

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2025.05.009

线控转向系统自适应抗扰转角控制策略*

赵健¹, 何聪¹, 刘枫², 朱冰¹, 陈静¹, 陈志成¹

(1. 吉林大学, 汽车底盘集成与仿生全国重点实验室, 长春 130022; 2. 中国第一汽车集团有限公司, 长春 130013)

[摘要] 针对线控转向(steer by wire, SBW)系统主动转向时面临的系统参数不确定性、轮胎回正力矩阻碍、转向电机电磁特性耦合等非线性干扰问题, 提出一种自适应抗扰转角控制策略。采用径向基函数神经网络和鲁棒滑模理论设计外环转角控制器, 自适应补偿SBW系统参数不确定性和轮胎回正力矩阻碍。在内环电流控制器中引入线性自抗扰控制应对转向执行电机电磁特性耦合问题, 提高SBW系统动态响应性能。仿真和硬件在环试验结果表明, 设计的控制策略能够帮助SBW在多种工况中维持转角稳态跟随误差在 1.5° 内。

关键词: 车辆工程; 线控转向系统; 转角跟踪控制; 非线性干扰; 自适应控制; 硬件在环

Adaptive Anti-jamming Angle Control Strategy for Steer-by-Wire System

Zhao Jian¹, He Cong¹, Liu Feng², Zhu Bing¹, Chen Jing¹ & Chen Zhicheng¹

1. Jilin University, State Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Changchun 130022;

2. Institute of China FAW Group Co., Ltd., Changchun 130013

[Abstract] An adaptive anti-disturbance angle control strategy is proposed to address the nonlinear disturbances such as system parameter uncertainty, tire return torque obstruction, and coupling of electromagnetic characteristics of steering motors, which are faced by the active steering of Steer-by-Wire (SBW) system. A radial basis function neural network and robust sliding mode theory are used to design the outer-loop cornering controller to adaptively compensate for the SBW system parameter uncertainty and tire return torque obstruction. Linear self-immunity control is introduced into the inner-loop current controller to cope with the coupling problem of electromagnetic characteristics of the steering actuator motor so as to improve the dynamic response performance of the SBW system. The simulation and hardware-in-the-loop test results show that the designed control strategy can help the SBW maintain the cornering steady state following error within 1.5° under various operating conditions.

Keywords: vehicle engineering; steer-by-wire system; angle tracking strategy; nonlinear disturbance; adaptive control; hardware-in-the-loop

前言

摆脱复杂机械连接限制的线控转向(steer by wire, SBW)系统与传统液压助力或电动助力转向系统相比, 能够良好地匹配智能电动汽车对底盘转向系统提出的高精度、快响应主动转向功能要求^[1-3]。然而, 在主动转向过程中, SBW面临复杂的非线性

干扰问题, 这对其转角高品质控制带来了挑战^[4-5]。

目前, 国内外学者已经成功地将诸如比例-积分-微分(proportional integral derivative, PID)、三步非线性法、滑模控制(sliding mode control, SMC)等方法应用于转向系统转角控制领域。Cetin等^[6]通过PD理论和参数极点配置方法, 帮助转向系统实现了多种工况下转角高品质跟随。张博等^[7]依托三步非线性法设计了位置-转速-电流级联式转角控制器,

* 国家自然科学基金(52302471, 52172386)、中国博士后科学基金面上项目(2024M753063)和吉林省重大科技专项项目(20220301009GX)资助。

原稿收到日期为2024年01月12日, 修改稿收到日期为2024年08月01日。

通信作者: 陈志成, 讲师, 博士, E-mail: chenzhicheng@jlu.edu.cn。

综合提升了转向系统动态响应性能。罗建南等^[8]采用非线性自回归理论拟合 SBW 系统模型参数,在此基础上综合应用内模控制方法帮助 SBW 以较高精度跟随目标前轮转角。然而,由于轮-地间的复杂动力学接触,SBW 系统转向时存在显著的轮胎回正力矩阻碍问题,影响转向指令的精准传递与执行,会导致转向精度劣化和操纵稳定性下降。为此,余卓平等^[9]基于轮胎侧偏角与回正力矩的非线性映射模型设计了转角前馈补偿控制,有效提升了转向系统转角控制精度与鲁棒性。类似地,Zhang 等^[10]通过极限学习机动态逼近简化轮胎模型中的轮胎回正力矩阻碍,结合非奇异终端滑模控制有效减小了 SBW 在转角高速跟随时存在的系统抖振问题。为进一步提升鲁棒性,He 等^[11]基于鲁棒反步法理论和智能粒子群优化方法设计了转角精确控制策略,帮助转向系统在不同工况中稳定地匹配转角控制请求。此外,由于部件间存在间隙、弹性变形等原因,SBW 内部转动惯量、阻尼系数、摩擦因数等系统参数在不同转向状态时还存在一定不确定性,导致控制指令与实际转角之间的匹配度降低和系统动态特性发生变化,这对转角精确控制造成较大影响。针对该问题,Wang 等^[12]在 SBW 标称模型基础上,设计了考虑系统参数不确定性的 SMC 补偿器,保证 SBW 能够在不同工况中良好地实现转角跟随控制。Sun 等^[13]基于李雅普诺夫自适应理论设计了高阶滑模转角控制器,有效提升了转向系统在中低转速下的转角跟随精度。类似地,Zhao 等^[14]基于离散终端滑模和自抗扰理论设计了转角精确控制策略,动态补偿了转向系统参数不确定性问题。尽管已有研究对 SBW 面临的轮胎回正力矩阻碍、系统参数不确定性做出了一定的补偿,但它们在设计过程中较多依赖例如气胎拖距、不确定性扰动边界等难以精确测量的模型参数,造成实际工程应用困难。同时,在处理上述非线性扰动时,大多学者倾向于使用改进型 SMC 作为抗干扰算法^[10,12-14],但均需要较大的切换增益来保证系统的鲁棒性,容易造成抖振问题。为减弱抖振现象,陈辛波等^[15]提出一种自适应模糊 SMC 控制方法,利用模糊逻辑系统逼近开关函数,减弱控制律中的切换项信号。类似地,李红娟等^[16]设计一种基于自适应模糊逻辑的高阶滑模方法,采用高阶滑模特性和自适应增益削弱了 SMC 存在的抖振现象。然而,模糊规则设定和高阶参数整定涉及更多的计算量和更复杂的逻辑判断,对实时性有一定挑战。

