

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.04.014

# 基于 ESO 与 NTSM 的汽车主动前轮转向控制

桑楠<sup>1,2</sup> 魏民祥<sup>2</sup>

(1. 常州工学院机械与车辆工程学院,常州,213002;2. 南京航空航天大学能源与动力学院,南京,210016)

**摘要:**提出基于扩张状态观测器(Extended state observer,ESO)与非奇异终端滑模(Nonsingular terminal sliding mode,NTSM)的车辆主动前轮转向控制。首先建立二自由度车辆模型计算车辆理想参考横摆角速度。其次以二自由度模型为基础设计扩张状态观测器与非奇异终端滑模控制器,扩张状态观测器能估计车辆状态与扰动,非奇异终端滑模控制器能对扰动进行补偿并输出控制量。最后在 Matlab/Simlink 中建立了扩张状态观测器与非奇异终端滑模控制器,采用 CarSim 非线性车辆模型进行仿真试验,研究了 NTSM 与 PID 控制器的闭环控制性能以及鲁棒性,并对两种控制器试验结果进行对比。结果表明,非奇异终端滑模控制的主动前轮转向系统能有效改善车辆的操纵稳定性,控制器具有强抗干扰能力、良好的路径跟踪性能和鲁棒性,且优于 PID 控制器。

**关键词:**主动前轮转向;扩张状态观测器;终端滑模控制;操纵稳定性

**中图分类号:**U461.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2018)04-0521-07

## Design of ESO and NTSM Controller for Vehicle Active Front Steering

SANG Nan<sup>1,2</sup>, WEI Minxiang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, 213002, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Vehicle active front steering (AFS) control based on extended state observer (ESO) and nonsingular terminal sliding mode (NTSM) control is proposed. First, a two degree of freedom (2-DOF) vehicle model is introduced in order to calculate the desired yaw rate. Then, ESO and NTSM controller are designed based on 2-DOF. The ESO can estimate the vehicle state and disturbance. The NTSM controller can compensate the disturbance and output a control. Finally, ESO and NTSM controller are established in Matlab/Simlink, and CarSim the nonlinear vehicle model is controlled to simulate. Closed-loop control performance and robustness of NTSM and PID controller are studied. The test results of two kinds of controller are compared. The results show that the NTSM control of vehicle AFS system can effectively improve the controllability and stability of vehicle. The controller has strong anti-disturbance ability, good tracking performance and robustness, which is better than PID controller.

**Key words:** active front steering; extended states observer; terminal slide mode control; controllability and stability

汽车主动安全控制是减少交通事故的重要措施之一,众多学者对此深入研究以提高车辆行驶稳定性,并取得了大量的实用成果,如制动系统(Anti-lock braking system, ABS),直接横摆力矩控制(Direct yaw moment control, DYC),电子稳定程序(Electronic stability program, ESP),主动前轮

ti-lock braking system, ABS),直接横摆力矩控制(Direct yaw moment control, DYC),电子稳定程序(Electronic stability program, ESP),主动前轮

**基金项目:**国家自然科学基金(51375007)资助项目。

**收稿日期:**2018-03-11;**修订日期:**2018-05-06

**通信作者:**桑楠,男,博士研究生,副教授,E-mail:sc\_sangan@sina.com。

**引用格式:**桑楠,魏民祥.基于 ESO 与 NTSM 的汽车主动前轮转向控制[J].南京航空航天大学学报,2018,50(4):521-527. SANG Nan, WEI Minxiang. Design of ESO and NTSM controller for vehicle active front steering[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(4): 521-527.

