{I_z} \end{bmatrix} \cos \delta + \begin{bmatrix} -\dot{\varphi} \\ \frac{-l_r F_{yr}}{v_x I_z} \end{bmatrix} v_x \quad (3)$$

试验结果表明,当轮胎侧偏角 $\alpha \in [-5^\circ, 5^\circ]$,轮胎侧向力与轮胎侧偏角近似线性关系^[13],则式(3)的前、后轮胎侧向力线性化模型为

$$\begin{cases} F_{yf} = C_{af} \alpha_f \\ F_{yr} = C_{ar} \alpha_r \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_{af} 、 C_{ar} 分别为前、后轮胎的侧偏刚度; α_f 、 α_r 分别为前、后轮胎的侧偏角。

由于汽车高速行驶,故对前轮转角作小角度假设,有 $\cos \delta \approx 1$ 、 $\sin \delta \approx \delta$,则前、后轮胎的侧偏角为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_f &= \frac{v_y + l_f \dot{\varphi}}{v_x} - \delta \\ \alpha_r &= \frac{v_y + l_f \dot{\varphi}}{v_x} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

联立式(3)~式(5),将式(3)改写为

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_y \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_{af} + C_{ar}}{mv_x} & \frac{l_f C_{af} - l_r C_{ar}}{mv_x} - v_x \\ \frac{l_f C_{af} - l_r C_{ar}}{I_z v_x} & \frac{l_f^2 C_{af} + l_r^2 C_{ar}}{I_z v_x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_y \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \delta \begin{bmatrix} -\frac{C_{af}}{m} \\ -\frac{l_f C_{af}}{I_z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

将前轮转角 δ 作为控制量,横向速度 v_y 和横摆角速度 $\dot{\varphi}$ 作为状态量,设 $\mathbf{u} = [\delta]$, $\mathbf{x} = [v_y \quad \dot{\varphi}]^T$,将式(6)改写为状态方程,有

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (7)$$

1.2 轨迹跟踪误差模型

图2为考虑道路曲率的汽车轨迹跟踪误差模型。 OXY 为环境坐标系,横向误差 e_y 是汽车后轴中心点到投影点 P 的距离, φ_{ref} 为参考轨迹在投影点 P 的切线与 X 轴的夹角,横摆角误差为 $e_\varphi = \varphi - \varphi_{\text{ref}}$,以 R 为转向半径, P 处的参考道路曲率为 $\kappa_{\text{ref}} = 1/R$,则投影点 P 处的速度 \dot{P} 为^[14]

$$\dot{P} = \frac{1}{1 - \kappa_{\text{ref}} e_y} (v_x \cos e_\varphi + v_y \sin e_\varphi) \quad (8)$$

汽车轨迹跟踪的误差方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_\varphi &= \dot{\varphi} - \kappa_{\text{ref}} \dot{P} \\ \dot{e}_y &= v_x \sin e_\varphi + v_y \cos e_\varphi \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

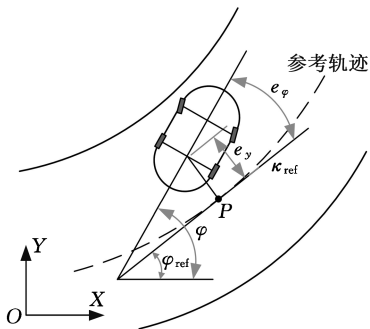


图2 轨迹跟踪误差模型

Fig.2 Trajectory tracking error model

结合式(8)和式(9),采用小角度假设,即 $\sin e_\varphi \approx e_\varphi$, $\cos e_\varphi \approx 1$, $e_\varphi \kappa_{\text{ref}} \approx 0$,将式(9)简化为

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_\varphi &= \dot{\varphi} - \frac{\kappa_{\text{ref}} v_x}{1 - \kappa_{\text{ref}} e_y} \approx \dot{\varphi} - \kappa_{\text{ref}} v_x \\ \dot{e}_y &\approx v_x e_\varphi + v_y \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

令状态量为 $\bar{\mathbf{x}} = [v_y \quad \dot{\varphi} \quad e_y \quad e_\varphi]^T$,结合式(9)、式(10),将式(7)改写为

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A}_1 \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_1 \mathbf{u} + \mathbf{B}_2 \kappa_{\text{ref}} \quad (11) \\ \mathbf{A}_1 &= \begin{bmatrix} \frac{C_{af} + C_{ar}}{mv_x} & \frac{l_f C_{af} - l_r C_{ar}}{mv_x} - v_x & 0 & 0 \\ \frac{l_f C_{af} - l_r C_{ar}}{I_z v_x} & \frac{l_f^2 C_{af} + l_r^2 C_{ar}}{I_z v_x} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & v_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_1 &= \begin{bmatrix} -\frac{C_{af}}{m} \\ -\frac{l_f C_{af}}{I_z} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{B}_2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -v_x \end{bmatrix} \end{aligned}$$

2 变论域模糊模型预测控制器

2.1 目标函数

设 \mathbf{x}_{ref} 、 \mathbf{u}_{ref} 为参考状态量和控制量,将式(11)改写为

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}}_{\text{ref}} = \mathbf{A}_1 \bar{\mathbf{x}}_{\text{ref}} + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_{\text{ref}} + \mathbf{B}_2 \kappa_{\text{ref}} \quad (12)$$

式(11)与式(12)相减,并采用欧拉法将其离散化,整理得

$$\left. \begin{aligned} \xi(k+1) &= \mathbf{A}_k \xi(k) + \mathbf{B}_k \bar{\mathbf{u}}(k) \\ \psi(k|t) &= \mathbf{C}_k \xi(k|t) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $\xi = \bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_{\text{ref}}$; $\bar{\mathbf{u}}(k) = \delta - \delta_{\text{ref}}$, δ_{ref} 为转向角参考值; $\psi(k|t)$ 为实际输出; \mathbf{A}_k 、 \mathbf{C}_k 为状态转移矩阵; \mathbf{B}_k 为输入矩阵; t 为时间; k 为离散时间步数, $k = 1, 2, \dots, t + N - 1$ 。