值得注意的是,目前常见的 SBW 构型大多选用高性能永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)作为转向动力源。在 PMSM 高速运转过程中,电机励磁轴与转矩轴间电磁特性耦合问题突出,间接影响 SBW 系统动态响应性能。目前常应用于 PMSM 的电流解耦方法,包括电流反馈解耦控制(current feedback decoupling control, CFDC)^[17]、偏差解耦^[18]、内模解耦^[19]、复矢量解耦^[20]等。张志坚等^[21]在电流反馈解耦的基础上,通过引入超前相位角和预测控制技术,实现了对电流环转矩分量与磁链分量解耦控制。刘宇博等^[22]联合高阶滑模控制和 PI 理论设计了电流偏差解耦控制策略,帮助 PMSM 在不同转速范围内实现了良好的电流跟随效果。吴为等^[23]基于复矢量电流模型和传递函数矩阵对角化技术设计了电流解耦控制策略,有效提升了 PMSM 电流跟随响应性能。上述研究大多在控制器中引入与电感、电阻等电机参数强相关的解耦项,帮助 PMSM 克服电磁特性耦合问题。然而当这些参数随电机工作状态发生改变时,容易损害电机电流解耦效果,导致 PMSM 动态响应性能下滑。

针对上述问题,本文提出了一种考虑非线性干扰的 SBW 转角自适应抗扰控制策略。首先,分析 SBW 主动转向工作原理,并建立等效动力学模型。随后,设计包含位置环与电流环的转角控制策略:采用改进 SMC 和径向基函数(radial based function, RBF)神经网络设计 RBF-SMC 位置环控制器,一方面通过在滑模面中引入积分项以及使用饱和函数改进的指数趋近律可以消除稳态误差,有效避免采用过大开关增益导致抖振,另一方面 RBF 自适应控制参数整定简单,具有良好的泛化能力,可以自适应补偿 SBW 系统参数不确定性和轮胎回正力矩阻碍;应用线性自抗扰控制理论(linear active disturbance rejection control, LADRC)设计电流环控制器,实现励磁轴与转矩轴电流的完全解耦控制,提高转向执行电机动态响应性能。最后,搭建 SBW 仿真与硬件在环试验台,验证控制策略在多种工况下的性能表现。

1 线控转向系统动力学建模与分析

本文采用的 SBW 系统如图 1 所示,主要由转向执行电机 PMSM、减速机构、齿轮齿条转向器等组成。SBW 系统接收目标转角信号后,控制 PMSM 工

作,电机输出力矩经过减速机构帮助齿轮齿条转向器克服齿条阻力,推动转向拉杆控制转向轮实现主动转向功能。

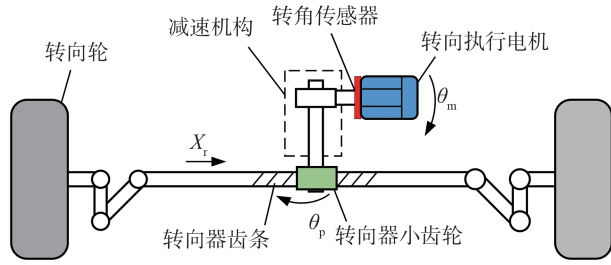


图1 SBW系统结构简图

假设PMSM是理想电机,不考虑其铁芯饱和、磁滞损耗等问题,在励磁轴(d 轴)和转矩轴(q 轴)同步旋转坐标系下建立PMSM电压方程:

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d}i_d + \frac{\omega_e}{L_d}L_q i_q + \frac{1}{L_d}u_d \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q}i_q - \frac{\omega_e}{L_q}(\psi_f + L_d i_d) + \frac{1}{L_q}u_q \quad (2)$$

本文采用表贴式PMSM,其电磁转矩为

$$T_e = \frac{3}{2}P_n i_q \psi_f \quad (3)$$

式中: u_d 和 u_q 分别为励磁轴电压和转矩轴电压; R_s 为定子电阻; i_d 和 i_q 分别为励磁轴电流和转矩轴电流; L_d 和 L_q 分别为励磁轴电感和转矩轴电感; P_n 为磁极对数; θ_e 和 θ_m 分别为电机电角和电机机械角,满足 $\theta_e = P_n \cdot \theta_m$; ω_e 为电机转速; ψ_f 为转子永磁体磁链。

在PMSM输出轴处建立动力学平衡方程:

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + T_p + T_{mf} = T_e \quad (4)$$

式中: J_m 和 B_m 分别为PMSM的转动惯量和阻尼系数; T_p 为齿轮齿条转向器作用到电机轴的力矩; T_{mf} 为PMSM的摩擦力矩。

PMSM电机输出力矩经过减速机构传递给齿轮齿条转向器,由转向执行电机与齿轮齿条转向器之间的机械连接关系可得:

$$\frac{\theta_m}{\theta_p} = \frac{\dot{\theta}_m}{\dot{\theta}_p} = \frac{\ddot{\theta}_m}{\ddot{\theta}_p} = \frac{T_s}{T_p} = k \quad (5)$$

式中: θ_p 为转向小齿轮转角; T_s 为PMSM等效到小齿轮上的转矩; k 为减速机构减速比。

齿轮齿条转向器在电机输出力矩作用下开始工作,同时受到转向前轮回正力矩阻碍 T_r 干扰,可以表示为

$$M_r \ddot{X}_r + B_r \dot{X}_r + F_{rf} + \frac{T_r}{r_p} = \frac{T_s}{r_p} \quad (6)$$

式中: M_r 为齿条的等效质量; B_r 为齿条与减速机构的等效阻尼系数; X_r 为齿条位移; r_p 为小齿轮半径,且 $\theta_p = X_r r_p$; F_{rf} 为齿条端的库仑摩擦力。