转向(Active front steering, AFS)等,这些系统的实车装备极大改善了车辆的行驶安全性。ABS, DYC, ESP 等控制系统是控制车轮的纵向受力来改善车辆的稳定性, AFS 是通过给前轮施加一个独立于驾驶员的附加转角改变车轮的横向受力来改善车辆的操纵稳定性。

PID 控制在工业控制中有着广泛的应用,由于不便于提取系统的微分信号,在实际控制中常用比例微分(Proportion integration, PI)控制,其对于线性系统具有良好的控制效果。如果把车辆动力学系统作为线性系统,采用 PI 控制技术设计主动前轮控制器是一个不错的选择,如 PI 反馈控制器<sup>[1-3]</sup>、自适应模糊 PI 控制器<sup>[4]</sup>用于跟踪横摆角速度。但是,PI 控制器不但参数难以调节,而且用于非线性控制系统的鲁棒性不高。而车辆动力学系统亦是一个高度的非线性系统,存在建模误差、参数摄动和外部干扰这些因素影响闭环控制系统性能。滑模控制(Sliding mode control, SMC)对于系统不确定性及外部扰动具有良好的鲁棒性,且不需要精确的数学模型,广泛应用于车辆的主动安全控制。如文献[5-8]采用传统的线性滑模面设计 AFS 控制器,跟踪车辆的横摆角速度和质心侧偏角,但线性滑模控制在无限时间内收敛于零点,且控制器的输出存在振颤。文献[9-11]把终端滑模控制(Terminal sliding mode, TSM)用于 AFS 控制器设计,在有限时间收敛于零点,控制器输出不存在振颤问题,但存在奇异问题。为避免控制器奇异,同时加快远离滑模面状态的收敛速度,设计了非奇异终端滑模控制(Non-singular terminal sliding mode, NTSM),如文献[12-13]分别设计了跟车控制系统与液位跟踪控制系统,都取得了良好的控制效果。

扩张状态观测器(Extended state observer, ESO)能及时估计车辆状态和系统扰动,并对扰动进行补偿,则 ESO 与 NTSM 结合能提高 NTSM 控制器的性能。本文提出基于 ESO 与非奇异终端滑模控制的主动前轮转向系统,ESO 估计系统的各阶状态,NTSM 跟踪车辆理想横摆角速度,控制车辆横向稳定性。

## 1 车辆主动前轮转向系统

### 1.1 二自由度车辆模型

忽略悬架的影响,不考虑载荷变化对轮胎特性和回正力矩的影响,则车辆模型可以简化为线性二自由度模型,如图 1 所示。该模型常用于研究车辆的侧向运动和横摆运动。如果忽略车速的变化,且前轮转角较小,则式(1)动力学方程描述车辆二自

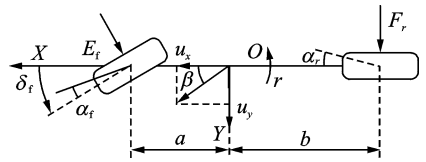


图 1 车辆二自由度模型

Fig. 1 2-DOF model of vehicle

度模型为

$$\begin{cases} \dot{r} = \frac{a^2 C_1 + b^2 C_2}{I_z m u_x} r + \frac{a C_1 - b C_2}{I_z} \beta - \frac{a C_1}{I_z} \delta_f \\ \dot{\beta} = \left( \frac{a C_1 - b C_2}{m u_x^2} - 1 \right) r + \frac{C_1 + C_2}{m u_x} \beta - \frac{C_1}{m u_x} \delta_f \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $m$  为汽车质量;  $I_z$  为绕  $Z$  轴的转动惯量,其中,  $Z$  为过坐标系原点  $O$  且垂直于  $X$  轴和  $Y$  轴确定的平面,方向向上;  $r$  为横摆角速度;  $\beta$  为质心侧偏角;  $C_1, C_2$  分别为前后轴侧偏刚度;  $a, b$  分别为质心到前后轴的距离;  $\delta_f$  为前轮转角;  $u_x$  为车辆前进速度。

### 1.2 主动前轮转向车辆模型

线控转向系统(Steering by wire, SBW)能实现主动转向,但由于法规要求转向盘与前轮必须通过机械进行连接,故目前 SBW 系统未实用于商用车;另一种主动转向系统是通过给前轮施加一个独立于驾驶员的前轮转角实现的,典型的有宝马公司的 2 自由度行星齿轮机构转向器,奥迪公司的谐波齿轮机构转向器等。本文研究主动前轮转向系统<sup>[14]</sup>,如图 2 所示。齿轮齿条转向器输入为  $\delta_p$  (行星齿轮机构输出),由  $\theta_{sw}$  和主动转向电机转角  $\theta_{ac}$  叠加得到。

