·线控转向车辆横向稳定性与运动跟踪控制技术专题·

线控转向汽车主动转向稳定性的自适应控制研究*

杨应伟　牛礼民　王梦韩　温泽云　曹景杰

（安徽工业大学机械工程学院，马鞍山 243032）

【摘要】针对提升线控转向（SBW）车辆的操纵稳定性和主动安全性，提出一种基于滑模控制的线控转向稳定性控制策略，该策略将横摆角速度与质心侧偏角共同作为反馈变量。通过粒子群-灰狼优化（PSO-GWO）算法优化横摆角速度定增益的变传动比，满足线控转向车辆低速灵敏和高速稳定特征；以改进型滑模控制为基础，设计自适应全局快速终端滑模控制器以减弱系统抖振，由滑模控制器产生的附加前轮转角改善车辆操纵稳定性。利用MATLAB/Simulink搭建线控转向系统模型，联合CarSim仿真，分别在高速高附着系数及中速低附着系数路面的双移线工况下进行仿真分析。结果表明：相较于无控制和单一变传动比控制策略，提出的控制策略在高速高附着系数工况下，横向位移误差由6.37%降低至3.57%；在中速低附着系数工况下，横向位移误差由9.74%降低至2.11%，能够有效改善车辆动态响应与稳定性。

主题词：线控转向　主动转向稳定性　自适应趋近率　滑模控制

中图分类号：U462.3+3；U463.4　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20250594

Active Steering Stability Control of Steer-by-Wire Vehicles Using an Improved Adaptive Sliding Mode Control Approach

Yang Yingwei, Niu Limin, Wang Menghan, Wen Zeyun, Cao Jingjie

（School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032）

【Abstract】To enhance the handling stability and active safety of Steering-By-Wire (SBW) vehicles, this study proposes a stability control strategy based on sliding mode control, integrating yaw rate and sideslip angle as feedback variables on the foundation of variable steering ratio control. A Particle Swarm Optimization-Grey Wolf Optimization (PSO-GWO) algorithm is applied to optimize the variable steering ratio with constant yaw rate gain, ensuring high sensitivity at low speeds and stability at high speeds. In addition, an adaptive global fast terminal sliding mode controller is developed to suppress chattering, which generates an auxiliary front-wheel steering angle to further improve vehicle stability. The SBW system is modeled in MATLAB/Simulink and co-simulated with CarSim under double lane-change maneuvers on high-speed/high-friction and medium-speed/low-friction roads. Simulation results show that compared with the uncontrolled case and the variable steering ratio control strategy alone, the proposed control strategy effectively improves the vehicle dynamic response and stability. Under the high-speed/high-friction condition, the lateral displacement error is reduced from 6.37% to 3.57%; under the medium-speed/low-friction condition, it is reduced from 9.74% to 2.11%. This study enhances the stability and active safety of SBW vehicles and provides valuable insights for the development of advanced SBW systems.

Key words: Steering-By-Wire (SBW), Active steering stability, Adaptive reaching law, Sliding mode control

【引用格式】杨应伟，牛礼民，王梦韩，等. 线控转向汽车主动转向稳定性的自适应控制研究[J]. 汽车技术，2026(9)：1-8.

YANG Y W, NIU L M, WANG M H, et al. Active Steering Stability Control of Steer-by-Wire Vehicles Using an Improved Adaptive Sliding Mode Control Approach[J]. Automobile Technology, 2026(9): 1-8.

1　前言

随着汽车产业的加快转型升级，线控转向（Steering-By-Wire，SBW）系统取消了传统机械转向中转向盘与转向轮间的物理连接[1-2]，通过灵活改变车辆转向传动比实现主动转向，极大地提升了车辆的操纵稳

*基金项目：智能汽车线控底盘系统安徽省重点实验室开放课题基金项目（QCKJJ202401）。

通信作者：牛礼民（1976—），副教授，主要研究方向为车辆动态性能模拟和电动汽车控制技术，niulimin@ahut.edu.cn。

定性和主动安全性[3-4]。

可变转向传动比研究方法主要分为：基于转向增益不变的控制方法、参数拟合法以及基于智能控制算法的控制方法。王晓峰等[5]结合车辆灵敏度和车速特性，基于权重法对转向路感进行模拟，提升了车辆的操纵稳定性和转向轻便性。陈哲明等[6]设计了一种基于粒子群优化的线控转向可变传动比模糊控制器，该方法显著改善了车辆的转向响应与操纵稳定性。Liu等[7]基于粒子群优化算法改善车辆的横摆角速度增益，有效降低了驾驶员的操纵负担。

SBW系统的主动转向稳定性控制器的常用控制方法包括经典控制、鲁棒控制、现代最优控制、自适应与智能控制等。其中，自适应与智能控制方法因滑模变结构控制对参数不确定性及外部扰动不敏感，可直接控制非线性系统，因而被广泛使用。屈小贞等[8]基于主动转向与模糊滑模控制（Fuzzy Slip Mode Control，FSMC）的协同控制，改善了车辆的操纵稳定性和安全性。黄华等[9]通过参数调节函数设计了一种新型滑模趋近率，提高了线控转向系统对转角的动态响应性能和路径精度。方文斗等针对线控转向系统提出分层控制策略，以提升车辆的横向稳定性[10-11]。孙友平等[12]设计了基于扰动补偿的主动前轮转向滑模控制器，李崧等[13]基于理想传动比前馈控制，设计了考虑横摆角速度和质心侧偏角的主动转向控制器，降低了横摆角速度和质心侧偏角的误差。Zhang等[14]提出一种自适应滑模控制器，以提升线控转向车辆的稳定性控制。