根据式(4)~式(6),可以得到SBW系统等效动力学方程:

$$J_{eq} \ddot{\theta}_p + B_{eq} \dot{\theta}_p + T_f + T_r = kT_e \quad (7a)$$

$$J_{eq} = M_r r_p^2 + k^2 J_m \quad (7b)$$

$$B_{eq} = B_r r_p^2 + k^2 B_m \quad (7c)$$

$$T_f = F_{rf} r_p + kT_{mf} = T_{eq} \text{sgn}(\dot{\theta}_p) \quad (7d)$$

式中: J_{eq} 和 B_{eq} 分别为等效转动惯量和阻尼系数; T_f 为等效摩擦力矩; T_{eq} 为等效摩擦因数^[11]。

此外,SBW系统转动惯量、阻尼系数、摩擦因数等系统参数会随着SBW工作状态变化存在一定不确定性特征。为此,本文将SBW面临的系统参数不确定性和难以精确建模的轮胎回正力矩阻碍分别记为 $\Delta f(\theta)$ 和 $d(\theta)$,令小齿轮转角 θ_p 和转速 $\dot{\theta}_p$ 为系统状态变量 $\theta = [\theta_p \ \dot{\theta}_p]$,目标电机转矩为系统控制输入 $u = T_e$,那么可以将SBW等效动力学方程更新为

$$\ddot{\theta}_p = gu + f(\theta) + \Delta f(\theta) + d(\theta) \quad (8a)$$

$$f(\theta) = -\frac{[B_{eq} \dot{\theta}_p + T_{eq} \text{sgn}(\dot{\theta}_p)]}{J_{eq}} \quad (8b)$$

$$\Delta f(\theta) = -\frac{[\Delta J_{eq} \ddot{\theta}_p + \Delta B_{eq} \dot{\theta}_p + \Delta T_{eq} \text{sgn}(\dot{\theta}_p)]}{J_{eq}} \quad (8c)$$

$$d(\theta) = -\frac{T_r}{J_{eq}} \quad (8d)$$

式中: ΔJ_{eq} 、 ΔB_{eq} 、 ΔT_{eq} 分别为转动惯量、阻尼系数、摩擦因数的不确定项; $g = k/J_{eq}$ 。

2 转角控制策略设计

SBW系统自适应抗扰转角控制策略如图2所示。具体说明如下:(1)在位置环控制器中,自适应RBF神经网络根据目标小齿轮转角 θ_p^* 和实际小齿轮转角 θ_p 动态估计系统参数不确定项 $\Delta \hat{f}(\theta)$ 和轮胎回正力矩阻碍扰动项 $\hat{d}(\theta)$,帮助滑模变结构控制输出目标转矩轴电流 i_q^* ;(2)在电流环控制器中,ESO根据目标励磁轴电流 $i_d^* = 0$ 、目标转矩轴电流 i_q^* 、实际励磁轴电流 i_d 和实际转矩轴电流 i_q ,观测包含PMSM励磁轴-转矩轴耦合的励磁轴总干扰 f_d 和转矩轴总干扰 f_q ,用于帮助线性自抗扰控制得到期望励磁轴电压 u_d 和期望转矩轴电压 u_q ;(3) u_d 和 u_q 经过数学变化和空间矢量脉宽调制输出6路脉宽调制(pulse width modulation, PWM)信号^[24],控制驱动器

带动齿轮齿条转向器工作,实现转角跟踪控制。

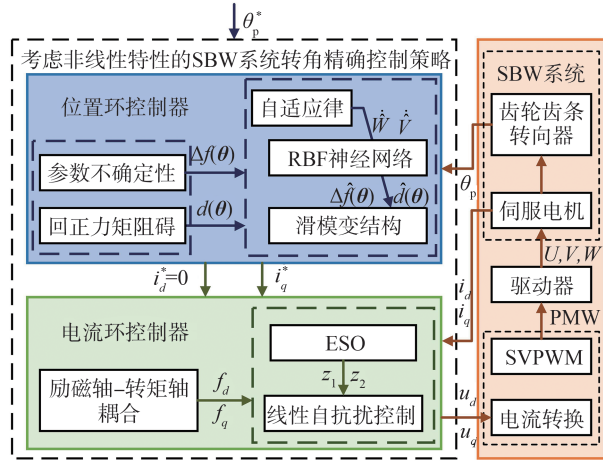


图2 转角控制策略架构

2.1 位置环控制器设计

采用SMC设计位置环控制器。首先定义位置环转角误差为 $e_1 = \theta_p^* - \theta_p$ 。为消除稳态误差,设计带有积分项的滑模面为

$$s = c_1 e_1 + \dot{e}_1 + c_2 \int e_1 dt \quad (9)$$

式中 c_1, c_2 分别为滑模面控制参数,且 $c_1 > 0, c_2 > 0$ 。

对应的,求解位置环控制器滑模面微分:

$$\dot{s} = c_1 \dot{e}_1 + \ddot{e}_1 + c_2 e_1 = c_1 \dot{e}_1 + \ddot{\theta}_p^* - f(\theta) - \Delta f(\theta) - gu - d(\theta) + c_2 e_1 \quad (10)$$

为快速而平滑地趋近滑动面,设计饱和函数改进的指数趋近律为

$$\dot{s} = -m \cdot s - \eta \cdot \text{sat}(s) \quad (11)$$

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1, & s > \Delta \\ s/\Delta, & |s| \leq \Delta \\ -1, & s < -\Delta \end{cases} \quad (12)$$

式中 m, η 为趋近律控制参数, $m > 0, \eta > 0$; Δ 为动态“边界层”。

进一步可得位置环控制器的控制律为

$$u = \frac{1}{g} \left[\ddot{\theta}_p^* - f(\theta) - \Delta f(\theta) + c_1 \dot{e}_1 + c_2 e_1 - d(\theta) + ms + \eta \text{sat}(s) \right] \quad (13)$$

考虑到系统参数不确定项 $\Delta f(\theta)$ 和轮胎回正力矩阻碍扰动 $d(\theta)$ 难以精确获得,本文选用结构简单、泛化能力强的RBF神经网络自适应地逼近 $\Delta f(\theta)$ 和 $d(\theta)$ 。RBF网络的算法为

$$h_j(\mathbf{x}) = \exp \left(- \frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_j\|^2}{2b_j^2} \right) \quad (14)$$

$$\begin{cases} \Delta f(\mathbf{x}) = \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}_{\Delta f}(\mathbf{x}) + \varepsilon_{\Delta f} \\ d(\mathbf{x}) = \mathbf{V}^{*T} \mathbf{h}_d(\mathbf{x}) + \varepsilon_d \end{cases} \quad (15)$$

