



# 基于 PIDSM-AF 的智能车辆横向控制研究

## 摘要

路径跟踪精度是智能车辆安全自主行驶的基础。为解决滑模控制系统的抖振问题,提高路径跟踪控制器的控制精度,提出一种引入激活函数的 PID 积分滑模控制策略 (PID Integral Sliding Mode control strategy with Activation Function, PIDSM-AF)。首先,以二自由度车辆模型为基础,将车辆的动力学模型拆解为横向偏差模型,建立横向控制模型。然后,采用极值法,建立融合了航向角偏差和横向偏差的积分滑模面。考虑到一般指数趋近律难以消除的系统抖振问题,在改进指数趋近律的基础上引入可调节系统状态接近滑模面时速率的非线性激活函数,设计了一种基于激活函数滑模控制的横向路径跟踪控制器。最后,通过 Carsim/Simulink 联合仿真对改进的滑模控制器进行双移线路况测试。结果表明,与传统的终端滑模控制器相比,优化后的积分滑模控制器的跟踪精度在低速低附着工况、高速高附着工况下的最大横向偏差分别减少约 64%、34.9%,平均横向偏差分别减少约 68.4%、59.7%,且优化后的控制器有效地抑制了车辆航向角、前轮转角的抖振超调变化,具有较强的鲁棒性。

## 关键词

路径跟踪;滑模控制;智能汽车;横向控制

中图分类号 U463.6;TP273

文献标志码 A

收稿日期 2024-03-26

资助项目 江苏省重点研发计划(产业前瞻与关键核心技术)(BE2022053-2);江苏省重点研发计划(现代农业)(BE2021339);南京林业大学青年科技创新基金(CX2019018)

## 作者简介

张涌,男,博士,教授,主要从事智能汽车控制技术方面的研究.zy@njfu.edu.cn

赵奉奎(通信作者),男,博士,讲师,主要从事智能汽车环境感知技术方面的研究.zfk@njfu.edu.cn

## 0 引言

如今,人工智能的迅速发展为自动驾驶带来了新的机遇与挑战。自动驾驶不仅可以提高驾驶安全性、舒适性,降低交通事故发生率,还能提高城市交通效率、降低交通排放,是智能交通和智慧城市建设的关键技术<sup>[1]</sup>。车辆路径跟踪控制的高精度是无人驾驶的核心之一,也是智能车辆行驶的基础。针对车辆自主行驶的控制策略研究,即要尽量保证智能车辆实际行驶的路线与目标路径重合,降低车辆实际行驶路径相对于目标路径的横向位置偏差与航向角偏差,继而保证智能汽车路径跟踪控制的精确<sup>[2-3]</sup>。

当前,主流的路径跟踪控制方法有两种:一是基于几何的控制方法,二是基于模型的控制方法。基于几何的方法主要有纯追踪(pure pursuit)<sup>[4-5]</sup>和 Stanley<sup>[6-7]</sup>,但几何方法忽视了车辆的动力特性。针对高度非线性、具有强耦合的复杂动力学系统的自动驾驶车辆而言,应用基于模型的路径跟踪策略更加契合<sup>[8-9]</sup>。基于车辆动力学模型的路径跟踪方法,综合考虑了车辆的复杂动力学特性和道路环境因素(如路面附着系数、道路曲率),大大提高了车辆在各种复杂行驶工况下的跟踪精度和安全性。近年来,学者们针对车辆动力学模型的路径跟踪控制方法做了大量研究,如 PID (Proportional-Integral-Derivative) 控制<sup>[10-11]</sup>、Fuzzy 逻辑控制<sup>[12]</sup>、MPC (Model Predictive Control) 控制<sup>[13-16]</sup>、LQR (Linear Quadratic Regulator) 控制<sup>[17-20]</sup>、滑模控制 (SMC, Sliding Mode Control)<sup>[21]</sup>等。滑模控制系统具有强大的抗干扰能力和快速的响应速度,是一种高度可靠且有效的控制方法,其独特的设计使得系统能够在复杂的环境下稳定地控制目标变量,不受外界干扰的影响。Imine 等<sup>[22]</sup>构建了一种基于超扭曲算法滑模控制器,其主要功能是精确控制车辆的横向偏差和偏航角偏差,从而有效地跟踪目标路径。王家恩等<sup>[23]</sup>以横摆角速度为导向,设计了一种基于多自由度动力学模型和滑模控制的控制器,实现了车辆跟踪的稳定性。Han 等<sup>[24]</sup>提出一种新的具有动态系数的到达定律并基于滑模控制的轨迹跟踪方法,加快了控制器的响应速度。Sabiha 等<sup>[25]</sup>考虑实际运行情况下车辆滑移的因素,基于车辆动力学设计了一种改进的滑模控制器,有效地优化了控制效益。

为解决传统滑模控制带来的抖振问题,进一步提升跟踪控制性能,本文提出一种改进的积分滑模控制策略 (PID Integral Sliding Mode

<sup>1</sup> 南京林业大学 汽车与交通工程学院,南京,210037

Control Strategy with Activation Function, PIDSM-AF). 首先, 基于车辆二自由度动力学模型, 建立横向偏差模型, 并以此为基础建立横向控制模型. 在一般的PID积分滑模控制器设计基础上, 引入融合了航向角偏差和横向偏差的积分滑模面. 为进一步提高滑模态运动的品质, 在优化后的趋近律的基础上, 引入可调节系统状态接近滑模面时速率的非线性激活函数. 最后, 通过Carsim/Simulink联合仿真对所设计的控制器在不同的行驶工况下进行路径跟踪仿真实验, 验证其有效性.

## 1 车辆模型

### 1.1 车辆动力学模型

智能车辆是一个非线性且极度复杂的系统, 具有高度复杂的运动特性. 运动学模型显然不足以具体表述车辆的运动特性. 系统模型过于复杂时, 计算量大大增加, 控制系统的时效性便会降低, 影响车辆的跟踪效果. 为此, 本文在简化车辆系统的基础上, 建立二自由度车辆动力学模型, 如图1所示. 本文的研究重点在于车辆的路径跟踪精度和横向稳定性, 故作如下设定:

1) 忽略车身和4个车轮垂直于地面方向的运动自由度, 以及车身俯仰运动方向上的自由度.

2) 忽略路面不平对车辆的影响, 忽略坡度、空气阻力的影响.

3) 在一定速度下行驶时, 汽车轮胎会变形产生侧偏角, 故建模过程中考虑转向轮轮胎的侧偏特性, 即  $F_y = C\alpha$ , 其中,  $C$  为侧偏刚度,  $\alpha$  为侧偏角.