由于现有研究多集中在可变转向传动比和主动转向稳定性控制方法，且控制策略仅基于横摆角速度的单一反馈，未考虑不同附着系数路面对车辆主动转向稳定性的影响。为此，本文提出了一种综合控制策略，根据稳态横摆角速度定增益设计理想变转向传动比，并将车辆横摆角速度和质心侧偏角作为反馈变量，设计自适应改进滑模主动转向稳定性控制器，二者协同提升车辆主动转向的稳定性。

2 线控转向系统建模

车辆线控转向系统整体结构主要由驾驶员输入模块、线控转向车轮机构和控制单元组成，并配合车辆状态感知与冗余安全设计保障车辆安全。本文重点研究线控转向执行机构，其主要包括转向执行电机、减速机构以及机械传动机构3个部分，并分别对其中转向执行电机以及齿轮齿条转向器进行数学建模。

转向执行电机模块的数学模型为：

$$\begin{cases} T_{m1} = J_{m1}\theta_{m1} + B_{m1}\theta_{m1} + K_{m1}\left(\theta_{m1} + \dfrac{G_{m1}X_r}{r_p}\right) + T_{fm1} \\ T_{fm1} = C_{fm1}\tanh(\theta_{m1}) \end{cases} \tag{1}$$

式中：T_{m1}、θ_{m1}、J_{m1}、B_{m1}分别为转向执行电机的转矩、转角、等效转动惯量和等效阻尼系数，K_{m1}为转向执行电机轴的扭转刚度，G_{m1}为转向执行电机减速器的减速比，X_r为转向器中齿条的位移，r_p为小齿轮的分度圆半径，T_{fm1}为转向执行电机与减速器间的等效摩擦阻力矩，C_{fm1}为等效摩擦阻力矩梯度变化系数。

根据基尔霍夫第二定律，转向执行电机的电压方程为：

$$U_{m1} = R_{m1}i_{m1} + L_{m1}i_{m1} + K_{m1}\theta_{m1} \tag{2}$$

式中：U_{m1}、R_{m1}、i_{m1}、L_{m1}分别为电枢的电压、电阻、电流和电感，K_{m1}为电枢的反电动势系数。

转向执行电机的输出转矩与电枢电流的关系为$T_{m1} = K_{t1}i_{m1}$，其中，K_{t1}为转向电机的转矩系数。齿轮齿条转向器模块动力学平衡方程为：

$$\begin{cases} M_rX_r + B_rX_r + F_z + \sum_{i=1}^{2}\dfrac{K_{kp,i}\left(\dfrac{X_r}{N_{L,i}} - \delta_{f,i}\right)}{N_{L,i}} = \dfrac{K_{md}}{r_p}\left(\theta_{m2} - \dfrac{G_{m2}X_r}{r_p}\right) \\ F_z = F_{l,z} + F_{r,z} = \dfrac{T_{l,z}}{G_l} + \dfrac{T_{r,z}}{G_r} \end{cases} \tag{3}$$

式中：M_r、B_r分别为齿条的质量、等效阻尼系数，F_z为齿条力，$T_{l,z}$、$T_{r,z}$分别为左前轮、右前轮回正力矩，G_l、G_r分别为左前轮、右前轮的转向摇臂长度，K_{kp1}、K_{kp2}分别为左前轮、右前轮的转向主销扭转刚度，$N_{L,1}$、$N_{L,2}$分别为齿条到左前轮、右前轮的传动比，$\delta_{f,1}$、$\delta_{f,2}$分别为左前轮、右前轮的转角。

根据SBW系统原理，在CarSim/Simulink环境中完成整车联合仿真模型的搭建，部分车辆参数如表1所示。将该模型与传统机械转向进行对比验证，为可变转向传动比设计及主动转向控制策略研究提供可靠支撑。

表1 部分车辆参数

参数	取值	参数	取值
整车质量m/kg	1 655	轴距L/m	2.9
质心到前轴距离l_f/m	1.015	绕z轴转动惯量I_z/kg·m^{-2}	2 315.3
质心到后轴距离l_r/m	1.895	前轮侧偏刚度k_f/N·rad^{-1}	−114 309.37
质心到后轴距离l_r/m	1.895	后轮侧偏刚度k_r/N·rad^{-1}	−66 570.29

3 线控转向系统稳定性控制

3.1 变转向传动比

目前，SBW系统变转向传动比设计主要分为2类：基于定横摆角速度增益和基于定侧向加速度增益的方

法。本文采用基于定横摆角速度增益的方法，车辆稳态的横摆角速度为：

$$w_r = G_{fw}\delta_f = G_{sw}\delta_{sw} \tag{4}$$

式中：G_{fw}为车辆稳态时的实际横摆角速度与前轮转角之比，G_{sw}为车辆稳态时的实际横摆角速度与转向盘转角之比，δ_{sw}为转向盘转角，δ_f为前轮转角。

基于车辆前、后轮侧偏力与车轮转角间的关系，以及车辆侧偏角和车辆运动参数间的关系，建立线性二自由度车辆模型，其运动微分方程为：

$$\begin{cases}(k_f + k_r)\beta + \dfrac{1}{u}(l_f k_f - l_r k_r)\omega_r - k_f\delta_f = m\dot{v}_y + mu\omega_r \\ (l_f k_f + l_r k_r)\beta + \dfrac{1}{u}(l_f^2 k_f - l_r^2 k_r)\omega_r - l_f k_f\delta_f = I_z\dot{\omega}_r\end{cases} \tag{5}$$