式中 \mathbf{x} 为网络输入; j 表示网络隐含层第 j 个网络输入; \mathbf{c}_j 为网络隐含层第 j 个神经元高斯函数中心点的坐标; b_j 为网络隐含层第 j 个神经元高斯函数中心点的坐标; $\mathbf{h} = [h_j]^T$ 为高斯基函数的输出; $\mathbf{W}^{*T}, \mathbf{V}^{*T}$ 分别为逼近 $\Delta f(\mathbf{x}), d(\mathbf{x})$ 的理想网络权值; $\varepsilon_{\Delta f}, \varepsilon_d$ 为网络逼近误差, $|\varepsilon_{\Delta f}| \leq \varepsilon_{M_f}, |\varepsilon_d| \leq \varepsilon_{M_d}$, ε_{M_f} 和 ε_{M_d} 均为有界的正值。

RBF网络为2-5-2的结构。取小齿轮转角 θ_p 和转速 $\dot{\theta}_p$ 作为RBF网络输入,即 $\mathbf{x} = [\theta_p, \dot{\theta}_p]^T$; RBF网络输出为 $\Delta f(\theta), d(\theta)$ 的逼近值 $\hat{\Delta f}(\theta)$ 和 $\hat{d}(\theta)$:

$$\begin{cases} \hat{\Delta f}(\theta) = \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}_{\Delta f}(\theta) \\ \hat{d}(\theta) = \hat{\mathbf{V}}^T \mathbf{h}_d(\theta) \end{cases} \quad (16)$$

式中 $\hat{\mathbf{W}}, \hat{\mathbf{V}}$ 分别为RBF网络的估计权值。

把逼近值 $\hat{\Delta f}(\theta)$ 和 $\hat{d}(\theta)$ 代入式(13),可得到新的位置环控制律为

$$u_p = \frac{1}{g} \left[\ddot{\theta}_p^* - f(\theta) - \hat{\Delta f}(\theta) + c_1 \dot{e}_1 + c_2 e_1 - \hat{d}(\theta) + ms + \eta \text{sat}(s) \right] \quad (17)$$

把新的位置环控制律式(17)代入滑模面微分式(10)化简得

$$\dot{s} = \tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}_{\Delta f}(\theta) - \varepsilon_{\Delta f} + \tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{h}_d(\theta) - \varepsilon_d - ms - \eta \text{sat}(s) \quad (18)$$

式中 $\tilde{\mathbf{W}}$ 和 $\tilde{\mathbf{V}}$ 表示RBF网络的理想权重和估计权重的差值,即 $\tilde{\mathbf{W}} = \mathbf{W}^* - \hat{\mathbf{W}}, \tilde{\mathbf{V}} = \mathbf{V}^* - \hat{\mathbf{V}}$ 。

定义李雅普诺夫函数 $L = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{W}} + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{\mathbf{V}}^T \tilde{\mathbf{V}}$, γ_1, γ_2 为自适应律参数,且 $\gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0$, 结合式(18),可得李雅普诺夫函数微分为

$$\begin{aligned} \dot{L} = & s\dot{s} + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\mathbf{W}}^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}} + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\mathbf{V}}^T \dot{\tilde{\mathbf{V}}} = \\ & \tilde{\mathbf{W}}^T \left[s \mathbf{h}_{\Delta f}(\theta) + \frac{1}{\gamma_1} \dot{\tilde{\mathbf{W}}} \right] + \tilde{\mathbf{V}}^T \left[s \mathbf{h}_d(\theta) + \frac{1}{\gamma_2} \dot{\tilde{\mathbf{V}}} \right] + \\ & s \left[-\varepsilon_{\Delta f} - \varepsilon_d - ms - \eta \text{sat}(s) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

设计 \mathbf{W}, \mathbf{V} 的自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{W}}} = -\gamma_1 s \mathbf{h}_{\Delta f}(\theta) \\ \dot{\tilde{\mathbf{V}}} = -\gamma_2 s \mathbf{h}_d(\theta) \end{cases} \quad (20)$$

并代入李雅普诺夫函数微分式(19),可通过化简得到:

$$\dot{L} = -ms^2 + s \left[(-\varepsilon_{\Delta f} - \varepsilon_d) - \eta \text{sat}(s) \right] \quad (21)$$

由于 ε_{M_f} 和 ε_{M_d} 都是非常小的正数, $|\varepsilon_{\Delta f}| \leq \varepsilon_{M_f}$, $|\varepsilon_d| \leq \varepsilon_{M_d}$, 只要通过参数的选取保证 $|\eta \text{sat}(s)| \geq |\varepsilon_{M_f} + \varepsilon_{M_d}|$, 则 $\dot{L} \leq 0$, 从而使系统渐进稳定。

最终, 根据永磁同步电机的电磁转矩式(3), 可得电机的目标转矩电流为

$$i_q^* = \frac{2}{3} \frac{u_p^*}{P_n \psi_f} \quad (22)$$

2.2 电流环控制器设计

本文采用 $i_d^* = 0$ 的 PMSM 电流控制。由励磁轴电压方程式(1)和转矩轴电压方程式(2)可知, 励磁轴电压受转矩轴的电流扰动项 $L_q i_q$ 影响, 转矩轴电压受励磁轴的电流扰动项 $L_d i_d$ 影响, 且随着电机转速 ω_e 增加不断加剧。为解决电磁耦合并提高电机动态响应, 引入 LADRC 设计电流环控制器。以转矩轴电流为例介绍电流环控制方法, 其控制原理如图 3 所示。

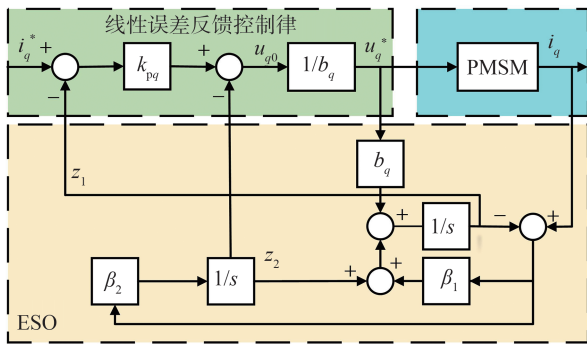


图3 基于线性自抗扰的电流环控制器

首先将励磁轴电流耦合项 $L_d i_d$ 视为为转矩轴的非理想、不可测的外部扰动, 在此基础上进一步将随 PMSM 工作状态改变的电感和电阻等参数考虑在内, 建立转矩轴总干扰 f_q 为

$$f_q = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{\omega_e}{L_q} (\psi_f + L_d i_d) \quad (23)$$