智能汽车模型预测控制的目标函数 $j(k)$ 不仅要反映系统对参考轨迹的跟踪能力(即输出误差),而且需降低模型求解难度^[15],其表达式为

$$j(k) = \min_{\mathbf{u}_t} \sum_{i=1}^{N_p} \|\psi(k+i|t) - \psi_{\text{ref}}(k+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta \mathbf{u}(k+i|t)\|_R^2 + \rho \epsilon^2 \quad (14)$$

式中: $\psi(k+i|t)$ 为实际输出; $\psi_{\text{ref}}(k+i|t)$ 为参考输出; $i = 1, 2, \dots, N_c, \dots, N_p$; N_c 为控制时域; N_p 为预测时域; $\Delta \mathbf{u}(k+i|t)$ 为控制增量; Q 为误差权重; R 为控制增量权重; ρ 为松弛因子权重; ϵ 为松弛因子。

为简化计算, \mathbf{A}_k 、 \mathbf{B}_k 、 \mathbf{C}_k 分别表示为 \mathbf{A}_t 、 \mathbf{B}_t 、 \mathbf{C}_t 、代入计算,将目标函数式(14)转化为二次规划问题求解^[16],有

$$J(\boldsymbol{\psi}(t), \mathbf{u}(t-1), \Delta \mathbf{u}(t)) = (\Delta \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\psi})^T \mathbf{H}_t (\Delta \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\psi}) + \mathbf{G}_t (\Delta \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\psi}) \quad (15)$$

$$\mathbf{H}_t = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Theta}_t^T \mathbf{Q} \boldsymbol{\Theta}_t + \mathbf{M} & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_t = [2\mathbf{E}^T \mathbf{Q} \boldsymbol{\Theta}_t \quad 0]$$

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

$$\mathbf{E} = \text{diag}(Q, \dots, Q, \dots, Q)$$

$$\Theta_t = \begin{bmatrix} C_t B_t & 0 & \dots & 0 \\ C_t A_t B_t & C_t B_t & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_t A_t^{N_c-1} B_t & C_t A_t^{N_c-2} B_t & \dots & C_t B_t \\ C_t A_t^{N_c} B_t & C_t A_t^{N_c-1} B_t & \dots & C_t A_t B_t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_t A_t^{N_p-1} B_t & C_t A_t^{N_p-2} B_t & \dots & C_t A_t^{N_p-N_c-1} B_t \end{bmatrix}$$

2.2 约束条件

控制量和控制增量的约束为

$$\left. \begin{aligned} u_{\min}(t+k) \leq u(t+k) \leq u_{\max}(t+k) \\ \Delta u_{\min}(t+k) \leq \Delta u(t+k) \leq \Delta u_{\max}(t+k) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中： $u_{\max}(t+k)$ 、 $u_{\min}(t+k)$ 分别为控制量的最大和最小值； $\Delta u_{\max}(t+k)$ 、 $\Delta u_{\min}(t+k)$ 分别为控制增量的最大和最小值。

除了对控制量、控制增量的约束，还需考虑汽车动力学特性约束^[17]，前轮转角及其增量约束为

$$\left. \begin{aligned} -10^\circ \leq \delta \leq 10^\circ \\ -0.5^\circ \leq \Delta\delta \leq 0.5^\circ \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

汽车行驶稳定性试验结果表明^[18]，汽车稳定行驶时的前后轮胎侧偏角、质心侧偏角、侧向加速度允许范围分别为

$$\left. \begin{aligned} -5^\circ \leq \alpha_{l,r} \leq 5^\circ \\ -8^\circ \leq \beta \leq 8^\circ \\ -4 \text{ m/s}^2 \leq a_y \leq 4 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

2.3 模糊模型预测控制策略

在智能汽车轨迹跟踪控制方法中，MPC 难以兼顾轨迹跟踪精度和行驶稳定性，使得智能汽车高速行驶时，尤其当道路曲率连续变化较大时，导致汽车转向过程失稳。因此，设计一种能够兼顾轨迹跟踪精度和行驶稳定性的模糊模型预测控制器(FMPC)。将跟踪误差 e_y 及其变化率 de_y 作为模糊控制的 2 个输入；设状态量和控制增量的权重调整因子分别为 τ_Q 、 τ_R ，并将其作为 2 个输出。其输入、输出关系为：① e_y 和 de_y 符号相同，表明跟踪误差在增大，则增大输出误差和控制增量的权重调整因子；② e_y 和 de_y 符号相反，表明跟踪误差在减小，则增大输出误差权重调整因子、减小控制增量权重调整因子。具体相关规则见表 1。

表 1 输入、输出关系表

Tab.1 Input and output relationship table

		e_y							
		正			负				
de_y	正	$\psi < \psi_{ref}$	$e_y \uparrow$	$\tau_Q \uparrow$	$\tau_R \uparrow$	$\psi > \psi_{ref}$	$e_y \downarrow$	$\tau_Q \uparrow$	$\tau_R \downarrow$
	负	$\psi < \psi_{ref}$	$e_y \downarrow$	$\tau_Q \uparrow$	$\tau_Q \downarrow$	$\psi > \psi_{ref}$	$e_y \uparrow$	$\tau_Q \uparrow$	$\tau_R \uparrow$

定义输入的模糊集为：NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。由于权重为非负，故定义输出的模糊

集为：ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。输入论域范围 $[-3, 3]$ ，输出论域范围 $[0, 1]$ 。

权重系数矩阵 Q 、 R 的调节式为

$$\left. \begin{aligned} Q_f &= 4\tau_Q Q \\ R_f &= 2\tau_R R \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中： Q_f 、 R_f 为 FMPC 整定的权重系数。