式中：k_f、k_r分别为车辆前、后轴的侧偏刚度，β为车辆质心侧偏角，u为质心处车速在x方向的分量，l_f、l_r分别为车辆质心到前、后轴距离，δ_f为实际前轮转角，$\dot{v}_y$车辆质心处加速度在y方向的分量，ω_r为车辆横摆角速度，I_z为车辆绕z轴的转动惯量。

当车辆匀速行驶，在前轮角阶跃输入下进入稳态响应时，横摆角速度为固定值，此时$\dot{v}_y$=0、$\dot{\omega}_r$=0，则稳态横摆角速度增益G_{fw}为：

$$\begin{cases}G_{fw} = \dfrac{u/L}{1 + Ku^2} \\ K = \dfrac{m}{L^2}\left(\dfrac{l_f}{k_r} - \dfrac{l_r}{k_f}\right)\end{cases} \tag{6}$$

式中：K为稳定性因数。

因此，由式(4)和式(6)得到理想传动比为：

$$i_{sw} = \frac{\delta_{sw}}{\delta_{fw}} = \frac{G_{fw}}{G_{sw}} = \frac{u/L}{1 + Ku^2}\cdot\frac{1}{G_{sw}} \tag{7}$$

根据汽车理论，现代轿车的稳态横摆角速度增益，即转向灵敏度G_{sw}范围为(0.16 s^{-1},0.33 s^{-1})。本文采用文献[15]的操纵稳定性综合评价指标J_T和粒子群-灰狼优化(Particle Swarm Optrmization-Grey Wolf Optimization，PSO-GWO)算法优化横摆角速度增益，得到最终的变转向传动比。其中，PSO-GWO算法结合粒子群优化在全局搜索和收敛速度方向的优势，以及灰狼优化在局部开发的特点，实现了搜索能力与收敛精度的平衡。

转向灵敏度的优化过程主要包括：以操纵稳定性综合评价指标J_T作为优化目标函数，汽车横摆角速度增益G_{sw}作为待优化变量，建立优化模型，目标是最小化J_T；通过粒子群优化PSO机制快速搜索全局生成候选解，在迭代过程中，引入灰狼优化GWO机制对候选解进行局部开发和收敛；最后，经过多次迭代后得到最优的G_{sw}值。该方法能够避免单一算法陷入局部最优的问题，保证优化结果的稳定性与可靠性。

根据建立的线控转向系统模型，分别在25 km/h、40 km/h、55 km/h、70 km/h、85 km/h、100 km/h、115 km/h不同车速下，利用灰狼-粒子群优化算法进行优化，选择综合客观评价指标J_T作为优化目标，汽车横摆角速度增益G_{sw}作为优化参数，其范围为0~1，初始值设置为0.5，优化后结果如表2和表3所示。

表2　不同车速下增益值优化结果

车速/km·h^{-1}	优化前		优化后	
	G_{sw}/s^{-1}	J_T	G_{sw}/s^{-1}	J_T
25	0.5	0.716	0.912	0.481
40	0.5	1.242	0.891	0.124
55	0.5	1.831	0.724	1.814
70	0.5	2.498	0.580	2.495
85	0.5	3.785	0.313	3.719
100	0.5	6.714	0.223	6.260
115	0.5	13.030	0.116	11.600

表3　不同增益值下车速指标值优化结果

G_{sw}/s^{-1}	J_T						
	25 /km·h^{-1}	40 /km·h^{-1}	55 /km·h^{-1}	70 /km·h^{-1}	85 /km·h^{-1}	100 /km·h^{-1}	115 /km·h^{-1}
0.912	0.481	0.338	3.126	7.965	16.680	25.270	30.230
0.891	0.564	0.124	1.876	2.981	5.498	10.380	16.370
0.724	0.634	0.150	1.814	2.597	4.183	7.848	14.250
0.580	0.738	1.270	1.844	2.495	3.752	6.557	12.650
0.313	0.765	1.314	1.875	2.449	3.719	6.392	12.120
0.223	0.786	1.451	1.908	2.710	4.292	6.260	11.650
0.116	0.788	1.455	1.911	2.712	4.389	6.396	11.600
同一G_{sw}下J_T均值	12.013	5.399	4.497	4.187	4.098	4.151	4.179
同一G_{sw}下J_T均方差	11.301	5.537	4.646	3.895	3.706	3.514	3.510

由表3可知，不同车速下，优化后的J_T值下降了0.5%~37.3%，说明优化结果是正确的；当G_{sw}=0.313 s^{-1}时，J_T均值最小，均方差值较小，即汽车的操纵稳定性较好。

本文使用G_{sw}=0.313 s^{-1}，优化后的变转向传动比结果如图1所示。在低速行驶或泊车工况下，为提高车辆操纵灵敏度，驾驶员可通过较小的转向盘转角实现所需转向效果，此时应设计较大的转向增益，即转向传动比较小，且需设定下限传动比i_{min}，以防止前轮转角到达极限。相反，在高速工况下，为增强行驶稳定性，车辆需要较小的转向增益，同时，应设定上限传动比i_{max}以避免转向响应出现迟滞。

因此，修正后的变转向传动比为式(8)，设置i_{min} = 6.70，i_{max} = 25.65，则修正后的理想变转向传动比曲线如

图2所示。

$$i=\begin{cases} i_{\min}, & u<25\ \text{km/h} \\ \dfrac{u/L}{1+Ku^2}\cdot\dfrac{1}{G_{sw}}, & 25\ \text{km/h}\leqslant u\leqslant 100\ \text{km/h} \\ i_{\max}, & u>100\ \text{km/h} \end{cases} \quad (8)$$