令转矩轴电流环控制输入为其电压 u_q , 那么

$$\frac{di_q}{dt} = b_q u_q^* + f_q \quad (24)$$

式中 $b_q = \frac{1}{L_q}$ 。

为降低励磁轴-转矩轴耦合等对电机性能的影响, 设计扩张状态观测器(extended state observer, ESO)估计转矩轴总干扰 f_q :

$$\begin{cases} \dot{z}_{1q} = -\beta_1(z_{1q} - i_q) + b_q u + z_{2q} \\ \dot{z}_{2q} = -\beta_2(z_{1q} - i_q) \end{cases} \quad (25)$$

式中: z_{1q}, z_{2q} 分别为对输出 i_q 的估计值和对转矩轴总干扰 f_q 的估计值; β_1, β_2 分别为状态观测器增益系数。采用带宽的概念, 选择合适的 ESO 参数。电流环带宽取为 ω_0 且 $\omega_0 > 0$ 。电流环 ESO 的特征多项式为 $s^2 + \beta_1 s + \beta_2$, 为较好地估计控制器状态和干扰, 令 ESO 取理想的特征方程形式 $(s + \omega_0)^2$, 则状态观测器增益系数 $\beta_1 = 2\omega_0, \beta_2 = \omega_0^2$ 。

随后, 采用线性误差反馈对估计得到的干扰进行补偿, 得到转矩轴电流控制律为

$$\begin{cases} u_q = \frac{u_{q0} - z_{2q}}{b_q} \\ u_{q0} = k_{pq}(i_q^* - z_{1q}) \end{cases} \quad (26)$$

式中 k_{pq} 为转矩轴的电流控制增益。

同理, 也可以设计得到电流环关于励磁轴电流控制律为

$$\begin{cases} u_d = \frac{u_{d0} - z_{2d}}{b_d} \\ u_{d0} = k_{pd}(i_d^* - z_{1d}) \end{cases} \quad (27)$$

式中 k_{pd} 为励磁轴的电流控制增益。

3 仿真与硬件在环试验验证

3.1 仿真试验验证

3.1.1 仿真参数设置

基于 MATLAB/Simulink 和车辆动力学仿真软件 CarSim 搭建联合仿真平台, 相关模型参数如表 1 所示。

表1 相关模型主要参数

参数	含义	数值
R_s	电机定子电阻	$9.0 \times 10^{-3} \Omega$
L_d	电机励磁轴电感	$7.2 \times 10^{-5} \text{H}$
L_q	电机转矩轴电感	$7.2 \times 10^{-5} \text{H}$
ψ_f	电机永磁体磁链	$1.03 \times 10^{-2} \text{Wb}$
P_n	电机磁极对数	4.0
J_m	转向执行电机转动惯量	$1.46 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
B_m	转向执行电机阻尼系数	$9.9 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
J_{eq}	等效系统的转动惯量	$2.05 \times 10^{-2} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
B_{eq}	等效系统的阻尼系数	$0.52 \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
T_{eq}	等效系统的摩擦因数	0.2

为了证明基于RBF-SMC(位置环)和LADRC(电流环)的SBW转角自适应抗扰控制效果,引用如表2所示的3种控制器展开对比试验。其中,控制器1由SMC(位置环)和LADRC(电流环)组成,论证RBF在处理系统参数不确定性和轮胎回正力矩阻碍扰动的性能表现;控制器2由RBF-SMC(位置环)和PI(电流环)组成,控制器3由RBF-SMC(位置环)和CFDC(电流环)组成,由论证LADRC在解决PMSM电磁特性耦合问题的优势;控制器4由PI(位置环)、PI(转速环)和PI(电流环)组成,进行转角控制性能比对。本文所使用的控制策略参数如表3所示。

表2 对比控制策略

缩写	具体控制策略
本文	位置环(RBF-SMC)+电流环(LADRC)
控制器1	位置环(SMC ^[13])+电流环(LADRC)
控制器2	位置环(RBF-SMC)+电流环(PI)
控制器3	位置环(RBF-SMC)+电流环(CFDC ^[21])
控制器4	位置环(PI)+转速环(PI)+电流环(PI)

表3 相关控制策略主要参数

参数	含义	数值
c_1, c_2	本文滑模面控制参数	6, 10
m, η	本文滑模趋近律参数	10, 300
e_j	本文RBF函数中心点	-1; -0.5; 0; 0.5; 1
b_j	本文RBF函数宽度	0.5
$\varepsilon_f, \varepsilon_d$	本文RBF逼近误差	0.001, 0.01
γ_1, γ_2	本文RBF自适应律	100, 80
k_{pq}, ω_{q0}	本文电流环转矩轴参数	30, 150
k_{pd}, ω_{d0}	本文电流环励磁轴参数	30, 150
c_3, c_4	控制器1滑模面控制参数	10, 20
m_1, η_1	控制器1滑模趋近律参数	50, 300
k_{pd2}, k_{id2}	控制器2励磁轴PI参数	0.2, 2
k_{pq2}, k_{iq2}	控制器2转矩轴PI参数	4, 0.5
k_p, k_i	控制器3电流环调节系数	100, 10 000
k_{p1}, k_{i1}	控制器4位置环PI参数	10, 5
k_{p2}, k_{i2}	控制器4转速环PI参数	25, 20
k_{pd1}, k_{id1}	控制器4励磁轴PI参数	5, 1
k_{pq1}, k_{iq1}	控制器4转矩轴PI参数	2, 10

3.1.2 仿真验证与结果分析

(1)连续正弦转角仿真工况

选择控制器1、控制器2、控制器4进行频率为0.2 Hz、幅值为100°的连续正弦转角输入工况仿真对比验证,记录获得如图4所示的试验曲线。

从转角及其误差变化曲线可以看出,SBW在各类控制器作用下均能够稳定地跟踪目标转角。在0 s启动阶段和1.3、3.7、6.3、8.7、11.3、13.7 s左右换

向阶段时,对比控制器作用下的SBW转角跟踪平均滞后时间均大于30 ms,且转角跟踪误差较大,特别是控制器4的转角跟踪误差峰值接近5°。与之相比,在本文的转角控制器作用下,SBW启动阶段的转角跟踪误差明显降低,且在换向阶段仍能保持良好的跟踪效果,跟踪误差峰值仅为1°左右,整个转向跟踪阶段的平均滞后时间小于10 ms。此外,从励磁轴电流和转矩轴电流变化曲线可以清晰地看出,控制器2与控制器4电流环因为没有考虑PMSM励磁轴与转矩轴之间的耦合关系,导致励磁轴电流没有较好地控制在目标值附近,对应的转矩轴电流跟随效果较差,电流跟踪误差明显高于使用LADRC算法的控制器1和本文控制器。尤其是控制器2励磁轴电流在6 s左右出现突变时,其转矩轴电流因为存在耦合也发生较大突变。本文控制器的电流跟随效果保有较高的精度,励磁轴电流几乎为0,转矩轴电流始终平稳地跟随目标值,充分证明了本文LADRC电流控制策略的有效性。