考虑到汽车的行驶状态与前轮转角增量对评价结果的实际影响，输出误差和状态量权重调整因子选用准确性高、适应性强的 Gaussian 型隶属函数；误差变化率和控制增量权重调整因子输出采用灵敏度高的三角形隶属函数，根据表 1 所示的输入、输出关系及多次试验的经验总结，制定的模糊规则见表 2，输入、输出隶属函数见图 3。

表 2 τ_Q/τ_R 模糊规则

Tab.2 τ_Q/τ_R fuzzy rules

		e_y						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
de_y	NB	PB/PB	PM/PB	PS/PB	ZO/PB	PS/PB	PM/PB	PB/PB
	NM	PB/PM	PM/PM	PS/PM	ZO/PM	PS/PM	PM/PM	PB/PM
	NS	PB/PS	PM/PS	PS/PS	ZO/PS	PS/PS	PM/PS	PB/PS
	ZO	PB/PS	PM/PS	PS/ZO	ZO/ZO	PS/ZO	PM/PS	PB/PS
	PS	PB/PS	PM/PS	PS/PS	ZO/PS	PS/PS	PM/PS	PB/PS
	PM	PB/PM	PM/PM	PS/PM	ZO/PM	PS/PM	PM/PM	PB/PM
	PB	PB/PB	PM/PB	PS/PB	ZO/PB	PS/PB	PM/PB	PB/PB

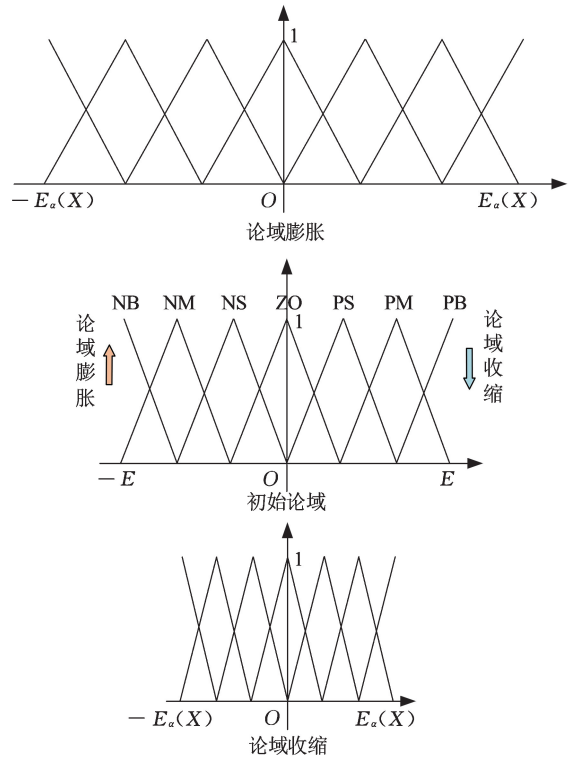


图 3 论域调整示意图

Fig.3 Diagram of variable universe

2.4 变论域模糊模型预测控制策略

尽管模糊规则可实现对误差权重和控制增量权重的自适应调整，但 FMPC 中模糊控制的论域范围是根据经验预先设定的，当跟踪误差趋近于

0 时, 给定的初始论域范围过小会导致系统超调, 汽车行驶不稳定; 而较大的论域范围使得模糊规则作用不明显, 降低了轨迹跟踪精度。为了兼顾汽车轨迹跟踪精度和行驶稳定性, 引入变论域模糊控制方法 VUFMPC, 该方法通过动态调整模糊集合的论域, 使论域范围跟随系统误差在线自适应调整, 可有效提高系统的鲁棒性和响应速度^[19]。图 3 为论域调整方法示意图, $\alpha(X)$ 为论域调整的伸缩因子; E 为给定的初始论域。当跟踪误差增大时, 适当增大 $\alpha(X)$ 值; 反之, 减小 $\alpha(X)$ 值。

在前述模糊规则不变的前提下, 采用变论域模糊控制可以实现初始论域的范围随输出误差的变化而改变, 使输入、输出变量的基本论域跟随系统自适应伸缩, 实现系统的参数在线自适应整定。调整后的输入、输出模糊论域为

$$\left. \begin{aligned} X_i &= [-\alpha_i E_i, \alpha_i E_i] \\ Y_j &= [-\beta_j U_j, \beta_j U_j] \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$i, j = 1, 2$

式中: X_i 为第 i 个输入变量的模糊论域; α_i 为第 i 个输入变量的伸缩因子; E_i 为第 i 个输入变量的论域边界; Y_j 为

输出变量的模糊论域; β_j 为输出变量的伸缩因子; U_j 为输出变量的论域边界。

由相关文献和试验分析结论, 采用相对简化的比例型伸缩因子构造方法^[20], 有

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i(X_i) &= \frac{|X_i|}{E_i} + \epsilon \\ \beta_j(Y_j) &= \frac{|Y_j|}{U_j} + \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

根据上述原理, 建立智能汽车 VUFMPC 的原理框图(图 4)。基于感知器测量的汽车状态信息用于轨迹规划, 论域调整根据误差计算论域伸缩因子, 从而改变输入、输出论域。模糊控制器根据输出误差制定模糊规则, 预测汽车的行驶状态, 对输出量和控制增量的权重调整因子实时修正, 模糊控制的输出量作为 MPC 的输入, 对误差权重和控制增量权重在线自适应整定, 再由 MPC 输出控制量, 更新汽车的行驶状态, 形成闭环滚动优化控制。其中, 解模糊化方法采用重心法^[21], 该方法具有更平滑的输出推理控制, 对于输入信号的微小变化, 输出也会发生变化, 具有很高的灵敏度。