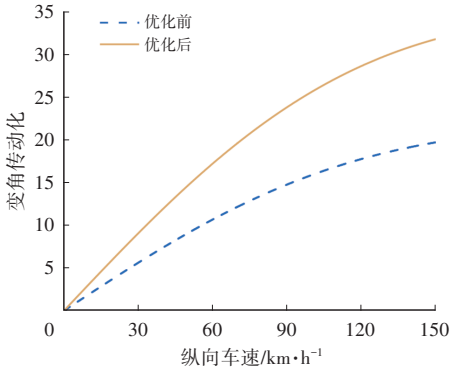


图1　车速与变转向传动比关系

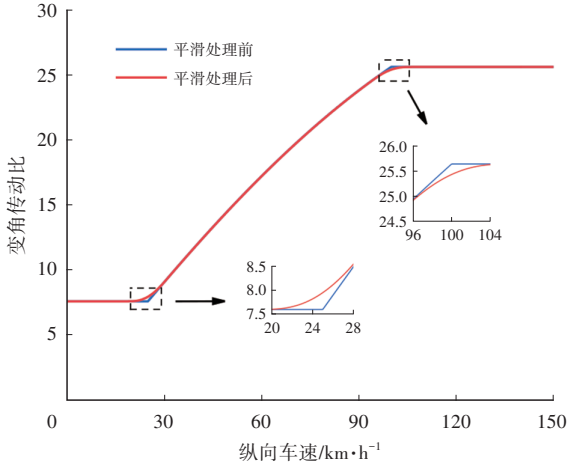


图2　修正后车速与变转向传动比关系

3.2　滑模控制策略

滑模控制又称为滑模变结构控制(Sliding Mode Control，SMC)，对系统参数摄动、外部干扰敏感性较低，具有强鲁棒性、快速响应以及自适应非线性系统处理能力等优点，适用于汽车行驶中的稳定性控制。鉴于横摆角速度和质心侧偏角可直接反映车辆的动态稳定性状态，故本文同时使用2个参数作为控制变量，设计滑模控制器。

滑模控制器通过整车模型横摆角速度和质心侧偏角实际值与线性二自由度参考模型的理想值间的误差，计算经过变转向传动比转换后的前轮附加转角，转向执行机构根据该参数修正前轮，从而保证车辆行驶方向的可控性，防止过度转向与不足转向的同时，增强其鲁棒性。

线控主动转向稳定性控制策略架构如图3所示，其中，ω_{rd}、ω_r分别为参考模型横摆角速度的理想值和整车模型横摆角速度的实际值，β_d、β分别为参考模型质心侧偏角的理想值和整车模型质心侧偏角的实际值。

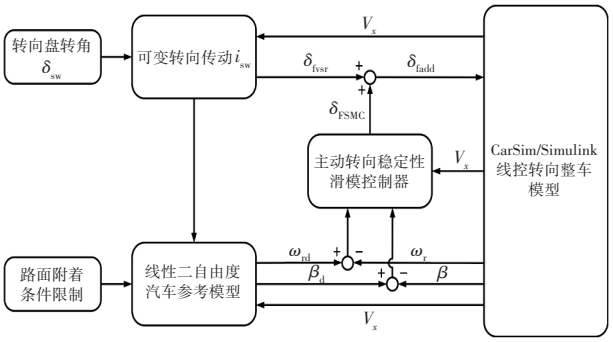


图3　线控主动转向稳定性控制策略

理想线性二自由度汽车状态空间方程可表示为：

$$\begin{bmatrix}\beta\\ \omega_r\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{k_f+k_r}{mu} & \dfrac{l_fk_f-l_rk_r}{mu^2}-1\\ \dfrac{l_fk_f-l_rk_r}{I_z} & \dfrac{l_f^2k_f+l_r^2k_r}{I_zu}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\beta\\ \omega_r\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-\dfrac{k_f}{mu}\\ -\dfrac{l_fk_f}{I_z}\end{bmatrix}\delta_f \quad (9)$$

当车辆进入稳态时，横摆角速度ω_r和质心侧偏角β均为固定值，即$\dot{\omega}_r=0$、$\dot{\beta}=0$，计算理想横摆角速度和质心侧偏角分别为：

$$\begin{cases}\omega_{rd}=\dfrac{u/L}{1+Ku^2}\delta_f\\ \beta_d=\dfrac{l_rLk_r+ml_fu^2}{L^2k_r(1+Ku^2)}\delta_f\end{cases} \quad (10)$$

考虑到车辆在实际行驶中，横向加速度a_y受到路面附着系数μ限制，其最大加速度为$a_\mu=\mu g$，因此，横摆角速度与质心侧偏角的理想值也需在此约束范围内设定，则约束后的理想横摆角速度和质心侧偏角为：

$$\begin{cases}\omega_{rd}=\min\left\{\left|\dfrac{u/L}{1+Ku^2}\delta_f\right|,\left|k_{safe}\dfrac{\mu g}{u}\right|\right\}\operatorname{sgn}(\delta_f)\\ \beta_d=\min\left\{\left|\dfrac{l_rLk_r+ml_fu^2}{L^2k_r(1+Ku^2)}\delta_f\right|,\left|\left(\dfrac{l_r}{u^2}+\dfrac{ml_f}{k_rL}\mu g\right)\right|\right\}\operatorname{sgn}(\delta_f)\end{cases} \quad (11)$$

式中：sgn()为符号函数，g为重力加速度，$k_{safe}=0.85$为安全系数。

本文选取横摆角速度和质心侧偏角理想值与实际值的偏差e_{ω_r}、e_β作为滑模控制误差，通过引入基于车速u的权重系数k_u，实现综合控制。故综合误差为：

$$\begin{cases}\xi=e_\beta+k_ue_{\omega_r}\\ k_u=k_0+\alpha_ke^{-\beta_ku}\end{cases} \quad (12)$$