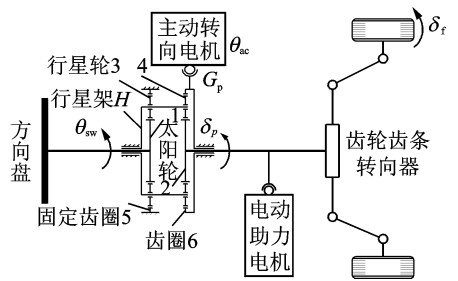


图 2 主动前轮转向系统组成

Fig. 2 AFS system

式(1)描述车辆模型中的前轮转角  $\delta_f = \delta_{sw} + \delta_{ac}$ , 其中  $\delta_{sw}$  由转向盘转角  $\theta_{sw}$  产生 ( $\delta_{sw} = \theta_{sw}/G$ ,  $G$  为车辆转向系统传动比),  $\delta_{ac}$  由主动转向电机转角  $\theta_{ac}$  产生。

$$\delta_p = \theta_{sw} - \frac{Z_6}{Z_1 G_p} \theta_{ac} \quad (2)$$

式中:  $G_p$  为主动转向电机与齿圈 6 之间蜗轮蜗杆机构传动比,  $Z_1, Z_6$  分别为太阳轮与齿圈 6 的齿数。

由式(2)可知

$$\delta_{ac} = -\frac{Z_b}{Z_1 G_p G} \theta_{ac} \quad (3)$$

通过控制  $\theta_{ac}$  的大小与方向实现主动转向,同时实现转向系统传动比可变。

## 2 ESO 与 NTSM 控制器

### 2.1 扩张状态观测器 ESO 基本理论

扩张状态观测器 ESO 首先由韩京清提出<sup>[15]</sup>,特别适用于估计存在模型与参数误差、外部扰动的非线性系统状态,赵志良证明了 ESO 的收敛性<sup>[16]</sup>。对于非线性系统,有

$$y^{(n)} = f(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, t) \quad (4)$$

式中:  $f(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, t)$  为未知非线性函数,  $y$  为量测输出。

如果将变量  $y^{(n)}$  也当作状态变量,则得到被扩张的状态变量  $y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, y^{(n)}$ 。

构造非线性系统<sup>[17-18]</sup>

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - \beta_{01} g_1(e) \\ \vdots \\ \dot{\hat{x}}_n = \hat{x}_{n+1} - \beta_{0n} g_n(e) \\ \dot{\hat{x}}_{n+1} = -\beta_{0, n+1} g_{n+1}(e) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $e = \hat{x}_1 - y$ 。

文献[15]指出,选取适当非线性函数  $g_1, \dots, g_{n+1}$  和系数  $\beta_{0,1}, \dots, \beta_{0, n+1}$ , 则此系统各状态分别跟踪被扩张的状态变量  $y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, y^{(n)}$ , 即

$$\hat{x}_1 \rightarrow y, \dots, \hat{x}_n \rightarrow y^{(n-1)}, \hat{x}_{n+1} \rightarrow y^{(n)}$$

### 2.2 主动前轮转向扩张状态观测器设计

考虑式(1)系统为主动前轮转向系统,对式(1)两边求导,并整理其第1个方程,则

$$\ddot{r} = f(r, \dot{r}, a_y) + B\dot{\delta}_f \quad (6)$$

式中:  $a_y$  为侧向加速度;  $B = -\frac{aC_1}{I_z}$ ;  $\dot{\delta}_f = \dot{\delta}_{sw} + \dot{\delta}_{ac}$ ;

$$f(r, \dot{r}, a_y) = \frac{a^2 C_1 + b^2 C_2}{I_z u_x} \dot{r} - \frac{aC_1 - bC_2}{I_z} r + \frac{aC_1 - bC_2}{I_z u_x} a_y$$