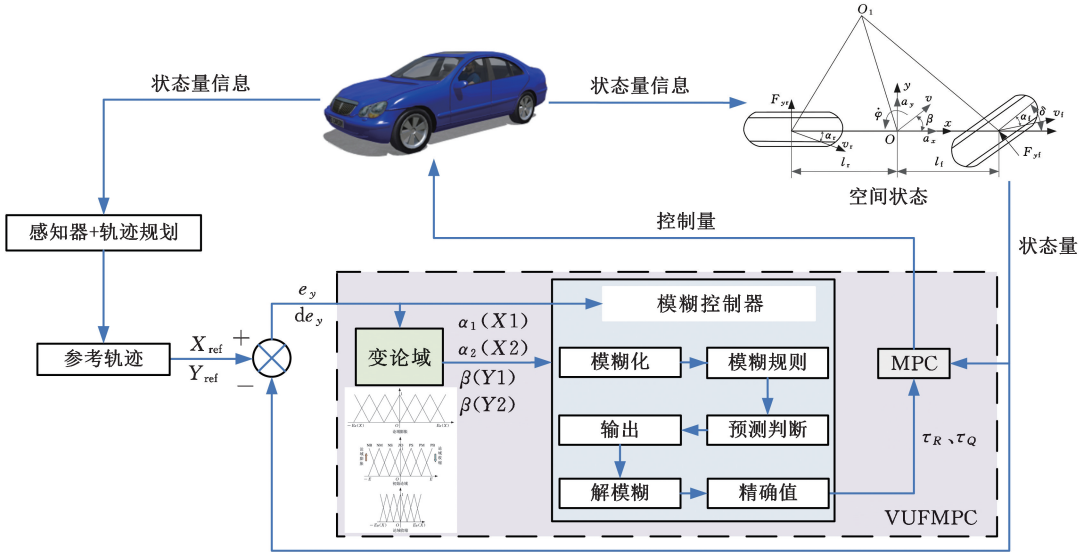


图 4 VUFMPC 控制原理

Fig.4 Control principle of VUFMPC

3 硬件在环试验

3.1 试验条件

为验证本文方法的有效性和优越性, 采用图 5 所示的硬件在环试验平台。选取国产某品牌前置前驱轿车, 其相关参数见表 3。CarSim 环境下建立该车模型, 利用 Simulink 搭建 MPC、FMPC、VUFMPC 模型, 并将其传送至 dSPACE 控制柜完成控制算法在线调试、数据转换, 转换后的数据经由控制台采集、保存并传导至驾驶模拟器主体,

实现硬件在环控制。

汽车目标速度为 90 km/h, 无制动, 选择 Car-Sim 中提供的用于测试汽车高速行驶稳定性的道路模型(Alt 3 from FHWA), 附着系数为 0.85 的干燥沥青路面, 模型的三处弯道半径分别为 $R_1 = 38.3 \text{ m}$, $R_2 = 39.2 \text{ m}$, $R_3 = 28.7 \text{ m}$, 其纵向(X 向)最大距离为 1000 m, 横向(Y 向)最大距离为 300 m, 道路模型如图 6 所示。

3.2 控制器性能分析

图 7 所示为三种控制器在车速为 90 km/h

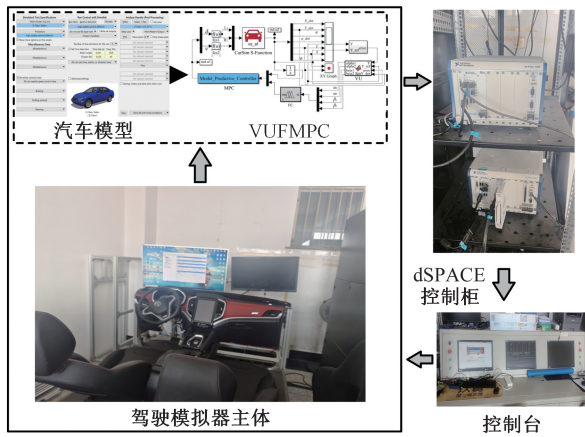


图 5 硬件在环试验平台

Fig.5 HIL experiment platform

表 3 汽车相关参数

Tab.3 Related parameters of vehicle

参数名	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	4.85×1.84×1.45
簧载质量 m /kg	1470
转动惯量 I_x /(kg·m ²)	670.1
转动惯量 I_y /(kg·m ²)	2033.5
转动惯量 I_z /(kg·m ²)	2033.5
轴距 l /m	2.86
前轮距 T_f /m	1.62
后轮距 T_r /m	1.63
质心高度 h_G /m	0.52
前轮侧偏刚度 C_{af} /(N·rad ⁻¹)	1×10^5
后轮侧偏刚度 C_{ar} /(N·rad ⁻¹)	9.5×10^4
轮胎规格	225/60 R19

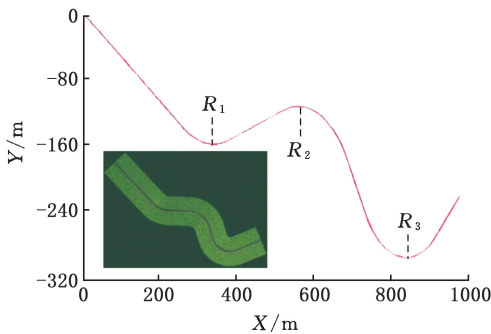


图 6 道路模型

Fig.6 Road model

和 120 km/h 工况下该车转向角的响应特性,结合表 4 统计值可知,两种工况下均是 MPC 的超调最大,分别为 22.9% 和 30.6%,过渡时间最长,分别为 1.96 s 和 2.24 s,且存在明显的振荡。采用 FMPC 的超调量小于 MPC,且上升时间和过渡时间有效减少。相较于前两种控制器,VUFMPC 的各项参数优化效果明显,车速为 90~120 km/h,超调量分别优化了 18.8%~23.9% 和 11.1%~11.7%,过渡时间减少了 68.4%~80.8% 和 47.4%~58.3%。可见,VUFMPC 的实时性和可控性更优。