式中：k_0为高速下的基础权重，α_k为低速控制下的最小权重，β_k为指数增长系数。

在式(12)中，若k_0过小，在高速下会降低横摆角速度误差的影响，导致车辆的侧偏角难以抑制，稳定性降低；反之，若k_0过大会引起系统抖振。在车辆控制领域，增益调度控制方法常要求高速下仍需保持低速增益的15%~30%为下限，以保证基本的响应性能，则k_0的范围

为0.2~1.0[16]。在低速时，由于车辆轮胎侧偏角较小，车辆横向力不足，为保证低速下车辆具备足够的横向控制裕度，根据车辆横摆角速度反馈和侧偏动力学的经验，取α_k范围为1.0~3.0[17]。对指数增长系数而言，若β_k过小，权重系数随车速衰减过慢，在中高速区间仍有较高权重，导致控制器过度敏感；反之，会导致收敛过慢，而合理的衰减区间应能保证车速在10~20 m/s的范围内完成权重过渡，则β_k的范围为0.01~0.2[18]。本文取k_0=0.4、α_k=2 β_k=0.08。

构建滑模面$s = e_\beta + k_u e_{\omega_r}$，对其求导得到：

$$\begin{aligned}\dot{s} = &[\beta_d - (a_{11}\beta + a_{12}\omega_r + b_1\delta_f)] + k_u e_{\omega_r} + \\ &k_u[\omega_{rd} - (a_{21}\beta + a_{22}\omega_r + b_2\delta_f)]\end{aligned} \tag{13}$$

为保证系统初始状态在远离滑模面时，能在有限时间收敛，可取滑模趋近率为全局快速终端趋近率：

$$\dot{s} = -c_1|s|^p \operatorname{sgn}(s) - c_2|s|^q s \tag{14}$$

式中：$c_1 > 0$为终端吸引系数，$c_2 > 0$为指数收敛系数，$0 < p < 1$为终端吸引指数，$q > 0$为线性收敛指数。

为减弱系统抖振，本文采用带有动态自适应边界层σ=0.01+0.3e$^{-20|s|}$的双曲正切函数$\tanh(s/\sigma)$代替符号函数$\operatorname{sgn}(s)$，得到$\tanh(s/\sigma) = \dfrac{\sinh(s/\sigma)}{\cosh(s/\sigma)} = \dfrac{e^{s/\sigma} - e^{-s/\sigma}}{e^{s/\sigma} + e^{-s/\sigma}}$，则控制器输出为：

$$\begin{aligned}\delta_{FSMC} = &\frac{1}{b_1 + b_2 k_u}[\dot{\beta}_d + \dot{\omega}_{rd}k_u - (a_{11} + a_{21}k_u)\beta - \\ &(a_{12} + a_{22}k_u)\omega_r + (\omega_{rd} - \omega_r)\dot{k}_u + \\ &c_1|s|^p \tanh(s/\sigma) + c_2|s|^q s]\end{aligned} \tag{15}$$

对滑模控制系统的稳定性进行判定，定义正定李雅普诺夫（Lyapunov）函数及其对时间的导数为$\begin{cases} V_s = \dfrac{1}{2}s^2 \\ \dot{V}_s = s\dot{s} \end{cases}$，最终得到：

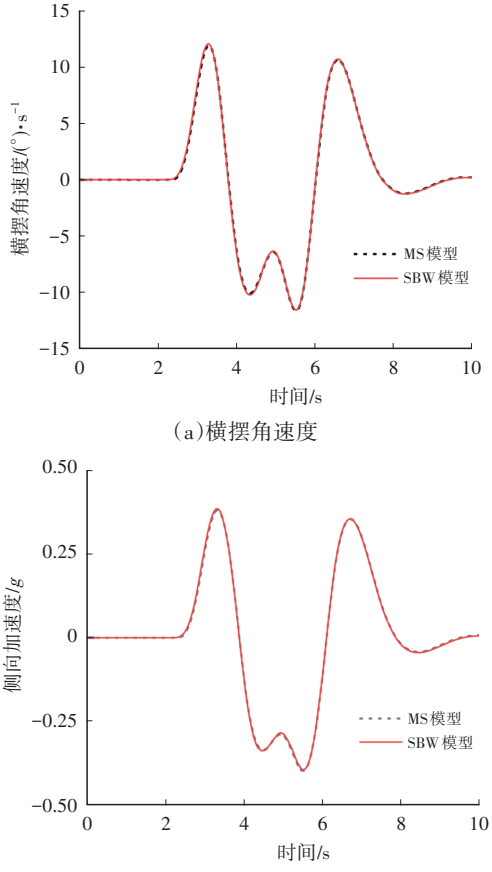
$$\begin{aligned}\dot{V}_s = s\dot{s} &= s\left[-c_1|s|^p \tanh(s/\sigma) - c_2|s|^q s\right] \\ &= -c_1|s|^{p+1}|\tanh(s/\sigma)| - c_2|s|^{q+2}\end{aligned} \tag{16}$$

当 $c_1 > 0$、$c_2 > 0$、$|s|^{p+1} > 0$、$|s|^{q+2} > 0$ 时，$|\tanh(s/\sigma)| \geqslant 0$，且仅当$s$=0时，$|\tanh(s/\sigma)| = 0$。因此，当$\dot{V}_s \leqslant 0$、$\dot{V}_s$=0时，且仅当$s$=0成立，故满足李雅普诺夫稳定性条件，滑模控制系统稳定可有效减弱系统抖振。