令  $\dot{x}_1 = x_2 = \dot{r}$ , 式(6)可写成如下二阶系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(r, \dot{r}, a_y, \dot{\delta}_{sw}) + B\dot{\delta}_{ac} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)由线性二自由度系统推导得来,而实际上车辆是一个高度的非线性系统,  $f(r, \dot{r}, a_y, \dot{\delta}_{sw})$  包括车辆二自由度模型中未考虑的非线性、模型及参数的不确定性以及系统外扰等,称之为总和扰动。扩张  $f(r, \dot{r}, a_y, \dot{\delta}_{sw})$  为系统状态  $x_3$ , 则按式(5)设计扩张状态观测器估计系统状态  $x_1, x_2$  以及

总和扰动  $f(r, \dot{r}, a_y, \dot{\delta}_{sw})$ , 则

$$\begin{cases} e = z_1 - y^* \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 \cdot e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 \cdot \text{Fal}(e, \xi, \Delta) + B\dot{\delta}_{ac} \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 \cdot \text{Fal}(e, \xi_1, \Delta_1) \end{cases} \quad (8)$$

适当选择式(8)中增益  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  以及非线性函数 Fal, 则  $z_1 \rightarrow x_1, z_2 \rightarrow x_2, z_3 \rightarrow x_3$ 。非线性函数 Fal 可以采用不同的形式,本文中 Fal 表达式为<sup>[17]</sup>

$$\text{Fal}(e, \xi, \Delta) = \begin{cases} |e|^\xi \text{sign}(e) & |e| > \Delta \\ e\Delta^{\xi-1} & |e| \leq \Delta \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\xi$  和  $\Delta$  为正数。

### 2.3 非奇异终端滑模控制器 NTSM 设计

滑模变结构控制对系统的模型误差和外扰具有良好的鲁棒性,广泛应用于非线性系统的控制。其中, TSM 由于在有限时间内收敛以及改善了控制器输出的“抖振”问题,能取代传统线性滑模控制 SMC 成为研究热点<sup>[18-19]</sup>。文献[20]对终端到达律进行设计,使控制律完全消除负指数项,从而解决了 TSM 控制的奇异问题,同时进一步改善“抖振”。文献[21]构造了带状态高次项的非奇异快速终端滑模函数,设计了终端吸引子得到连续且无负指数项的滑模控制律。本文结合 ESO 与文献[21]的 NTSM 控制方法对车辆主动前轮转向进行控制。

针对式(7)所描述系统,设计其滑模面与终端吸引子<sup>[21]</sup>, 则

$$\begin{cases} s = x_1 + \frac{1}{\alpha} x_1^{g/h} + \frac{1}{\beta} x_2^{p/q} \\ \dot{s} = (-\varphi s - \gamma s^{m/n}) x_2^{p/q-1} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\alpha, \beta$  为正实数;  $g, h, p, q, m, n$  为正奇数, 且满足  $1 < p/q < 2, g/h > p/q, 0 < m/n < 1$ 。

则式(7)的控制律  $u = B\dot{\delta}_{ac}$  可表达为

$$u = -\frac{\beta q}{p} \left[ (\varphi s + \gamma s^{m/n}) + x_2^{2-\frac{p}{q}} \left( 1 + \frac{g}{ah} x_1^{\frac{g}{h}-1} \right) \right] - x_3 \quad (11)$$

式(11)时间连续无负指数项,避免了控制奇异及控制律抖振。式中  $\dot{\delta}_{sw}$  可以通过微分跟踪器<sup>[17]</sup>对  $\delta_{sw}$  进行微分得到。状态变量  $x_1, x_2, x_3$  由扩张状态观测器 ESO 进行估计,则主动前轮转向的控制结构如图3所示。式(11)中的状态由估计状态代替,则

$$u = -\frac{\beta q}{p} \left[ (\varphi s + \gamma s^{m/n}) + z_2^{2-\frac{p}{q}} \left( 1 + \frac{g}{ah} z_1^{\frac{g}{h}-1} \right) \right] - z_3 \quad (12)$$

NTSM 控制器控制输入为扩张状态观测器 ESO 估计的车辆状态, ESO 的输入为车辆实际横摆角速度  $r$  与参考横摆角速度  $r_d$ , 控制器的输出