基于以上设定, 将车辆简化成左右对称的模型, 即忽略车轮的间距, 建立如图1所示的自行车模型. 图1中:  $a, b$  分别为前后轴到质心的距离;  $\beta$  为质心侧偏角;  $\varphi$  为车辆坐标系  $x$  轴与大地坐标系  $X$  轴之间的夹角, 即横摆角;  $\dot{\varphi}$  为横摆角速度;  $\alpha_f, \alpha_r$  分别为前轮、后轮的侧偏角;  $\delta$  为前轮转角;  $F_{y-f}, F_{y-r}$  分别为前轮、后轮的侧偏力;  $v$  为质心处的速度, 且正常情况下不与车身下的坐标系  $x$  轴重合;  $v_f, v_r$  分别为前轮、后轮的速度.

基于牛顿第二定律以及动量定理, 对图1的动力学模型分析可得二自由度车辆动力学模型微分方程为

$$\begin{cases} F_y = ma_y = F_{y-f}\cos\delta + F_{y-r}, \\ I_z\ddot{\varphi} = aF_{y-f}\cos\delta - bF_{y-r}. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $m$  表示整车的质量;  $a_y$  表示车辆行驶过程中的

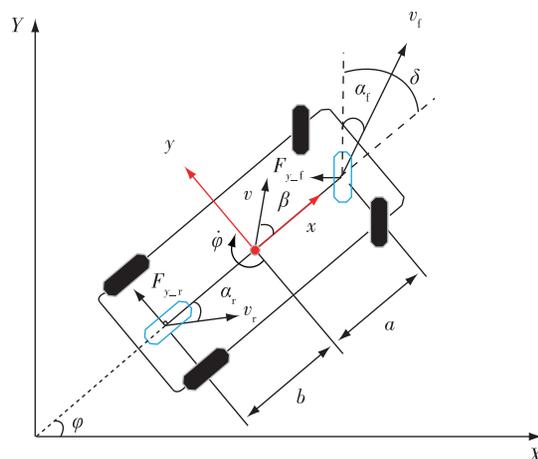


图1 二自由度车辆动力学模型

Fig. 1 Two-degree-of-freedom vehicle dynamics model

横向加速度;  $I_z$  为车辆质心绕与地面垂直方向轴的转动惯量;  $\varphi$  为车辆行驶途中的横摆角, 故  $\ddot{\varphi}$  为其横摆角加速度.

车辆匀速行驶时, 其横向车身相对稳定, 假设前轮转角  $\delta$  较小,  $\cos\delta \approx 1$ , 再根据轮胎的侧偏特性以及刚体的运动学知识, 上述二自由度车辆动力学模型微分方程可改写为

$$\begin{cases} m(v_y + v_x\dot{\varphi}) = C_{\alpha_f}\left(\frac{a\dot{\varphi} + v_y}{v_x} - \delta\right) + C_{\alpha_r}\left(\frac{v_y - b\dot{\varphi}}{v_x}\right), \\ I_z\ddot{\varphi} = aC_{\alpha_f}\left(\frac{a\dot{\varphi} + v_y}{v_x} - \delta\right) - bC_{\alpha_r}\left(\frac{v_y - b\dot{\varphi}}{v_x}\right). \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $v_x, v_y$  分别为车辆纵向、横向行驶速度;  $\dot{\varphi}$  为车辆横摆角速度;  $C_{\alpha_f}, C_{\alpha_r}$  分别为车辆前轮、后轮的侧偏刚度.

为便于精确计算, 将车辆动力学模型改为如下的状态空间方程的形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_{\alpha_f} + C_{\alpha_r}}{mv_x} & \frac{aC_{\alpha_f} - bC_{\alpha_r}}{mv_x} - v_x \\ aC_{\alpha_f} - bC_{\alpha_r} & a^2C_{\alpha_f} + b^2C_{\alpha_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{C_{\alpha_f}}{m} \\ aC_{\alpha_f} \\ -\frac{I_z}{I_z} \end{bmatrix} \delta. \quad (3)$$

### 1.2 车辆横向偏差跟踪控制模型

为了使车辆具有更精细的横向控制, 从而提高车辆的跟踪性能, 本文以动力学模型为基础, 在

Frenet 自然坐标系下建立动力学偏差模型,如图 2 所示.图 2 中:  $s$  表示规划的路径轨迹;  $o$  表示车辆当前位置;  $o_1$  表示该时刻车辆所对应规划路径的投影点位置;  $\theta$  为该时刻车辆所在位置对应的航向角;  $\theta_r$  表示对应规划路径投影点的航向角;  $k, k_r$  分别为  $o$  和  $o_1$  的位置矢量;  $\vec{n}, \vec{\tau}$  分别为投影点  $o_1$  的法向单位向量和切向单位向量;  $e_d$  表示横向偏差,其定义为当前位置点  $o$  到对应规划路径上投影点  $o_1$  之间的距离.

基于上述内容以及图 2,可得横向偏差  $e_d = (\vec{k} - \vec{k}_r) \cdot \vec{n}_r$ , 经求导变换得  $\dot{e}_d = (\dot{\vec{k}} - \dot{\vec{k}}_r) \cdot \vec{n}_r + (\vec{k} - \vec{k}_r) \cdot \dot{\vec{n}}_r$ , 再经 Frenet 公式变换得:

$$\dot{e}_d = v_x e_\varphi + v_y \quad (4)$$

其中,  $e_\varphi$  为航向角偏差.

由于车辆高速行驶时,质心侧偏角  $\beta$  往往小到可忽略不计,故定义航向角偏差  $e_\varphi = \varphi - \theta_r$ , 两边对时间  $t$  求导一次可得:

$$\dot{e}_\varphi = \dot{\varphi} - \dot{\theta}_r = \dot{\varphi} - v_x \rho \quad (5)$$

对式(4)、(5)两边求导可得:

$$\begin{cases} \ddot{e}_d = \dot{v}_x e_\varphi + v_x \dot{e}_\varphi + \dot{v}_y, \\ \ddot{e}_\varphi = \ddot{\varphi} - \dot{v}_x \rho - v_x \dot{\rho}. \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\rho$  为道路曲率.