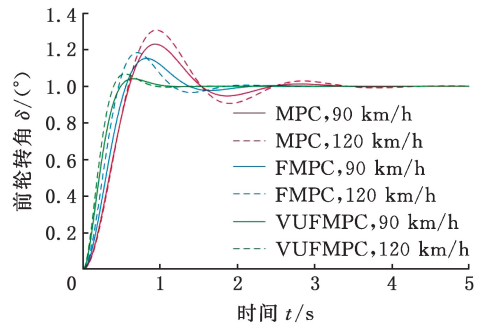


图 7 转向角响应特性

Fig.7 Response characteristics of steering angle

表 4 各控制策略下的参数统计值

Tab.4 Parameter statistical values of control methods

		MPC	FMPC	VUFMPC	优化量%	
					VUFMPC/MPC	VUFMPC/FMPC
超调量/%	90 km/h	22.9	15.2	4.1	18.8	11.1
	120 km/h	30.6	18.4	6.7	23.9	11.7
上升时间/s	90 km/h	0.42	0.38	0.32	23.8	15.8
	120 km/h	0.43	0.29	0.26	39.5	10.3
峰值时间/s	90 km/h	0.94	0.82	0.64	31.9	21.9
	120 km/h	0.96	0.71	0.55	42.7	22.5
过渡时间/s	90 km/h	1.96	1.18	0.62	68.4	47.5
	120 km/h	2.24	1.03	0.43	80.8	58.3

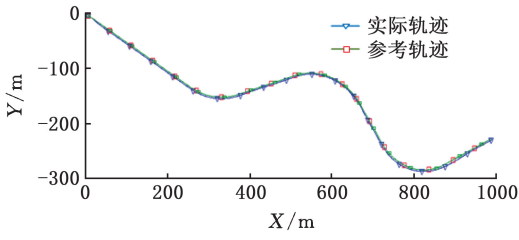
3.3 MPC/FMPC/VUFMPC 的轨迹跟踪试验

基于 3.1 节的试验条件, MPC、FMPC 和 VUFMPC 的轨迹跟踪试验结果见图 8。轨迹跟踪误差见图 9。由图 9 可见,跟踪误差较大的区间主要集中在弯道。结合表 5 的统计值可知,相较于 MPC、FMPC,VUFMPC 的最大值误差分别减小了 78.8%、53.6%,均值误差分别减小了 38.1%、31.6%,说明 VUFMPC 可有效减小该车转向过程的轨迹跟踪误差。

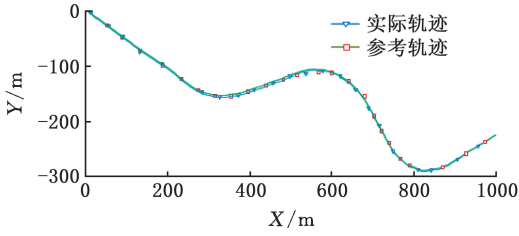
4 行驶稳定性分析

横摆角速度与横向速度组成的相平面可反映汽车行驶过程中的稳定性^[22-23]。建立横向速度和横摆角速度的相平面包络区域,制定行驶稳定性判据,结合式(3)~式(5)将后轮的侧偏角限制在 $[-\alpha_{rlim}, \alpha_{rlim}]$,有

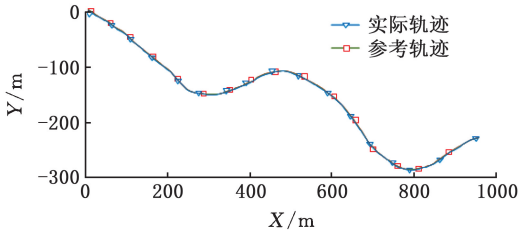
$$\left. \begin{aligned} \alpha_{rlim} &\leq \frac{v_y - l_r \dot{\varphi}}{v_x} \leq \alpha_{rlim} \\ |\dot{\varphi}| &\leq \frac{\bar{C}_{ar} \alpha_{rmax} (1 + l_r/l_f)}{m v_x} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$



(a)MPC



(b)FMPC



(c)VUFMPC

图 8 轨迹跟踪(90 km/h)

Fig.8 Ttrajectory tracking(90 km/h)

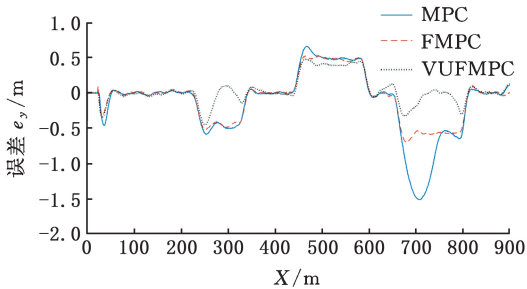


图 9 轨迹跟踪误差(90 km/h)

Fig.9 Trajectory tracking error(90 km/h)

表 5 误差统计值

Tab.5 Error statistical values

跟踪误差 $ e_y /m$		MPC	FMPC 对 MPC 的优化量	VUFMPC 对 MPC、FMPC 的优化量
弯道 R_1	最大值	0.58	0.52 10.3%	0.45 22.4%、13.5%
	均值	0.31	0.28 9.67%	0.16 48.4%、42.9%
弯道 R_2	最大值	0.66	0.52 21.2%	0.48 27.3%、7.7%
	均值	0.35	0.29 17.1%	0.24 27.2%、17.2%
弯道 R_3	最大值	1.51	0.69 18%	0.32 78.8%、53.6%
	均值	0.77	0.41 46.7%	0.17 77.9%、58.5%
均值		0.21	0.19 9.5%	0.13 38.1%、31.6%