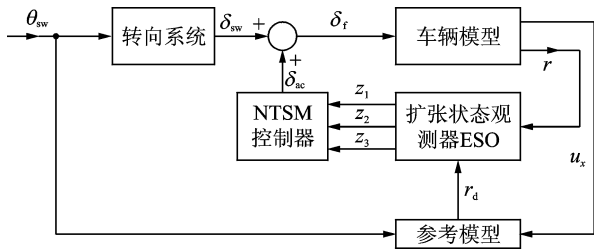


图3 主动前轮转向控制结构

Fig.3 Control structure of AFS

为前轮附加转角。参考横摆角速度  $r_d$  为

$$\begin{cases} r_d = \frac{u_x \theta_{sw}}{L(1 + Ku_x^2)G} & |r_d| < \frac{\mu g}{u_x} \\ r_d = \frac{\mu g}{u_x} & |r_d| \geq \frac{\mu g}{u_x} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $K$  为不足转向系数； $\mu$  为道路附着系数； $L$  为车辆轴距； $g$  为重力加速度。

### 3 ESO 与 NTSM 控制仿真试验

本文在 Matlab 软件中搭建 NTSM 控制器，控制 CarSim 非线性车辆模型(CS B-CLASS)进行仿真验证 NTSM 的控制效果。分别进行抗外扰、参数摄动和路径跟踪试验，并对两种控制器(PID 和 NTSM)的试验结果进行分析。车辆模型主要参数见表 1，控制器参数见表 2。

表 1 车辆模型主要参数

Tab.1 Main parameters of vehicle model

参数名称	数值
整车质量 $m/\text{kg}$	1 231
质心距前轴距离 $a/\text{m}$	1.04
质心距后轴距离 $b/\text{m}$	1.56
整车绕 $z$ 轴转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2 031
前轴车轮侧偏刚度, $C_1/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-76 000
后轴车轮侧偏刚度, $C_2/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-76 000
转向系统机械传动比 $G$	16

表 2 控制器参数

Tab.2 Controller parameters

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$\beta_1$	100	$p$	13	$\alpha$	0.5
$\beta_2$	200	$q$	11	$\beta$	0.02
$\beta_3$	300	$g$	17	$\gamma$	1
$K_p$	10	$h$	11	$\varphi$	0.5
$K_i$	0.05	$m$	1		
$K_d$	0.2	$n$	3		

#### 3.1 抗外扰试验

工况：车辆直线行驶，有随机横向风的外界扰动，横向风模型如图 4 所示；试验车速  $u_x = 80 \text{ km/h}$ ，道路附着系数 0.85。

图 5 为主动转向车辆在随机横向风作用下直线行驶仿真试验结果。在图 4 横向风的干扰下，无

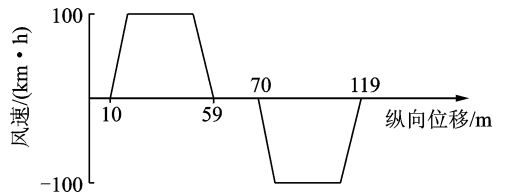


图 4 随机横向风

Fig.4 Random crosswind

控制车辆偏离直线路径较严重，PID 和 NTSM 控制车辆路径偏离均得到有效抑制。在整个试验过程中，无控制车辆侧向路径偏离最大达 2 m，PID 控制车辆侧向路径偏离最大达 0.73 m，而 NTSM 控制侧向偏离最大为 0.45 m，NTSM 控制对外界干扰具有明显的抑制作用，效果好于 PID 控制。

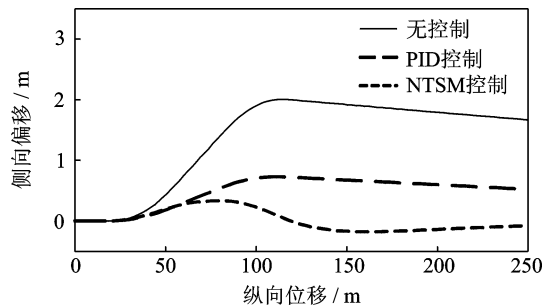


图 5 车辆抗外扰试验

Fig.5 Test of vehicle resistance to external disturbance

#### 3.2 高附着路面路径跟踪试验

工况：双移线试验预期路径设置<sup>[22-23]</sup>如图 6 所示。附着系数为 0.85；车速为  $u_x = 100 \text{ km/h}$ 。