综上所述,基于动力学模型所得的动力学偏差模型方程为

$$\begin{cases} \dot{e}_\varphi = \dot{\varphi} - v_x \rho, \\ \ddot{e}_\varphi = \ddot{\varphi} - \dot{v}_x \rho - v_x \dot{\rho}, \\ \dot{e}_d = v_x e_\varphi + v_y, \\ \ddot{e}_d = \dot{v}_x e_\varphi + v_x \dot{e}_\varphi + \dot{v}_y. \end{cases} \quad (7)$$

将动力学偏差模型方程(7)代入车辆动力学模型微分方程(2)得:

$$\ddot{e}_d = \left( \frac{C_{\alpha_f} + C_{\alpha_r}}{m v_x} \right) \dot{e}_d + \left( -\frac{C_{\alpha_f} + C_{\alpha_r}}{m} \right) e_\varphi + \left( \frac{a C_{\alpha_f} - b C_{\alpha_r}}{m v_x} \right) \dot{e}_\varphi + \left( -\frac{a C_{\alpha_f}}{m} \right) \delta + \left( \frac{a C_{\alpha_f} - b C_{\alpha_r}}{m} \right) \rho - \rho v_x^2 + v_x e_\varphi, \quad (8)$$

$$\ddot{e}_\varphi = \left( \frac{a C_{\alpha_f} - b C_{\alpha_r}}{I_z v_x} \right) \dot{e}_d + \left( -\frac{a C_{\alpha_f} - b C_{\alpha_r}}{I_z} \right) e_\varphi + \left( \frac{a^2 C_{\alpha_f} + b^2 C_{\alpha_r}}{I_z v_x} \right) \dot{e}_\varphi + \left( -\frac{a C_{\alpha_f}}{I_z} \right) \delta + \left( \frac{a^2 C_{\alpha_f} + b^2 C_{\alpha_r}}{I_z} \right) \rho - v_x \dot{\rho} - v_x \rho. \quad (9)$$

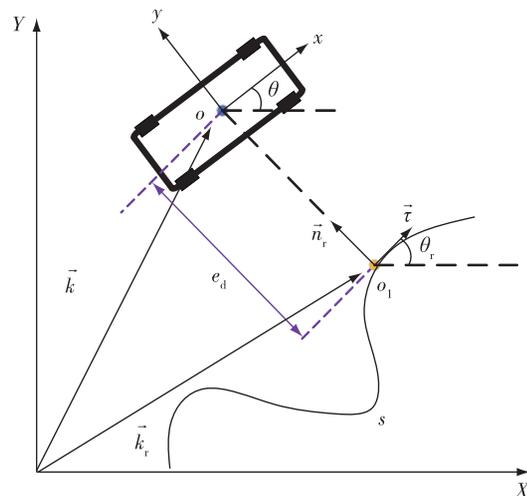


图 2 车辆动力学横向偏差模型

Fig. 2 Lateral deviation model for vehicle dynamics

联立动力学模型式(2)–(3)和横向偏差模型式(7)–(9)可得车辆横向控制模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \left( \frac{C_{\alpha_f} + C_{\alpha_r}}{m v_x} \right) x_2 + \left( -\frac{C_{\alpha_f} + C_{\alpha_r}}{m} \right) x_3 + \left( \frac{a C_{\alpha_f} - b C_{\alpha_r}}{m v_x} \right) x_4 + \left( -\frac{a C_{\alpha_f}}{m} \right) u + \left( \frac{a C_{\alpha_f} - b C_{\alpha_r}}{m} \right) \rho - \rho v_x^2 + v_x x_3, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = \left( \frac{a C_{\alpha_f} - b C_{\alpha_r}}{I_z v_x} \right) x_1 + \left( -\frac{a C_{\alpha_f} - b C_{\alpha_r}}{I_z} \right) x_3 + \left( \frac{a^2 C_{\alpha_f} + b^2 C_{\alpha_r}}{I_z v_x} \right) x_4 + \left( -\frac{a C_{\alpha_f}}{I_z} \right) u + \left( \frac{a^2 C_{\alpha_f} + b^2 C_{\alpha_r}}{I_z} \right) \rho - v_x \dot{\rho} - v_x \rho. \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $x_1 = e_d$ ;  $x_2 = \dot{e}_d$ ;  $x_3 = e_\varphi$ ;  $x_4 = \dot{e}_\varphi$ ; 输入量  $u$  为前轮转角  $\delta$ .

## 2 改进的滑模控制器设计

PIDSM-AF 路径跟踪控制器的整体结构如图 3 所示.

整体控制器需要的输入量有:1) 车辆整车参数; 2) 参考路径规划点信息等; 3) 车辆位置信息以及车辆状态参数.

控制过程如下: 1) 参考路径和车辆状态等相关信息传输至横向控制模块; 2) 计算模块与横向控制

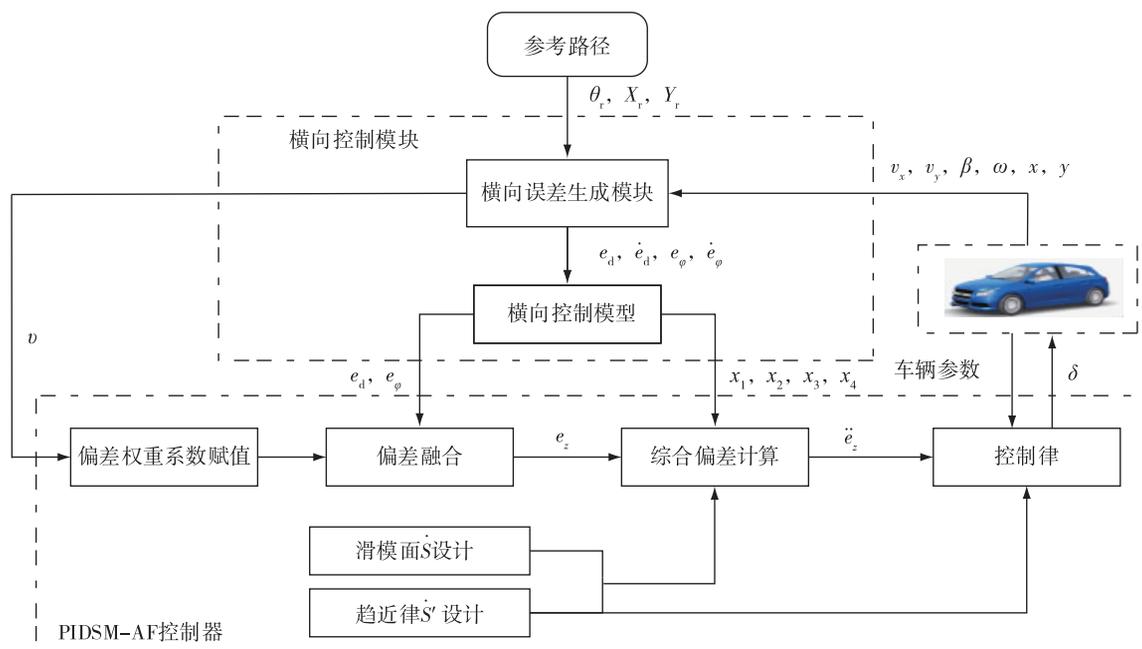


图3 控制结构

Fig. 3 Control structure

模型结合,共同处理输入信息,并输出偏差控制参数;3)PIDSM-AF滑模控制器接收横向控制模块、车辆参数以及综合车速等信息,最终输出控制律  $u$ ,即前轮转角  $\delta$ ,通过调整前轮转角实现路径跟踪,实现闭环控制。