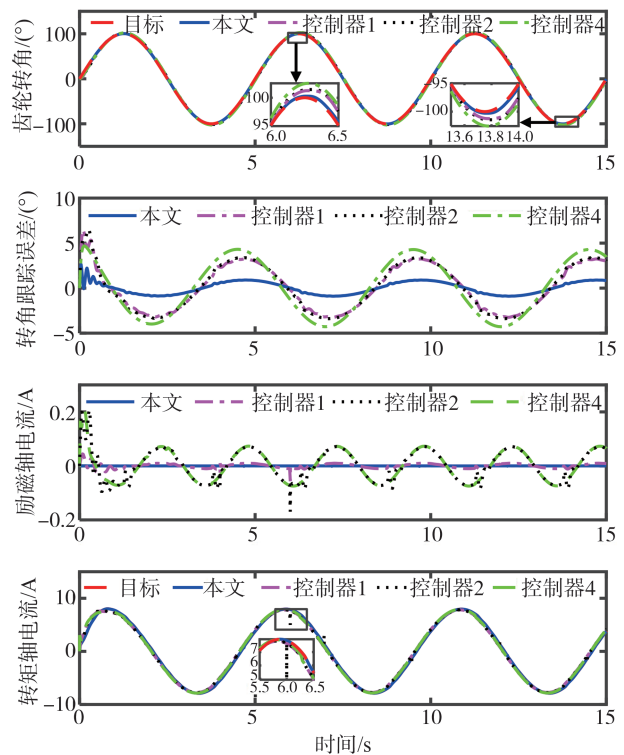


图4 不同控制策略的正弦转角跟踪效果曲线

(2)电机参数突变下的变斜坡仿真工况

为证明电流环自抗扰控制在电机参数突变时仍然有良好的解耦控制效果,选择控制器1、控制器2和控制器3参与电机电感 L_q 突变的变斜坡工况进行仿真对比验证。试验工况具体说明如表4所示,并

获得如图5所示的仿真试验曲线。

表4 电机电感突变仿真试验工况

工况	具体说明	
变斜坡	时间	0 → 1 s → 5 s → 8 s → 10 s → 12 s → 15 s
	目标转角	0° → 0° → 60° → 60° → 30° → 30° → 0°
	电机电感	L_q 在第8 s突变为理想值的200%

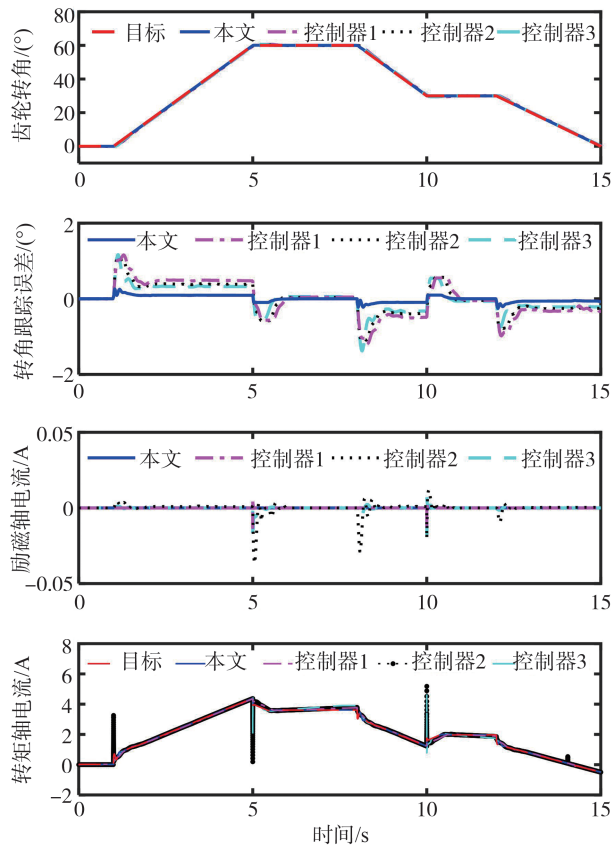


图5 电机电感突变仿真试验效果曲线

从图5中转角及其误差变化曲线可以观察到, SBW系统在整个变斜坡工况下均能稳定地跟踪目标转角,但在1、5、8、10、12 s换向时,控制器1和控制器2均出现较大误差,同时在1~5 s转角上升和8~10、12~15 s转角下降阶段,在本文控制策略下的转角误差也明显小于其他对比控制器,转角平均滞后时间小于10 ms。此外从励磁轴和转矩轴电流变化曲线可以观察到,控制器2电流环没有考虑解耦控制算法,整个过程中控制效果较差。而控制器3在仿真工况第8 s设置电机转矩轴电感参数值变为理想值的200%后,由于CFDC算法受电机参数突变影响,电流解耦效果明显变差。但在本文LADRC算法下的励磁轴电流和转矩轴电流在电机参数突变后仍然保持了良好的电流跟踪效果,进一步证明了算法的有效性。

3.2 硬件在环试验验证

3.2.1 硬件在环试验台架搭建

为进一步验证本文自适应抗扰转角控制策略的有效性,使用转向阻力主动加载装置、转向执行总成、实时仿真器NI-PXI和快速原型控制器MicroAutoBox等硬件产品搭建了转向系统硬件在环试验台架,其结构简图和实物图如图6和图7所示。