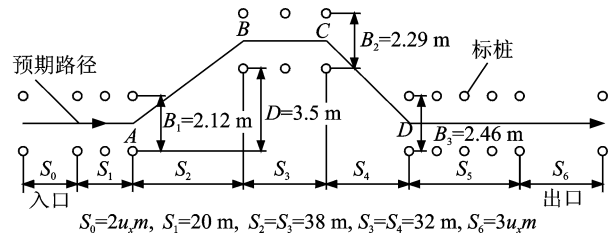


图 6 双移线试验路径设置

Fig.6 Double lane change test path setting

图 7 是高附着路面双移线仿真试验路径跟踪结果。NTSM 控制效果明显，能较好完成双移线试验，PID 控制亦能完成双移线试验，但路径跟踪性能不如 NTSM 控制，而无控制车辆存在较大偏离。在试验结束回到到直线段，NTSM 控制车辆超调量为 0.12 m，PID 控制车辆超调量为 0.29 m，无控制车辆超调量为 0.38 m，表明 NTSM 控制能明显抑制超调。

图 8 是高附着路面双移线试验车辆横摆角速度响应。PID 控制能改善横摆角速度跟踪性能，而 NTSM 控制对横摆角速度跟踪性能好于 PID 控制。

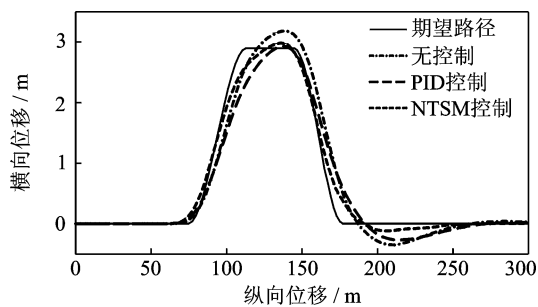


图7 双移线试验车辆行驶轨迹(高附着)

Fig.7 Vehicle track of double lane change test(high- $\mu$ )

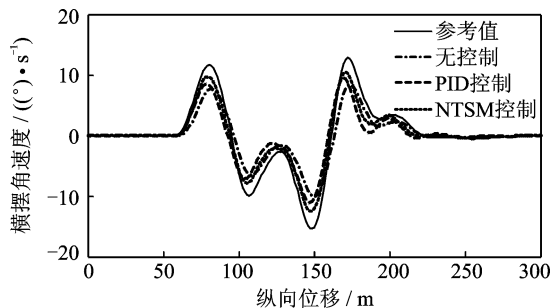


图8 双移线试验横摆角速度响应(高附着)

Fig.8 Yaw rate response of double lane change test (high- $\mu$ )

### 3.3 低附着路面路径跟踪试验

低附着路面双移线试验工况除路面附着系数为 0.3,其他与高附着路面双移线试验工况一致。

图 9 是低附着路面双移线试验车辆行驶轨迹。图 9 表明,在低附着路面上有与高附着路面上相似的试验结果,主动前轮转向控制车辆各种性能优于未控制车辆。其中,NTSM 控制优于 PID 控制,有较好的路径跟踪和抑制超调的性能。

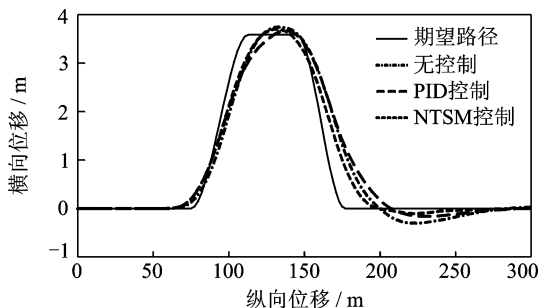


图9 双移线试验车辆行驶轨迹(低附着)

Fig.9 Vehicle track of double lane change test(low- $\mu$ )