## 2.1 滑模面设计

### 2.1.1 积分滑模面设计

滑模控制是一种鲁棒性较强的控制方法,它通过引入滑动模态来消除系统中的不确定性和扰动。滑模控制的基本思想是将系统的状态引入到一个滑动面上,使得系统状态在此滑动面上运动并在此面上保持稳定。滑动面的引入可以使系统对于外部扰动和参数变化具有很强的鲁棒性,从而提高控制系统的稳定性。

本文将积分滑模面设计为如下形式:

$$s(t) = k_d \dot{x}(t) + k_p x(t) + k_i \int_0^t x(t) dt. \quad (11)$$

式中:  $x \in \mathbf{R}$ ;  $k_d, k_p, k_i$  分别为微分、比例和积分系数,是非零的正常数。比例项用于纠正状态偏差;积分项用于消除系统的稳态偏差;微分项用于反映系统偏差信号的变化率,产生超前的控制作用,改善系统的动态性能。因此,在积分型滑模面上,改变  $k_d, k_p, k_i$  的数值即可改变滑模面上的动态特性。积分滑模结合PID控制、积分控制和滑模控制的特点,使得系统对于参数变化、外部干扰等具有更强的鲁棒性和更

好的稳定性。相较于终端滑模、快速终端滑模和非奇异终端滑模控制,积分滑模引入了积分项  $\int_0^t x(t) dt$ ,有助于减小系统的抖振,特别是存在静态偏差时,能够加快偏差收敛速度,使得系统能够更快地达到期望状态。

### 2.1.2 横向偏差与航向角偏差融合

智能车辆跟随参考轨迹时,控制器主要针对前轮转角进行控制,使得车辆循迹路线与参考路线之间的横向偏差  $e_d$  和航向角偏差  $e_\varphi$  趋于0,从而提升跟踪性能。但在PID积分滑模控制中,输入量的增加会导致控制器的维数增加,从而增加了系统的复杂性和计算量。直接将两个偏差函数及其微分作为输入可能会生成高维的控制器,导致运行时间延长,难以满足实时控制的需求。因此,为了降低控制器的维数,可以采取融合的方法处理横向和方位偏差,生成集成偏差,并将集成偏差及其微分作为系统的输入。通过这种方式,可以将高维的控制器转化为更易于实现的二维控制器。采用极值法对两个偏差进行无量纲化处理。处理过程如下:

$$\begin{cases} e_{d, \text{scaled}} = \frac{e_d - e_{d, \text{min}}}{e_{d, \text{max}} - e_{d, \text{min}}}, \\ e_{\varphi, \text{scaled}} = \frac{e_\varphi - e_{\varphi, \text{min}}}{e_{\varphi, \text{max}} - e_{\varphi, \text{min}}}. \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $e_{d, \text{scaled}}$  为无量纲化后的横向偏差;  $e_{\varphi, \text{scaled}}$  为无

量化后的航向角偏差.为便于集成控制,对  $e_{d,scaled}$ ,  $e_{\varphi,scaled}$  引入权重系数,得到融合后的集成偏差

$$e_z = m_1 e_{d,scaled} + m_2 e_{\varphi,scaled}. \quad (13)$$

式中:  $m_1$  为横向偏差系数,  $m_2$  为航向角偏差系数,  $m_1, m_2$  均为正实数,  $m_1 + m_2 = 1$ . 本文基于仿真结果、实验数据以及已有的经验知识进行离线优化,根据车辆车速和偏差参数之间的关系,记录不同车速下对应的偏差系数取值.以此为基础,结合梯度下降法进行离线调节和优化,建立如式(14)所示目标函数,通过不断调节集成偏差的权重系数  $m_1, m_2$ ,使生成横向位置偏差和航向角偏差曲线趋于平缓、无明显震荡,并使偏差变化范围控制在很小的区间内.

$$J = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (m_1 e_{d,scaled}^2 + m_2 e_{\varphi,scaled}^2). \quad (14)$$

为加快控制效率,提升控制精度,结合积分滑模面(11)、集成偏差(13)设计滑模面:

$$S = \lambda_1 e_z + \lambda_2 \dot{e}_z + \lambda_3 \int_0^t e_z dt. \quad (15)$$

式中:  $\lambda_1$  为滑模面系数  $k_p$ ;  $\lambda_2$  为滑模面系数  $k_d$ ;  $\lambda_3$  为滑模面系数  $k_i$ . 对式(15)两边时间  $t$  求导,得:

$$\dot{S} = \lambda_1 \dot{e}_z + \lambda_2 \ddot{e}_z + \lambda_3 e_z. \quad (16)$$

## 2.2 趋近律设计

在滑模控制的基础理论框架下,抖振问题是一项常见挑战.在那些对控制精度要求较高的场合,需要将抖振水平降低到极小,故解决抖振问题至关重要.抖振的发生源于运动点逐渐接近滑模面时所产生的高频振荡.良好的趋近律的设计应当确保系统状态在远离切换面时能够迅速趋近,在接近切换面时以适度速率趋近.在接近切换面时,若趋近速度过快,可能导致系统穿过滑模面,进而加剧抖振现象的发生.因此,确立合理的趋近律对于提高滑模控制中模态运动的品质具有关键意义.本文将一般的指数趋近律  $\dot{S} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - \varepsilon' s$  进行优化,引入包含阶跃函数的饱和函数  $\operatorname{sat}(s)$ , 其表达式为

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} 1, & s > \Delta; \\ ks, & |s| \leq \Delta, k = 1/\Delta; \\ -1, & s < -\Delta. \end{cases} \quad (17)$$

绘制式(17)的图象如图4所示.

图4表明,当系统状态逐渐接近滑模面时,其速度呈逐渐减小的趋势,最终趋于0,这一过程有效地减缓了抖振的发生.然而,尽管这种线性过渡具有一定的缓解效果,但其平滑度尚显不足.激活函数可以用于调节系统状态接近滑模面时的速率,通过选择

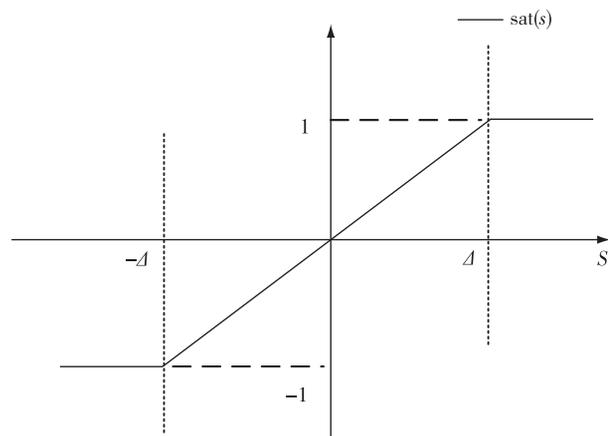


图4 饱和函数图象

Fig. 4 Saturated function graph

合适的激活函数,可以调整系统状态的趋近速度,从而控制系统的响应特性,改善系统的稳定性和性能.为此,在式(17)的基础上引入非线性饱和和激活函数,即双曲正切函数,修改后的饱和函数为

$$\operatorname{sat}'(s) = \tanh(s). \quad (18)$$

绘制式(18)的图象如图5所示.