根据表 3 相关参数,计算 v_y 、 $\dot{\varphi}$,得

$$\left. \begin{aligned} -10.5 \text{ m/s} \leq v_y \leq 5.33 \text{ m/s} \\ -28.5^\circ/\text{s} \leq \dot{\varphi} \leq 28.8^\circ/\text{s} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

根据式(23)组成一个封闭的包络区域,如图 10 所示。交点的坐标依次为 A(-10.5, 28.8)、B(5.33, 28.8)、C(10.51, -28.5)、D(-5.33, -28.5)。

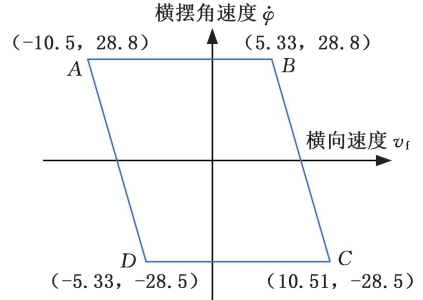


图 10 横向速度与横摆角速度包络区域

Fig.10 Envelope region of lateral speed and yaw rate

由 3.3 节的试验结果获得该车横向速度与横摆角速度变化关系(图 11),结合表 6 统计值可知,三种控制器的横向速度和横摆角速度变化范围均在包络区域内,说明车速为 90 km/h 时汽车行驶过程未出现失稳现象。另外,三种控制器的横摆角速度变化范围较接近,表明模型预测控制方法可有效约束汽车的横摆特性。相较于 MPC, FMPC 的横向速度最大优化量为 28.6%; VUFMPC 与 MPC、FMPC 相比,横向速度最大优化量分别为 52.3%和 33.5%,说明本文提出的 VUFMPC 可有效提高该车高速轨迹跟踪过程的横向稳定性。

5 极限工况轨迹跟踪及稳定性分析

基于 3.3 节试验条件,不断增大车速,由图 12a 可知,当车速增至 113 km/h 时,MPC 超调严重,该车行驶至弯道 R_3 时偏离参考轨迹,且后续不能完成对参考轨迹的跟踪;结合图 12b 可知,横摆角速度最大值为 $30^\circ/\text{s}$,最大横向速度为 -15 km/h ,均已经超越包络线约束范围极限,汽车失稳并导致事故。图 12c 所示为采用 FMPC 该车车速为 120 km/h 的轨迹跟踪结果,结合图 12d 可知,该车横向速度和横摆角速度已超出包络区域,相较于 MPC,FMPC 的横向速度变化相对较小,但由于横摆角速度变化较大,汽车行驶中出现较大幅度横摆现象,导致该车行驶至弯道 R_3 时偏离参考轨迹,出现较大的轨迹跟踪误差。图 12e 所示为采用 VUFMPC 且车速为 120 km/h 的轨迹跟踪结果,由图可见,VUFMPC 具有较好的轨迹跟踪能力,结合图 12f 可知,该车的横向速度变化

表 6 横向速度与横摆角速度变化统计表

Tab.6 Statistical values of lateral speed and yaw rate

参数	MPC	FMPC 对 MPC 的优化量	VUFMPC 对 MPC、 FMPC 的优化量
横向速度 $v_y / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$[-6.48, 5.07]$	$[-4.65, 3.62]$ 28.2%~28.6%	$[-3.09, -2.50]$ 52.3%~50.7%、 33.5%~30.9%
横摆角速度 $\dot{\phi} / (^\circ \cdot \text{s}^{-1})$	$[17.7, -15.2]$	$[17.8, -15.1]$ -0.56%~0.66%	$[17.5, -15.1]$ 0.66%~1.13%、 0~1.69%

范围为 $-5 \sim 4 \text{ km/h}$,横摆角速度范围为 $(-20 \sim 18)^\circ/\text{s}$,横向速度和横摆角速度均在包络区范围内。

由此可见,在极限工况下,误差权重和控制增量权重为定值的传统模型预测控制方法的控制量不能根据输出误差自适应调整,导致汽车高速轨迹跟踪过程失稳。采用 FMPC,通过经验制定的模糊规则可以实现根据误差自适应调整控制量,并在一定程度上提高轨迹跟踪精度和行驶稳定性,但当道路曲率不断变化,尤其是汽车转向行驶接近附着极限时,通过先验知识给定的论域不能避免系统超调,导致高速行驶转向过程出现较大的横摆现象。而采用变论域模糊模型预测控制方法可实现 FMPC 的论域根据跟踪误差在线自适应伸缩调整,确保系统变量在论域范围内可控,提高行驶稳定性的同时兼顾轨迹跟踪精度。

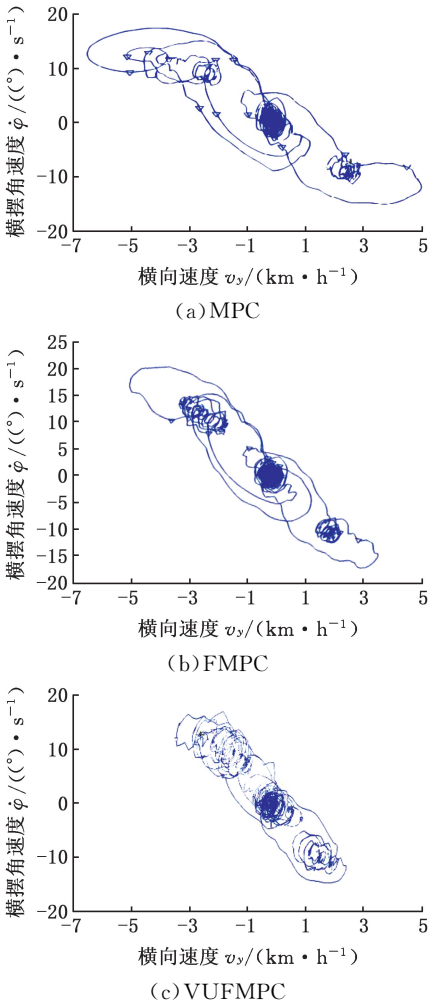


图 11 横向速度与横摆角速度的变化关系(90 km/h)
Fig.11 Relationship between lateral speed and yaw rate (90 km/h)