4 模型验证及仿真分析

4.1 联合仿真模型验证

在MATLAB/Simulink建立SBW系统的动力学模型，通过Simulink中S-function模块，将搭建的SBW系统代替CarSim中的机械转向（Manual-Steering，MS）系统，从而构建CarSim/Simulink联合仿真的整车模型。在CarSim软件中，设置车辆的纵向车速为80 km/h，行驶工况为双移线（Double Lane Change，DLC）工况，将SBW模型和MS模型进行对比验证，结果如图4所示。



（a）横摆角速度

（b）侧向加速度

图4 MS与SBW模型对比曲线

由图4可知，在DLC工况下，MS与SBW模型横摆角速度以及侧向加速度的变化趋势基本保持一致，其中，MS与SBW模型横摆角速度曲线的峰值差值为0.127 (°)/s，侧向加速度曲线的峰值差值为0.004 g，两者均处于允许范围内。说明SBW系统模型能够正确反映汽车操纵稳定性响应，可用于后续控制策略研究的仿真验证。

4.2 联合仿真模型试验分析

为了评估上述车辆稳定性控制策略的效果，采用双移线工况作为标准测试工况，在高速高附着系数和中速低附着系数2种条件下，分别进行无控制、可变转向传动比（Variable Steering Ratio，VSR）控制和基于变传动比的自适应全局快速终端滑模（Variable Steering Ratio-Adaptive Global Fast Terminal Sliding Mode，VSR-AGFTSM）控制仿真对比分析。

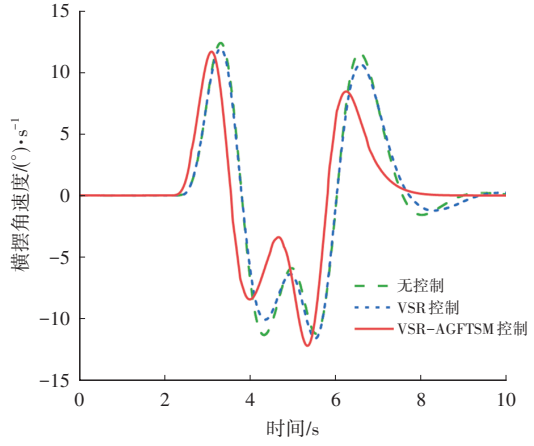
4.2.1 高速高附着系数工况

在CarSim软件中选择DLC工况，设置路面附着系数μ = 0.85，车辆纵向车速为80 km/h，3组车辆模型的

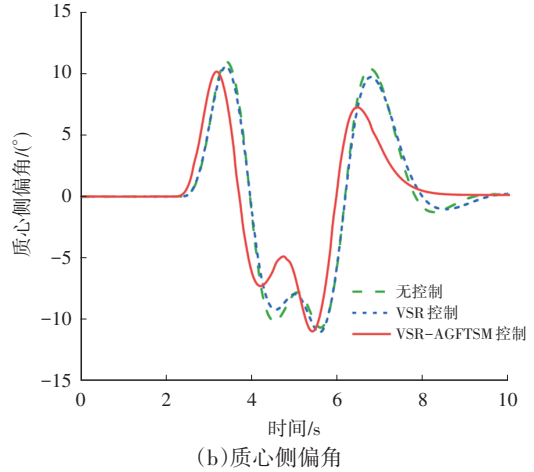
控制效果如表4所示，仿真响应曲线如图5所示。

表4　高速高附着系数下不同控制效果对比

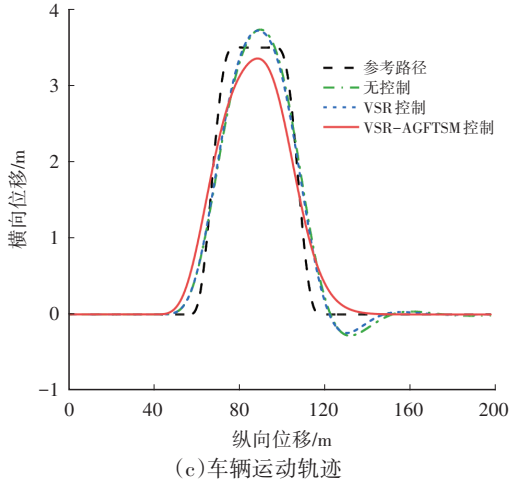
控制方式	横摆角速度/(°)·s^{-1}	质心侧偏角/(°)	横向位移/m	参考位移/m
无控制	12.369	1.098	3.736	3.500
VSR	11.904	1.057	3.723	3.500
VSR-AGFTSM	11.662	1.017	3.375	3.500



(a)横摆角速度



(b)质心侧偏角



(c)车辆运动轨迹

图5　高速高附着系数、双移线工况仿真分析

由表4和图5可知，相较于无控制和单一变传动比控制，VSR-AGFTSM控制下的横摆角速度峰值分别减少5.72%、2.03%；质心侧偏角峰值分别减少7.38%、3.78%；横向位移误差从6.37%降至3.57%。可见，VSR-AGFTSM控制下的横摆角速度响应幅值最小，整体幅值衰减更快，使车辆姿态更容易恢复稳定，质心侧偏角的趋势与横摆角速度一致，在横向位移方面，VSR-AGFTSM控制也更加平稳。