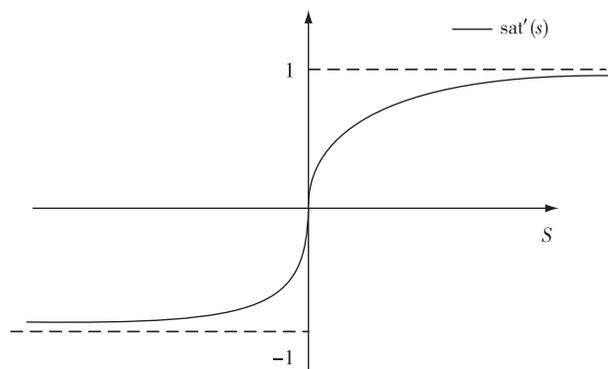


图5 激活函数图象

Fig. 5 Activation function graph

改进后的趋近律为

$$\dot{S}' = -\varepsilon \operatorname{sat}'(s) - \varepsilon' s. \quad (19)$$

其中,  $\varepsilon$  和  $\varepsilon'$  均为大于0的滑模参数.当采用式(19)的趋近律时,可得  $S' \dot{S}' = -[\varepsilon s \operatorname{tanh}(s) + \varepsilon' s^2]$ , 结合图4可知,  $s$  和  $\operatorname{tanh}(s)$  同号,且  $\varepsilon$  和  $\varepsilon'$  均大于0,故  $S' \dot{S}' < 0$ , 由李雅普诺夫判据可知系统稳定.

为建立滑模控制律方程,需在系统横向控制模型(10)的基础上,将积分滑模面(15)与改进后的趋近律(19)联立得综合偏差表达式:

$$\ddot{e}_z = H_1 + H_2 + H_3 \delta. \quad (20)$$

其中,  $H_1, H_2, H_3$  的表达式为

$$\begin{cases} H_1 = m_1 \left[ \left( \frac{C_{\alpha_f} + C_{\alpha_r}}{mv_x} \right) x_2 + \left( -\frac{C_{\alpha_f} + C_{\alpha_r}}{m} \right) x_3 + \right. \\ \left. \left( \frac{aC_{\alpha_f} - bC_{\alpha_r}}{mv_x} \right) x_4 \right] + m_2 \left[ \left( \frac{aC_{\alpha_f} - bC_{\alpha_r}}{I_z v_x} \right) x_2 + \right. \\ \left. \left( -\frac{aC_{\alpha_f} - bC_{\alpha_r}}{I_z} \right) x_3 + \left( \frac{a^2 C_{\alpha_f} + b^2 C_{\alpha_r}}{I_z v_x} \right) x_4 \right], \\ H_2 = m_1 \left[ \left( \frac{aC_{\alpha_f} - bC_{\alpha_r}}{m} \right) \rho - \rho v_x^2 + v_x e_\varphi \right] + \\ m_2 \left[ \left( \frac{a^2 C_{\alpha_f} + b^2 C_{\alpha_r}}{I_z} \right) \rho - v_x \rho - v_x \dot{\rho} \right], \\ H_3 = -\frac{aC_{\alpha_f} m_1}{m} - \frac{aC_{\alpha_f} m_2}{I_z}. \end{cases} \quad (21)$$

联立式(19)、(20)、(21)得控制律  $u$  的表达式如下:

$$u = \delta = -\frac{1}{\lambda_2 H_3} [\lambda_2 H_1 + \lambda_2 H_2 + \lambda_1 \dot{e}_z + \lambda_3 e_z + \varepsilon_1 \tanh(s) + \varepsilon_2 s]. \quad (22)$$

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真轨迹及车辆基本参数

用 Carsim/Simulink 进行联合仿真实验,验证本文提出的路径跟踪控制策略的有效性和适应性.车辆的主要参数如表 1 所示.

表 1 车辆参数

Table 1 Vehicle parameters

参数	取值
整车质量 $m/\text{kg}$	1 412
质心到前轴的距离 $a/\text{m}$	1.015
质心到后轴的距离 $b/\text{m}$	1.895
绕 Z 轴的转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1 536.7
前轮侧偏刚度 $C_{\alpha_f}/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-113 000
后轮侧偏刚度 $C_{\alpha_r}/\text{rad}^{-1}$	-90 000
轮胎型号	215/55 R17

车辆仿真轨迹采用双移线轨迹:

$$\begin{cases} Y_{\text{ref}}(X) = \frac{d_{o1}}{2} [1 + \tanh(b_1)] - \frac{d_{o2}}{2} [1 + \tanh(b_2)], \\ \varphi_{\text{ref}}(X) = \arctan \left[ d_{o1} \left( \frac{1}{\cosh(\gamma_1)} \right)^2 \left( \frac{1.2}{d_{r1}} \right) - \right. \\ \left. d_{o2} \left( \frac{1}{\cosh(\gamma_2)} \right)^2 \left( \frac{1.2}{d_{r2}} \right) \right]. \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $X, Y_{\text{ref}}, \varphi_{\text{ref}}$  分别为参考纵向位置、参考横向位置和参考航向角. 参考模型中的参数设置:  $b_1 = 2.4(X - 60)/25 - 1.2$ ;  $b_2 = 2.4(X - 120)/25 - 1.2$ ;  $d_{r1} = 25$ ;  $d_{r2} = 25$ ;  $d_{o1} = 3.5$ ;  $d_{o2} = 3.5$ .

#### 3.2 轨迹跟踪测试

为充分验证优化后控制器的轨迹跟踪性能,设置低速低路面附着系数和高速高路面附着系数两种工况,以模拟车辆在不同速度和路面附着条件下的实际行驶情况,模拟实际驾驶场景下的性能表现.采用两种不同的控制策略进行对比仿真:一种是采用幂指数趋近律的终端滑模控制器(TSM),另一种是本文提出的 PIDSM-AF 算法优化控制器.

##### 3.2.1 低速低附着路面工况

在本工况下,行驶环境设定为冰雪天气的城市道路.设定车辆速度为 10 m/s,道路附着系数为 0.3,下文记为工况 1.

图 6 为在低速低附着路面条件下, TSM 和 PIDSM-AF 在 10 m/s 速度下的横向控制跟踪效果.结果显示,两种控制策略下车辆均成功地沿着参考路径较为稳定地行驶, PIDSM-AF 控制器展现出更加卓越的跟踪效果,精度更高.