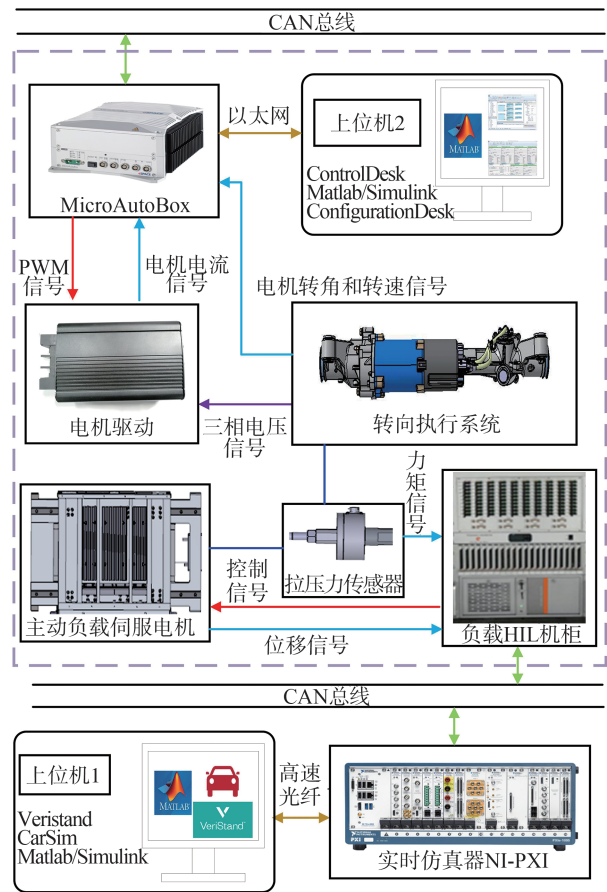


图6 硬件在环试验台结构简图

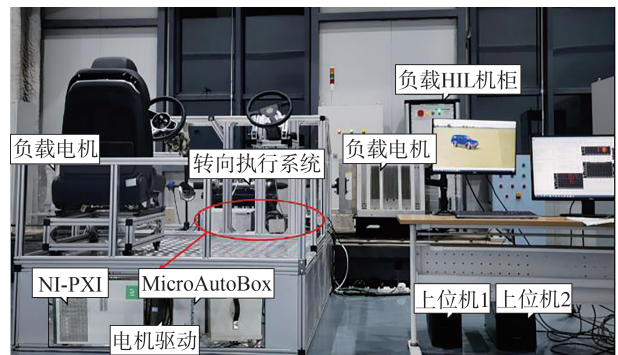


图7 硬件在环试验台实物图

试验台工作原理如下:(1)在上位机1中,首先使用 MATLAB/Simulink 与 CarSim 构建驾驶测试场

景,然后在 VeriStand 中配置与 NI-PXI 实时仿真器的连接,编译模型并经高速光纤将其加载至 NI-PXI 运行;(2)主动负载 HIL 机柜通过采集板卡和内置实时机进行通信,NI-PXI 经 CAN 总线向 HIL 机柜发送目标转矩、位移,机柜内电机驱动器据此控制负载力,同时 HIL 机柜发送采集到的拉压力传感器的力矩信号和电机位移信号通过 CAN 总线传递给 NI-PXI;(3)上位机 2 通过以太网与控制器 MicroAutoBox 相连,利用 Simulink 软件编写控制模型,并通过 ConfigurationDesk 软件配置模型接口,将设计的控制策略编译后加载至 MicroAutoBox 中运行,并通过 ControlDesk 软件在线监测对应控制策略的性能和整定相关参数;(4)MicroAutoBox 采集电机位置传感器和电机电流传感器反馈的信号,根据算法运行结果向驱动器发送 PWM 信号;(5)驱动器根据 PWM 信号调整输出的三相电压大小,控制转向执行电机工作,完成转角跟踪控制。

3.2.2 硬件在环验证与结果分析

为检验 SBW 对于周期性转角输入的响应特性以及在短时间内对角度转向指令的动态响应速度和稳定性,分别选取连续正弦工况和双移线工况进行转角控制策略硬件在环测试验证,并得到如图 8 和图 9 所示的试验曲线。

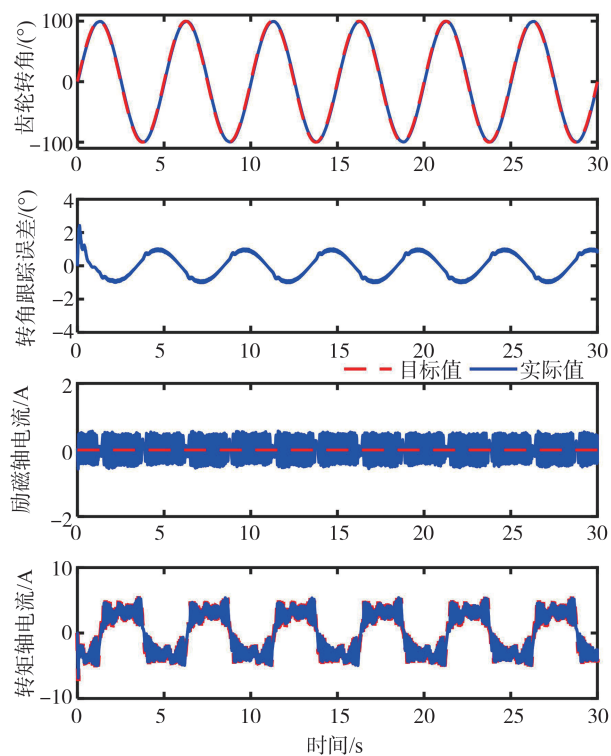


图 8 连续正弦工况转角跟踪控制性能曲线

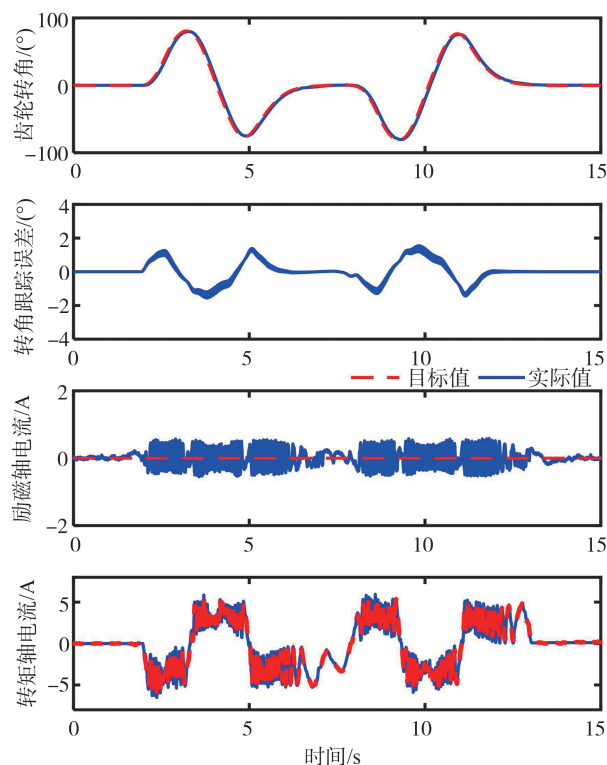


图 9 双移线工况转角跟踪控制性能曲线

图 8 所示为 SBW 连续正弦工况转角跟踪控制性能曲线。可以看出在整个工作过程中,SBW 的电机励磁轴和转矩轴电流平稳变化,实际转角与目标正弦转角跟踪控制的平均滞后时间在 20 ms 左右。除去启动阶段,SBW 的转角跟踪稳态误差较小,始终保持在 1.5° 之内,证明了设计的自适应抗扰转角控制策略能够帮助 SBW 周期性转角输入下获得良好的转角控制精度及响应性能。