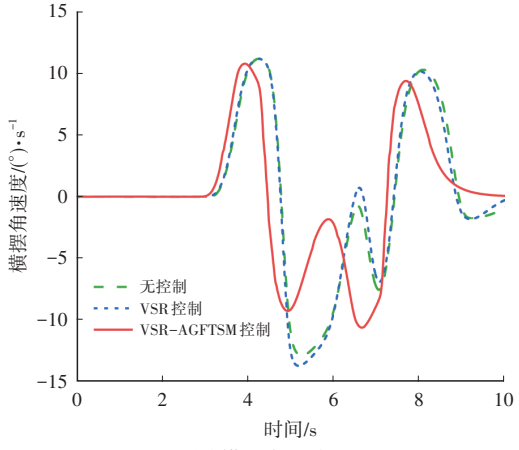
4.2.2　中速低附着系数工况

在CarSim软件中选择DLC工况，设置路面附着系数μ = 0.3，车辆纵向车速为65 km/h，3组车辆模型的控制效果如表5所示，仿真响应曲线如图6所示。

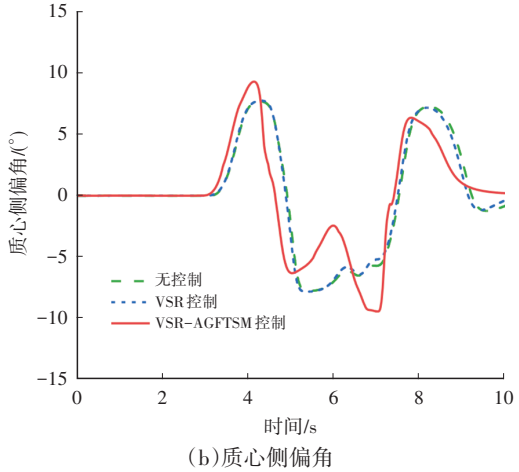
表5　中速低附着系数下不同控制效果对比

控制方式	横摆角速度/(°)·s^{-1}	质心侧偏角/(°)	横向位移/m	参考位移/m
无控制	11.237	0.777	3.841	3.500
VSR	11.228	0.772	3.787	3.500
VSR-AGFTSM	10.828	0.933	3.426	3.500

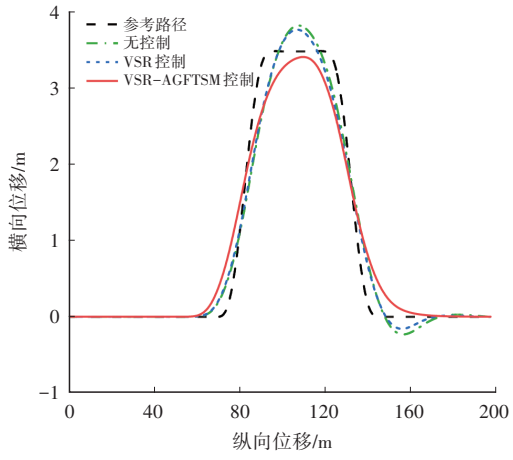
由表5可知，相较于无控制和单一变传动比控制，VSR-AGFTSM控制下的横摆角速度峰值分别减少3.64%和3.56%；横向位移误差从9.74%降至2.11%，前两组控制的行驶轨迹偏离程度较大，与理想轨迹相比稍显迟滞，而VSR-AGFTSM控制能较好地跟踪理想轨迹。



(a)横摆角速度



(b)质心侧偏角



（c）车辆运动轨迹

图6　中速低附着系数、双移线工况仿真分析

在图6a中，VSR-AGFTSM控制具有更快的初期响应，同时曲线第1个负谷值和第2个正峰值均小于其他控制，整体幅值衰减速度更快，说明其在抑制振荡和提升收敛性方面具有优势，而换向阶段的负峰值和第2个负谷值最小，这是由于控制器响应更快，使车辆为尽快完成方向切换而产生更大的反向横摆角速度输入，导致负向峰值放大，在一定程度上具有合理性。

在图6b中，车辆质心侧偏角的初始阶段趋势与横摆角速度一致，同样能更快达到第1个正峰，但VSR-AGFTSM控制首峰的绝对值相较其他控制要大，主要源于控制器在中速时对横摆响应的优先考虑，随后各阶段峰谷的幅值整体减少，体现其更快的衰减特性和横滑收敛能力，而第2个负谷值相比其他控制更大是由横摆角速度导致。由于质心侧偏角整体仍保持在−2°~2°，以上现象均属于合理范围。

因此，相对于无控制以及仅VSR控制，基于综合考虑横摆角速度和质心侧偏角反馈的VSR-AGFTSM控制策略能够更准确地跟踪车辆期望运动状态，并能显著提升车辆的操纵稳定性。虽然在中速低附着系数工况下，该策略会导致车辆质心侧偏角峰值略微增加，但仍能够展现出更优的综合稳定性控制效果。

5　结束语

本文以线控转向汽车操纵稳定性为研究对象，在可变转向传动比的基础上，提出了一种基于改进滑模控制器设计，综合利用横摆角速度和质心侧偏角作为反馈变量的主动转向稳定性控制策略，实现了车辆运动状态的实时调节与前轮补偿转角的主动优化。在部分低附着工况下，本文方法的控制效果仍存在横摆角速度响应和质心侧偏角控制间的性能权衡，未来研究将进一步结合多工况适应性控制、参数优化及智能控制方法，以提升线控转向系统在复杂道路环境下的稳定性与鲁棒性。

参　考　文　献

[1] 王国超，高森祺．汽车线控转向系统研究综述[J]．汽车文摘，2024(3)：9-20.
WANG G C, GAO S Q. A Review of Research on Automotive Steer-By-Wire Systems[J]. Automotive Digest, 2024(3): 9-20.

[2] MORTAZAVIZADEH A S, GHADERI A, EBRAHIMI M, et al. Recent Developments in the Vehicle Steer-By-Wire System[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(3): 1226-1235.

[3] GAO J, QI X P. Study of the Influence of Universal Gearing of Steering System on Vehicle Handling Stability[J]. Science Progress, 2023, 106(3).