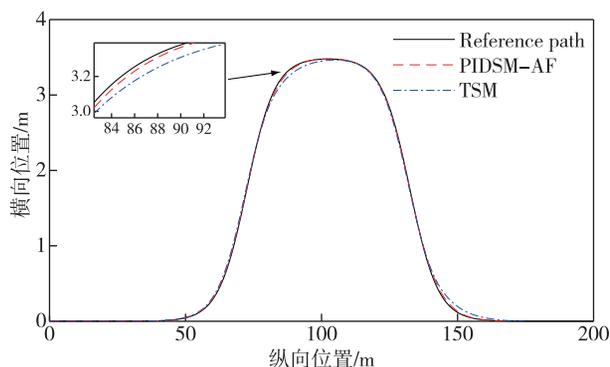


图 6 工况 1 横向位置对比

Fig. 6 Comparison of lateral positions under Operating Condition 1

工况 1 下, TSM 控制器和 PIDSM-AF 控制器在 10 m/s 速度下的横向偏差跟踪效果如图 7 所示.可以看出,在曲率较大的转弯处,两种控制策略都存在一定的偏差.从仿真结果及表 2 可以看出,两种控制器的最大跟踪偏差均可控制在 0.09 m 以内,相比之下, PIDSM-AF 控制器横向偏差明显小于 TSM 控制器.在 10 m/s 速度下, PIDSM-AF 最大横向偏差可以控制在 0.032 m 以内,相对于终端滑模控制器 TSM 减少约 64.0%; PIDSM-AF 平均横向偏差控制在

0.007 1 m 以内,与终端滑模控制器 TSM 相比,减少约 68.4%.

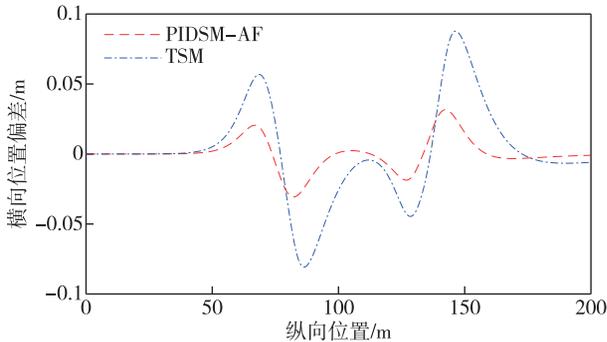


图 7 工况 1 横向偏差对比

Fig. 7 Comparison of lateral deviations under Operating Condition 1

表 2 工况 1 横向偏差对比

Table 2 Comparison of lateral deviations under Operating Condition 1 m

控制器	横向偏差最大值	横向偏差平均值
TSM	0.087 8	0.022 30
PIDSM-AF	0.031 6	0.007 04

图 8 为低速低附着路面工况下, TSM 控制器和 PIDSM-AF 控制器在 10 m/s 速度下的航向角跟踪效果. 通过数据对比, 航向角均控制在 (-0.16 ~ 0.16 rad) 范围内, 航向角偏差均控制在 0.03 rad 以内, 且差距很小, 说明车辆的跟踪过程比较稳定.

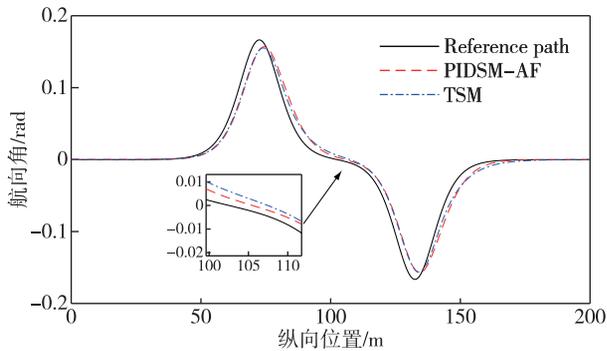


图 8 工况 1 航向角对比

Fig. 8 Comparison of heading angles under Operating Condition 1

图 9 为低速低附着路面工况下, TSM 和 PIDSM-AF 控制器在 10 m/s 速度下的前轮转角跟踪效果. 从仿真结果可以看出, 两种控制器控制下的车轮转角并未发生阶跃性变化, 且不同车速下的前轮转角可以控制在 (-0.04 ~ 0.04 rad) 范围内, 而 PIDSM-AF

控制策略下的前轮转角略小于 TSM 控制器, 证明 PIDSM-AF 控制器控制的整车稳定性更高.

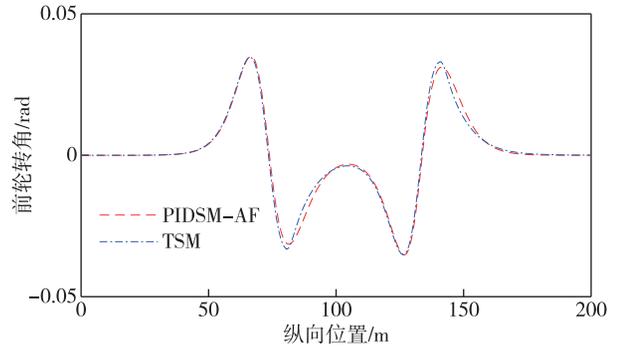


图 9 工况 1 前轮转角对比

Fig. 9 Comparison of front wheel angles under Operating Condition 1

### 3.2.2 高速高附着路面工况

在本工况下, 设定道路环境为良好的高速沥青路面. 设定车辆速度为 25 m/s, 道路附着系数为 0.85, 下文记为工况 2.

图 10 为在高速高附着路面条件下, 车辆在 25 m/s 速度下的横向控制跟踪效果. 结果显示, 两种控制策略下车辆均成功沿着参考路径稳定行驶, 但 PIDSM-AF 控制器展现出更加卓越的跟踪效果, 其车辆轨迹路线与参考路径更加贴合.

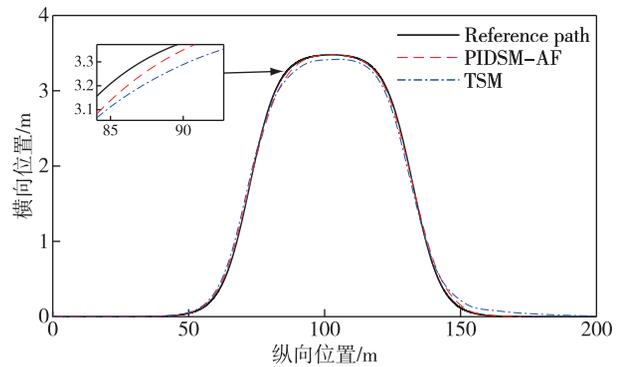


图 10 工况 2 横向位置对比

Fig. 10 Comparison of lateral positions under Operating Condition 2

图 11 为高速高附着路面工况下, TSM 控制器和 PIDSM-AF 控制器在 25 m/s 速度下的横向偏差跟踪效果. 从表 3 可以看出, 两种控制器的最大跟踪偏差均可控制在 0.13 m 以内, 相比之下, 本文设计的 PIDSM-AF 控制器横向偏差明显小于 TSM 控制器. 在 25 m/s 速度下, PIDSM-AF 控制器的最大横向偏差可以控制在 0.083 m 以内, 相对于终端滑模控制

器减少约 34.9%; PIDSM-AF 控制器的平均横向偏差控制在 0.019 m 以内, 与终端滑模控制器相比, 减少了约 59.7%.