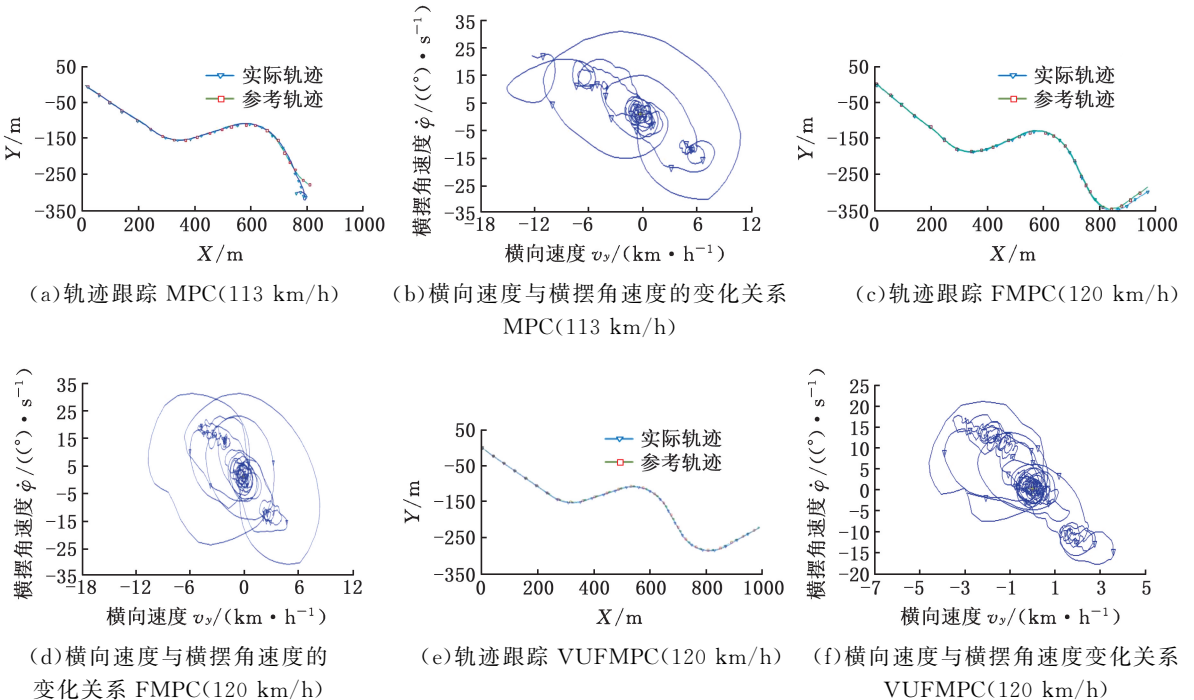


图 12 极限工况轨迹跟踪试验

Fig.12 Extreme condition trajectory tracking experiment

6 结论

本文针对高速行驶的智能汽车轨迹跟踪及稳定控制问题提出一种基于变论域模糊模型预测控制(VUFMPC)控制方法,该方法根据模型预测控制(MPC)、模糊模型预测控制(FMPC)、变论域模糊控制(VUFC),实现了控制器参数跟随系统误差自适应整定。通过试验对比分析 MPC、FMPC、VUFMPC,得出以下结论。

1) VUFMPC 的超调量较小,过渡时间短且响应速度快,提高了智能汽车高速行驶转向过程的实时性和可控性。

2) 汽车行驶速度为 90 km/h 时,相较于 MPC 和 FMPC, VUFMPC 的均值误差分别减小了 38.1% 和 31.6%,最大误差分别减小 78.8% 和 53.6%,有效解决传统模型预测控制方法轨迹跟踪精度低的问题。

3) 通过行驶稳定性分析得出,相较于 MPC 和 FMPC, VUFMPC 的横向速度最大值减小了 52.3% 和 33.5%,说明基于变论域的模糊模型预测控制方法可有效约束横向速度变化,提高横向稳定性。

4) 极限工况分析发现, VUFMPC 对试验汽车有较好的控制能力,行驶平稳且轨迹平滑,表明本文提出的 VUFMPC 使智能汽车轨迹跟踪误差显著减小,高速行驶更稳定,减少事故发生。

参考文献:

[1] 钱玉宝, 余米森, 郭旭涛, 等. 无人驾驶车辆智能控制技术发展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 3846-3858.
QIAN Yubao, YU Misen, GUO Xutao, et al. Development of Intelligent Control Technology for Unmanned Vehicle[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(10): 3846-3858.

[2] 采国顺, 刘昊吉, 冯吉伟, 等. 智能汽车的运动规划与控制研究综述[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(3): 279-297.
CAI Guoshun, LIU Haoji, FENG Jiwei, et al. Review on the Research of Motion Planning and Control for Intelligent Vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(3): 279-297.

[3] YAO Yongqiang, MA Nan, WANG Cheng, et al. Research and Implementation of Variable-domain Fuzzy PID Intelligent Control Method Based on Q-learning for Self-driving in Complex Scenarios[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2023, 20(3): 6016-6029.

[4] 张栩源, 李军. 基于 LQR 双 PID 的智能电动汽车轨迹跟踪横纵向协同控制[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(3): 346-354.
ZHANG Xuyuan, LI Jun. Lateral and Longitudinal Coordinated Control for Intelligent-electric-vehicle Trajectory-tracking Based on LQR-dual-PID [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(3): 346-354.

[5] NIE Yanxin, ZHANG Minglu, ZHANG Xiaojun. Trajectory Tracking Control of Intelligent Electric Vehicles Based on the Adaptive Spiral Sliding Mode [J]. Applied Sciences, 2021, 11(24): 11739.