[4] HANG P, XIA X, CHEN G, et al. Active Safety Control of Automated Electric Vehicles at Driving Limits: A Tube-Based MPC Approach[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 8(1): 1338-1349.

[5] 王晓峰，汪选要．线控转向系统变角传动比设计及路感模拟[J]．机械设计与制造，2021(3)：185-188.
WANG X F, WANG X Y. Variable Steering Ratio Design and Road Feel Simulation of Steer-By-Wire System[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2021(3): 185-188.

[6] 陈哲明，钟诚，李环宇，等．粒子群优化线控转向变角传动比模糊控制器设计[J]．重庆理工大学学报（自然科学），2022, 36(12)：41-49.
CHEN Z M, ZHONG C, LI H Y, et al. Design of Fuzzy Controller for Variable Steering Ratio of Steer-By-Wire System Based on Particle Swarm Optimization[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(12): 41-49.

[7] LIU Z Y, XU X, XIE J, et al. Variable Transmission Ratio Design of a Steer-By-Wire System for Intelligent Vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(16): 9341-9353.

[8] 屈小贞，冯浩轩，李刚．基于主动转向与模糊滑模控制ESP的协同控制研究[J]．现代制造工程，2021(12)：60-67.
QU X Z, FENG H X, LI G. Research on Cooperative Control of ESP Based on Active Steering and Fuzzy Sliding Mode Control[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(12): 60-67.

[9] 黄华，高艺鹏，王伟达，等．基于新型趋近律的智能无人车辆线控转向系统滑模控制[J]．北京理工大学学报，2023, 43(8)：773-782.
HUANG H, GAO Y P, WANG W D, et al. Sliding Mode Control of Steer-By-Wire System for Intelligent Unmanned

Vehicle Based on Novel Reaching Law[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(8): 773-782.

[10] 万文斗，喻凡，陈俐. 基于滑模的线控转向车辆横向稳定性分层控制[J]. 传动技术，2023，37(1)：3-12.
WAN W D, YU F, CHEN L. Hierarchical Control for Lateral Stability of Steer-By-Wire Vehicles Based on Sliding Mode[J]. Drive System Technique, 2023, 37(1): 3-12.

[11] 陈林彬，唐岚. 面向线控转向车辆的横向稳定性分层控制[J]. 机械设计与制造，2024(2)：204-209.
CHEN L B, TANG L. Hierarchical Control for Lateral Stability of Steer-By-Wire Vehicles[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2024(2): 204-209.

[12] 孙有平，李崧，何江美，等. 汽车线控转向系统稳定性控制策略研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，2024，38(7)：37-43.
SUN Y P, LI S, HE J M, et al. Research on Stability Control Strategies of Automotive Steer-By-Wire System[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(7): 37-43.

[13] 李崧，孙有平，吴光庆，等. 基于滑模理论的线控转向汽车稳定性控制研究[J]. 现代制造工程，2024(4)：87-93.
LI S, SUN Y P, WU G Q, et al. Research on Stability Control of Steer-By-Wire Vehicles Based on Sliding Mode Theory[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2024(4): 87-93.

[14] ZHANG J, WANG H, ZHENG J C, et al. Adaptive Sliding Mode-Based Lateral Stability Control of Steer-By-Wire Vehicles with Experimental Validations[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(9): 9589-9600.

[15] 郭孔辉，丁海涛，宗长富，等. 人—车闭环操纵性评价与优化的研究进展[J]. 机械工程学报，2003(10)：27-35.
GUO K H, DING H T, ZONG C F, et al. Research Progress on Human-Vehicle Closed-Loop Handling Performance Evaluation and Optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003(10): 27-35.

[16] DU H P, ZHANG N, NAGHDY F. Velocity-Dependent Robust Control for Improving Vehicle Lateral Dynamics[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 19(3): 454-468.

[17] SUN X Q, WANG Y J, CAI Y F, et al. An Adaptive Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control for Yaw Stability Control of Bus Based on STI Tire Model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1).

[18] GE P S, GUO L, FENG J D, et al. Adaptive Stability Control Based on Sliding Model Control for BEVs Driven by In-Wheel Motors[J]. Sustainability, 2023, 15(11).

（责任编辑　瑞　秋）

修改稿收到日期为2025年10月9日。

《汽车工程师》征稿启事

《汽车工程师》于1974年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主管、中国第一汽车股份有限公司主办的国内外公开发行的汽车应用技术类学术期刊，为RCCSE中国准核心学术期刊、CACJ中国应用型扩展期刊，被哥白尼精选数据库、EBSCO学术数据库、欧洲学术出版中心(EuroPub)数据库、J-Gate数据库收录。

《汽车工程师》以报道汽车产品设计领域的技术研究成果为主，专注于技术开发与应用层面的创新成果，提供汽车设计创新解决方案。《汽车工程师》将把握电动化、智能化、网联化、共享化的汽车技术主流发展趋势，努力吸收优质稿源，为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。重点征稿方向包括：锂离子电池与新体系电池、动力电池热管理与热失控、燃料电池及其关键零部件、车用电机及其控制器、自动驾驶汽车环境感知与感知融合、自动驾驶汽车定位与建图、自动驾驶汽车测试、人工驾驶-无人驾驶车辆混行条件下的自动驾驶控制、智能线控底盘、一体化底盘、功能安全和预期功能安全。

热忱欢迎汽车行业的专家学者不吝赐稿，反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将优先发表，我们期待与您共同践行“把论文写在祖国大地上”的指示精神，为强大中国汽车工业作贡献！

本刊使用协同采编系统处理稿件，请登陆期刊网站注册后投稿，投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的作者指南，网址：http://tjqc.cbpt.cnki.net。

《汽车工程师》编辑部