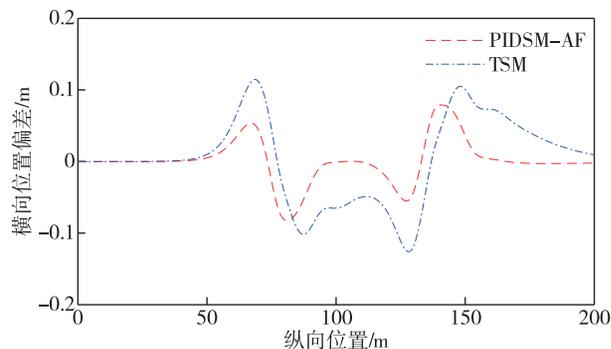


图 11 工况 2 横向偏差对比

Fig. 11 Comparison of lateral deviations under Operating Condition 2

表 3 工况 2 横向偏差对比

Table 3 Comparison of lateral deviations under Operating Condition 2

控制器	横向偏差最大值	横向偏差平均值
TSM	0.126	0.045 0
PIDSM-AF	0.082	0.018 1

图 12 为在高速高附着路面工况下, 以 25 m/s 速度行驶时 TSM 控制器和 PIDSM-AF 控制器的航向角跟踪效果. 通过数据对比发现, 两者的航向角均控制在 (-0.2~0.2 rad) 范围内, 航向角偏差均控制在 (-0.05~0.05 rad) 范围内, 表明车辆的跟踪过程较为稳定. 然而, 在纵向位置 85 m 和 150 m 处, TSM 控制产生了较为明显的航向角抖振超调, 而 PIDSM-AF 则展现出更加平稳的航向偏差变化, 有利于提高车辆跟踪的全程稳定性.

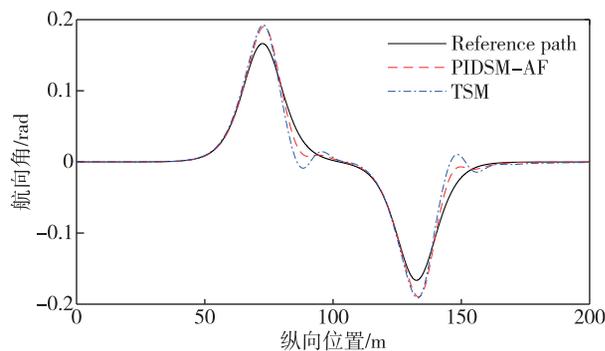


图 12 工况 2 航向角对比

Fig. 12 Comparison of heading angles under Operating Condition 2

图 13 为在高速高附着路面工况下, 以 25 m/s 速度行驶时 TSM 和 PIDSM-AF 控制器的前轮转角跟踪效果. 在纵向位置 85 m 和 150 m 处, TSM 控制的车辆前轮转角同样出现了较为明显的抖振超调现象, 相比之下, PIDSM-AF 控制器可以对车辆转角进行更精确的动态调控, 具有更好的稳定性和鲁棒性, 能够有效地抑制系统的抖振超调.

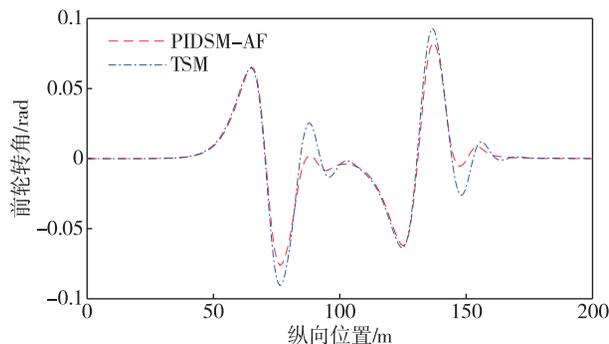


图 13 工况 2 前轮转角对比

Fig. 13 Comparison of front wheel angles under Operating Condition 2

## 4 结论

本文针对传统滑模控制器易引起系统抖振、控制精度低等问题, 设计了一种引入激活函数滑模控制的横向路径跟踪控制器. 在一般的 PID 积分滑模控制器设计基础上, 建立了融合航向角偏差和横向偏差的积分滑模面. 为解决滑模控制的抖振问题, 在优化后的趋近律的基础上, 引入了非线性激活函数. 仿真结果表明, 本文设计的 PIDSM-AF 控制器在参考路径下, 具有更为优越的跟踪精度和稳定性. 在速度 10 m/s、低附着路面工况下, 与 TSM 控制器相比, PIDSM-AF 控制器的最大横向偏差减少了约 64%, 平均横向偏差减少了约 68.4%. 在速度 25 m/s、高附着路面工况下, 与 TSM 控制器相比, PIDSM-AF 控制器的最大横向偏差减少了约 34.9%, 平均横向偏差减少了约 59.7%, 并在曲率较大的弯道处有效地抑制了车辆航向角、前轮转角的抖振超调变化.

## 参考文献

### References

- [ 1 ] 姚强强. 自动驾驶汽车行驶状态观测与路径跟踪控制策略研究 [ D ]. 北京: 北京交通大学, 2022  
YAO Qiangqiang. Research on driving states observation and path tracking control strategy for autonomous vehicle [ D ]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022