[6] WANG Binyu, LEI Yulong, FU Yao, et al. Autonomous Vehicle Trajectory Tracking Lateral Control Based on the Terminal Sliding Mode Control with Radial Basis Function Neural Network and Fuzzy Logic Algorithm[J]. Mechanical Sciences, 2022, 13(2): 713-724.

[7] SHET R M, LAKHEKAR G V, IYER N C. Design of Quasi Fuzzy Sliding Mode Based Maneuvering of Autonomous Vehicle[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2024, 12(6): 1963-1986.

[8] PANG Hui, LIU Nan, HU Chuan, et al. A Practical Trajectory Tracking Control of Autonomous Vehicles Using Linear Time-varying MPC Method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2022, 236(4): 709-723.

[9] ZOU Kai, CAI Yingfeng, CHEN Long, et al. Event-triggered Nonlinear Model Predictive Control for Trajectory Tracking of Unmanned Vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2023, 237(10/11): 2474-2483.

[10] 金辉, 鲁坤. 基于多参数自适应优化的智能车轨迹跟踪[J]. 中国公路学报, 2023, 36(5): 260-272.
JIN Hui, LU Kun. Intelligent Vehicle Trajectory Tracking Based on Multi-parameter Adaptive Optimization[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(5): 260-272.

[11] 龚建伟, 龚乘, 林云龙, 等. 智能车辆规划与控制策略学习方法综述[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(7): 665-674.
GONG Jianwei, GONG Cheng, LIN Yunlong, et al. Review on Machine Learning Methods for Motion Planning and Control Policy of Intelligent Vehicles [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(7): 665-674.

[12] ROKONUZZAMAN M, MOHAJER N, NAHAVANDI S. Effective Adoption of Vehicle Models

- for Autonomous Vehicle Path Tracking: a Switched MPC Approach[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2023, 61(5):1236-1259.
- [13] 王国栋, 刘洋, 李绍松, 等. 基于轮胎状态刚度预测的极限工况路径跟踪控制研究[J]. *自动化学报*, 2022, 48(6):1590-1600.
WANG Guodong, LIU Yang, LI Shaosong, et al. Research on Path Tracking Control under Limit Conditions Based on Tire State Stiffness Prediction [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(6):1590-1600.
- [14] YE Xingyu, ZHU Shaopeng, CHEN Sen. Research on Model Predictive Trajectory Following Control of Automatic Vehicle Considering Prediction Error [J]. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 2021, 21(1):52.
- [15] LI Cong, XIE Yunfeng, WANG Gang, et al. Lateral Stability Regulation of Intelligent Electric Vehicle Based on Model Predictive Control[J]. *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*, 2021, 4(3):104-114.
- [16] 邱利宏, 钱立军, 杜志远, 等. 车联网环境下车辆最优车速闭环快速模型预测控制[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(10):1245-1252.
QIU Lihong, QIAN Lijun, DU Zhiyuan, et al. A Closed-loop FMPC of Optimal Velocities for Connected Vehicles [J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(10):1245-1252.
- [17] 杨彬, 宋学伟, 高振海. 考虑车辆运动约束的最优避障轨迹规划算法[J]. *汽车工程*, 2021, 43(4):562-570.
YANG Bin, SONG Xuewei, GAO Zhenhai. Optimal Obstacle Avoidance Trajectory Planning Algorithm Considering Vehicle Motion Constraints[J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(4):562-570.
- [18] 裴红蕾. 智能汽车换道避障路径规划与跟踪方法[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(9):26-32.
PEI Honglei. Method of Path Planning and Tracking for Intelligent Vehicle Obstacle Avoidance by Lane Changing[J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(9):26-32.
- [19] JI Guanggang, LI Shaohua, FENG Guizhen, et al. Enhanced Variable Universe Fuzzy Control of Vehicle Active Suspension Based on Adaptive Contracting-expanding Factors[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2023, 25(8):2986-3000.
- [20] 邵诚, 董希文, 王晓芳. 变论域模糊控制器伸缩因子的选择方法[J]. *信息与控制*, 2010, 39(5):536-541.
SHAO Cheng, DONG Xiwen, WANG Xiaofang. Selection Method of the Contraction-expansion Factor of Variable Universe Fuzzy Controller[J]. *Information and Control*, 2010, 39(5):536-541.
- [21] SAIN D, MOHAN B M. Modeling, Simulation and Experimental Realization of a New Nonlinear Fuzzy PID Controller Using Center of Gravity Defuzzification [J]. *ISA Transactions*, 2021, 110:319-327.
- [22] FUNKE J, BROWN M, ERLIEN S M, et al. Collision Avoidance and Stabilization for Autonomous Vehicles in Emergency Scenarios[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(4):1204-1216.
- [23] 刘凯, 龚建伟, 陈舒平, 等. 高速无人驾驶车辆最优运动规划与控制的动力学建模分析[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(14):141-151.
LIU Kai, GONG Jianwei, CHEN Shuping, et al. Dynamic Modeling Analysis of Optimal Motion Planning and Control for High-speed Self-driving Vehicles [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(14):141-151.

(编辑 王旻玥)

作者简介:何 洋,男,1982年生,副教授。研究方向为智能驾驶技术。E-mail:heyang121000@163.com。李 刚*(通信作者),男,1979年生,教授。研究方向为车辆系统动力学及控制、智能电动汽车底盘集成与测试、智能车辆驾驶技术。E-mail:lnitligang@126.com。

本文引用格式:

何洋,李刚,余孝楠.基于变论域的高速行驶智能汽车模糊模型预测控制方法研究[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(3):604-613.

HE Yang, LI Gang, YU Xiaonan. Research on Fuzzy Model Predictive Control Method for High Speed Intelligent Vehicles Based on Variable Universe[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(3):604-613.