图 10 是低附着路面上双移线试验横摆角速度响应。横摆角速度的极限值由路面附着系数决定,超过极限值车辆将发生侧滑。图 10 试验结果表明,在部分时段,未控制车辆的横摆角速度响应超出极限值较多,车辆将发生侧滑;PID 控制横摆角速度响应亦有超出极限值现象,但超出数值较小;而 NTSM 控制车辆横摆角速度响应在极限值内。

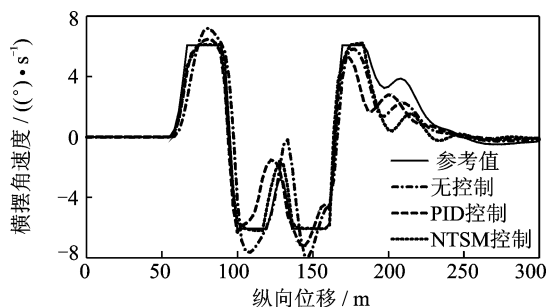


图10 双移线试验横摆角速度响应(低附着)

Fig.10 Yaw rate response of double lane change test (low- $\mu$ )

高、低附着路面双移线试验表明,NTSM 控制车辆具有好的路径跟踪、横摆角速度跟踪性能,能够把横摆角速度响应控制在极限范围内。所以,NTSM 控制的主动前轮转向系统提高了车辆的操纵稳定性和行驶安全性。

### 3.4 车辆参数变化的影响

改变试验车辆模型的总质量,其他参数不变,同时控制器参数不变。车辆总质量增加(增加的质量用百分比表示):0%,25%,50%,75%和 100%,各种工况仿真试验结果如图 11 所示。NTSM 控制器能控制车辆较好完成试验,跟踪轨迹略有变化,在回到直线段( $S_5, S_6$ ),其超调量随质量的增加而增大。试验结果表明控制器对车辆质量参数的变化具有鲁棒性。

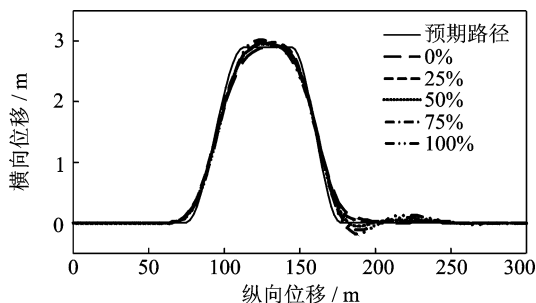


图11 车辆质量参数变化对控制器性能影响

Fig.11 Influence of vehicle quality parameters change on controller performance

实际上,一般随质量的变化,车辆的质心位置会发生变化,前后桥垂直载荷的变化又会引起轮胎侧偏刚度的变化;车辆是一个复杂的非线性系统,采用线性二自由度车辆模型设计控制器,还存在未建模误差。因此,上述试验结果表明 NTSM 控制器对车辆的内扰(未建模误差,参数摄动等)具有较好的鲁棒性。

## 4 结束语

文章提出的基于 ESO 与 NTSM 的主动前轮

转向控制器实现车辆实际横摆角速度跟踪理想横摆角速度,控制车辆横摆角速度响应于安全阈值内,提高了车辆的操纵稳定性。仿真试验结果表明,NTSM控制具有较强的抗内外干扰的能力,跟踪性能良好,控制器本身鲁棒性好。而且NTSM控制器设计过程中未针对具体的数学模型和具体问题,其可移植性好,但控制器参数较多,存在参数调制不易的问题,同时还应指出的是AFS系统是通过改变车辆的横向受力进行主动控制,因此,AFS与其他通过改变车辆纵向受力进行主动安全控制的系统,如直接横摆力矩控制DYC等进行集成,能进一步改善车辆的操纵稳定性。