- [ 2 ] Sun Y C, Ren D C, Lian S Q, et al. Robust path planner for autonomous vehicles on roads with large curvature [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 2503-2510
- [ 3 ] Shamsuddin P N F B M, Mansor M A B. Motion control algorithm for path following and trajectory tracking for unmanned surface vehicle: a review paper [C]//2018 3rd International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC). September 26 - 28, 2018, Penang, Malaysia. *IEEE*, 2018: 73-77
- [ 4 ] Li H, Luo J, Yan S, et al. Research on parking control of bus based on improved pure pursuit algorithms [C]//2019 18th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES). November 8 - 10, 2019, Wuhan, China. *IEEE*, 2019: 21-26
- [ 5 ] 孙智威, 裴晓飞, 刘一平, 等. 无人驾驶清扫车的路径跟踪及远程控制 [J]. *汽车安全与节能学报*, 2022, 13(4): 729-737  
SUN Zhiwei, PEI Xiaofei, LIU Yiping, et al. Path tracking and remote control of driverless sweeper [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2022, 13(4): 729-737
- [ 6 ] Wang L, Zhai Z Q, Zhu Z X, et al. Path tracking control of an autonomous tractor using improved Stanley controller optimized with multiple-population genetic algorithm [J]. *Actuators*, 2022, 11(1): 22
- [ 7 ] 王鑫, 凌铭, 饶启鹏, 等. 基于改进 Stanley 算法的无人车路径跟踪融合算法研究 [J]. *汽车技术*, 2022(7): 25-31  
WANG Xin, LING Ming, RAO Qipeng, et al. Research on fusion algorithm of unmanned vehicle path tracking based on improved Stanley algorithm [J]. *Automobile Technology*, 2022(7): 25-31
- [ 8 ] Yao J L, Ge Z. Path-tracking control strategy of unmanned vehicle based on DDPG algorithm [J]. *Sensors*, 2022, 22(20): 7881
- [ 9 ] 姜正伟, 李鹏旭, 张斌, 等. 基于车速依赖静态输出反馈的自主汽车路径跟踪控制 [J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 13(1): 41-50  
JIANG Zhengwei, LI Pengxu, ZHANG Bin, et al. Path-following control of autonomous vehicles based on velocity-dependent static output-feedback strategy [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 13(1): 41-50
- [ 10 ] Wang D J, Chen J H, Chen Y, et al. Parking robot path-tracking system based on discrete PID algorithm [J]. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 2023, 27(3): 411-420
- [ 11 ] Rupp A, Stolz M. Survey on control schemes for automated driving on highways [M]//Watzenig D, Horn M. *Automated driving*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 43-69
- [ 12 ] Hu C, Chen Y M, Wang J M. Fuzzy observer-based transitional path-tracking control for autonomous vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(5): 3078-3088
- [ 13 ] Tian J, Yang M F. Research on trajectory tracking and body attitude control of autonomous ground vehicle based on differential steering [J]. *PLoS One*, 2023, 18(2): e0273255
- [ 14 ] 王艺, 蔡英凤, 陈龙, 等. 基于模型预测控制的智能网联汽车路径跟踪控制器设计 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(8): 136-144, 153  
WANG Yi, CAI Yingfeng, CHEN Long, et al. Design of intelligent and connected vehicle path tracking controller based on model predictive control [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(8): 136-144, 153
- [ 15 ] 寇发荣, 郑文博, 张新乾, 等. 采用状态扩展 MPC 与转角补偿的无人车路径跟踪控制 [J]. *机械科学与技术*, 2023, 42(9): 1533-1541  
KOU Farong, ZHENG Wenbo, ZHANG Xinqian, et al. Path tracking control of unmanned vehicle using state extended model predictive control and angle compensation [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023, 42(9): 1533-1541
- [ 16 ] 白国星, 刘丽, 孟宇, 等. 基于非线性模型预测控制的移动机器人实时路径跟踪 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(9): 47-52, 60  
BAI Guoxing, LIU Li, MENG Yu, et al. Real-time path tracking of mobile robot based on nonlinear model predictive control [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(9): 47-52, 60
- [ 17 ] Tian J, Zeng Q K, Wang P, et al. Active steering control based on preview theory for articulated heavy vehicles [J]. *PLoS One*, 2021, 16(5): e0252098
- [ 18 ] 周卫琪, 赵羿寒, 刘擎超, 等. 基于改进 LQR 的车辆路径跟踪横向控制策略 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(3): 135-141  
ZHOU Weiqi, ZHAO Yihan, LIU Qingchao, et al. Lateral control strategy of vehicle path tracking based on improved LQR [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 52(3): 135-141
- [ 19 ] 张涛, 赵奉奎, 张涌, 等. 基于遗传算法的无人驾驶卡车路径跟踪控制研究 [J]. *南京信息工程大学学报*, 2024, 16(6): 791-800  
ZHANG Tao, ZHAO Fengkui, ZHANG Yong, et al. Path tracking control of unmanned truck based on genetic algorithm [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology*, 2024, 16(6): 791-800
- [ 20 ] 高爱云, 肖寒, 付主木. 基于 LQR 的智能驾驶汽车横纵向控制研究 [J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(2): 30-43, 55, 108-109  
GAO Aiyun, XIAO Han, FU Zhumu. Research on horizontal and longitudinal control of intelligent driving vehicle based on LQR [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2024, 45(2): 30-43, 55, 108-109
- [ 21 ] Wu Y, Wang L F, Zhang J Z, et al. Path following control of autonomous ground vehicle based on nonsingular terminal sliding mode and active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(7): 6379-6390
- [ 22 ] Imine H, Madani T. Sliding-mode control for automated lane guidance of heavy vehicle [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2013, 23(1): 67-76

- [23] 王家恩, 陈无畏, 王檀彬, 等. 基于期望横摆角速度的视觉导航智能车辆横向控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 108-115  
WANG Jiaen, CHEN Wuwei, WANG Tanbin, et al. Vision guided intelligent vehicle lateral control based on desired yaw rate[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 108-115
- [24] Han Y X, Cheng Y, Xu G W. Trajectory tracking control of AGV based on sliding mode control with the improved reaching law[J]. IEEE Access, 2019, 7: 20748-20755
- [25] Sabiha A D, Kamel M A, Said E, et al. ROS-based trajectory tracking control for autonomous tracked vehicle using optimized backstepping and sliding mode control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 152: 104058

## Lateral control of intelligent vehicles based on PIDSM-AF

ZHANG Yong<sup>1</sup> ZHANG Chuang<sup>1</sup> ZHAO Fengkui<sup>1</sup> LI Binglin<sup>1</sup> LYU Liya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

**Abstract** Path tracking precision is fundamental for safe and autonomous driving of intelligent vehicles. To address the problem of chattering in sliding mode control systems and enhance the control precision of path tracking controllers, a novel PID Integral Sliding Mode Control strategy with Activation Function (PIDSM-AF) is proposed. Firstly, based on a two-degree-of-freedom vehicle model, the vehicle dynamics model is decomposed into a lateral deviation one to establish the lateral control model. Subsequently, an integral sliding mode surface incorporating both heading angle deviation and lateral deviation is constructed employing the extremum method. Considering the system chattering that is difficult to eliminate by general exponential approaching rate, a nonlinear activation function is introduced to adjust the rate when the system state is close to the sliding surface on the basis of an improved exponential approaching rate. This leads to the design of a lateral path tracking controller based on sliding mode control with an activation function. Finally, the improved sliding mode controller is subjected to double lane change tests through Carsim/Simulink co-simulation. The results show that, compared with traditional terminal sliding mode controller, the maximum lateral deviation of the optimized integrated sliding mode controller is reduced by about 64% and 34.9%, and the average lateral deviation is reduced by about 68.4% and 59.7%, under the conditions of low-speed low-adhesion and high-speed high-adhesion conditions, respectively. Furthermore, the optimized controller effectively suppresses the chattering and overshoot changes of vehicle heading angle and front wheel rotation angle, demonstrating strong robustness.

**Key words** path tracking; sliding mode control; intelligent vehicle; lateral control