### 参考文献:

- [1] LI Q, SHI G, WEI J, et al. Yaw stability control of active front steering with fractional-order PID controller[C]//International Conference on Information Engineering and Computer Science. [S. l]: IEEE, 2009:1-4.
- [2] WANG L, LIU G, ZHANG D, et al. Integrated control of active front steering and direct yaw moment for multi-wheel independently driven electric vehicles[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. [S. l]: IEEE, 2014: 2301-2304.
- [3] DIAO Xiaoyan, JIN Yang, MA Li, et al. Composite active front steering controller design for vehicle system[J]. IEEE Access, 2017, 5:6697-6706.
- [4] KADIR Z, MAZLAN S, ZAMZURI H, et al. Adaptive fuzzy-PI control for active front steering system of armoured vehicles: Outer loop control design for firing on the move system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 61(3):187-195.
- [5] AKAR M, KALKKUHL J C. Lateral dynamics emulation via a four-wheel steering vehicle[J]. Vehicle System Dynamics, 2008,46(9):803-829.
- [6] DING S, LIU L, ZHENG W X. Sliding mode direct yaw-moment control design for in-wheel electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8):6752-6762.
- [7] TIAN W, ZHANG C, QIAN C, et al. Global stabilization of inherently nonlinear systems using continuously differentiable controllers[J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 77(3):739-752.
- [8] TIAN W, DU H, QIAN C. A generalized homogeneous solution for global stabilization of a class of non-smooth upper-triangular systems[J]. International Journal of Control, 2014, 87(5):951-963.
- [9] ZHOU Q, YAO D, WANG J, et al. Robust control of uncertain semi-Markovian jump systems using sliding mode control method[J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, 286:72-87.
- [10] DING S, LI S. Second-order sliding mode controller design subject to mismatched term [J]. Automatica, 2017, 77:388-392.
- [11] CHEN Jansong, CHEN Nan, YIN Guodong. 4-wheels vehicle sliding mode robust stability control considering the nonlinear characteristics[J]. Journal of Southeast University, 2010, 40(5):969-972.
- [12] 李升波, 李克强, 王建强, 等. 非奇异快速的终端滑模控制方法及其跟车控制应用[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5):543-550.  
LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jianqiang, et al. Nonsingular fast terminal-sliding-mode control method and its application on vehicular following system [J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(5): 543-550.
- [13] 赵鹏, 姚敏立, 沈晓卫, 等. 非奇异快速终端滑模液位跟踪控制[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(12):39-44.  
ZHAO Peng, YAO Minli, SHEN Xiaowei, et al. Tracking control of water level based on a nonsingular fast terminal sliding mode[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(12):39-44.
- [14] 魏建伟. 主动转向控制机理及其干预时EPS系统转向路感研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.  
WEI Jianwei. Research on control mechanism of active steering and steering feeling of EPS system with the interference of active steering[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [15] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1):85-88.  
HAN Jingqing. The extended state observer of a class of uncertain systems[J]. Control and Decision, 1995, 10(1):85-88.
- [16] 赵志良. 非线性自抗扰控制的收敛性[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2012.  
ZHAO Zhiliang. Convergence of nonlinear active disturbance rejection control[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [17] 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.  
HAN Jingqing. Active disturbance rejection control technique: The technique for estimating and compen-

- sating the uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [18] MAN Z, PAPLINSKI A P, WU H R. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(12):2464-2469.
- [19] FENG Y, YU X M. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. Automatica, 2002, 38(12):2159-2167.
- [20] 冯勇, 鲍晟, 余星火. 非奇异终端滑模控制系统的设计方法[J]. 控制与决策, 2002, 17(2):194-198.  
FENG Yong, BAO Sheng, YU Xinghuo. Design method of non-singular terminal sliding mode control systems[J]. Control and Decision, 2002, 17(2):194-198.
- [21] 李升波, 李国强, 王建强, 等. 非奇异快速的终端滑模控制方法[J]. 信息与控制, 2009, 38(1):1-8.  
LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jianqiang, et al. Nonsingular and fast terminal sliding mode control method[J]. Information and Control, 2009, 38(1):1-8.
- [22] 中国国家标准化管理委员会. GB/T6323—2014, 汽车操纵稳定性试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2014.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T6323—2014, controllability and stability test PROCEDURE for automobile[S]. Beijing:Standards Press of China, 2014.
- [23] ISO/FDIS 3888-1, Passenger cars—Test track for a severe lane change manoeuvre—Part 1: Double lane change[S]. Geneva:International Standardization Organization, 2002.

(编辑:陈珺)