从图 9 可以看出,双移线工况的实际转角曲线与目标转角曲线基本吻合,本文控制器能够有效调节 SBW 系统在非光滑参考命令下良好地跟随目标转角。在 SBW 整个工作过程中,励磁轴电流和转矩轴电流控制效果表现良好,为 SBW 转角跟踪控制提供了良好的工作基础。当 SBW 处于 2 s 开始换向到 13 s 左右转向盘回正时,转角跟踪未出现明显的超调或迟滞问题,转角跟踪误差峰值小于 2° ,满足实际使用要求。在 0~2 和 13~15 s 转角保持阶段,SBW 的转角稳态跟踪误差几乎为 0。

4 结论

(1) 本文以 SBW 系统为研究对象,对其主动转向转角控制展开研究,综合分析了面临的轮胎回正

力矩阻碍、系统参数不确定性以及转向电机电磁特性耦合等非线性干扰问题,并建立了SBW系统等效力学模型。

(2) 根据RBF神经网络、鲁棒滑模控制、线性自抗扰理论等设计了一种由位置环和电流环组成的自适应抗扰转角控制策略。

(3) 通过仿真和硬件在环试验,论证了本文设计的策略能够帮助SBW系统实现高精度、快响应的转角控制效果。研究成果为与SBW类似的机电系统应对非线性干扰问题提供了一种解决方案。

参 考 文 献

- [1] 卢少波,谢菲菲,张博涵,等.基于非对称势场的人车协同博弈避撞[J].汽车工程,2022,44(10):1484-1493.
LU S B, XIE F F, ZHANG B H, et al. Human-vehicle cooperative game collision avoidance based on asymmetric potential fields [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(10): 1484-1493.
- [2] 李子先,潘世举,徐友春.8轮分布式电驱动车辆AFS和DYC协同控制[J].汽车工程,2023,45(3):409-420.
LI Z X, PAN S J, XU Y C. Coordinated control of AFS and DYC for 8-wheel distributed electric drive vehicle [J]. Automotive Engineering, 2023, 45(3): 409-420.
- [3] 赵万忠,张寒,邹松春,等.线控转向系统控制技术综述[J].汽车安全与节能学报,2021,12(1):18-34.
ZHAO W Z, ZHANG H, ZOU S C, et al. Overview of vehicle steer-by-wire system control technologies [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(1): 18-34.
- [4] LI C M, ZHAO H, ZHEN S C, et al. Control design with optimization for fuzzy steering-by-wire system based on nash game theory [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(8): 7694-7703.
- [5] IRMER M, DEGEN R, NUBGEN A, et al. Development and analysis of a detail model for steer-by-wire systems [J]. IEEE Access, 2023, 11(11): 7229-7236.
- [6] CETIN A E, ADLI M A, BARKANA D E, et al. Implementation and development of an adaptive steering-control system [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(1): 75-83.
- [7] 张博,张建伟,郭孔辉,等.基于电动助力转向系统的转向盘转角跟随算法[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(2):336-344.
ZHANG B, ZHANG J W, GUO K H, et al. Steering wheel corner following algorithm based on electric power steering system [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(2): 336-344.
- [8] 罗建南,朱光钰,杨浩瀚,等.线控转向系统的前轮转角跟踪策略研究[J].机械工程学报,2019,55(22):165-173.
LUO J N, ZHU G Y, YANG H H, et al. Study on front wheel angle tracking strategy of steering-by-wire system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(22): 165-173.
- [9] 余卓平,章仁燮,熊璐,等.考虑线控转向非线性及不确定性的转向角控制[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(1):79-86.
YU Z P, ZHANG R X, XIONG L, et al. Steer-by-wire systems considering nonlinear characteristic and uncertainty parameters [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(1): 79-86.
- [10] ZHANG J, WANG H, MA M Y, et al. Active front steering-based electronic stability control for steer-by-wire vehicles via terminal sliding mode and extreme learning machine [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14713-14726.
- [11] HE L, GUO C L, XU Z, et al. Particle-swarm backstepping control for angle tracking of electric motor steer-by-wire system [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2038-2047.
- [12] WANG H, MAN Z H, SHEN W X, et al. Robust control for steer-by-wire systems with partially known dynamics [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2003-2015.
- [13] SUN Z, ZHENG J C, ZHI H M, et al. Robust control of a vehicle steer-by-wire system using adaptive sliding mode [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2251-2262.
- [14] ZHAO J, YANG K H, CAO Y C, et al. Observer-based discrete-time cascaded control for lateral stabilization of steer-by-wire vehicles with uncertainties and disturbances [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2023, 70(8): 3347-3358.
- [15] 陈辛波,罗杰,杭鹏,等.某新型线控转向系统的自适应模糊滑模控制[J].汽车工程,2018,40(5):568-574.
CHEN X B, LUO J, HANG P, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control for a novel steering-by-wire system [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(5): 568-574.
- [16] 李红娟,王泽政,王永富.线控转向系统的自适应高阶滑模控制[J].控制与决策,2021,36(6):1529-1536.
LI H J, WANG Z Z, WANG Y F. Adaptive higher-order sliding mode control for SBW system [J]. Control and Decision, 2021, 36(6): 1529-1536.
- [17] CHANG K T, LOW T S, LEE T H. An optimal speed controller for permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1994, 41(5): 503-510.
- [18] ZHU H, XIAO X, LI Y D. PI type dynamic decoupling control scheme for PMSM high speed operation [C]. 2010 25th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Palm Springs, USA: IEEE, 2010: 1736-1739.
- [19] XIA C L, YAN Y, SONG P, et al. Voltage disturbance rejection for matrix converter-based PMSM drive system using internal model control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 361-372.

(下转第919页)

- 与气动阻力的影响[J].实验流体力学, 2014, 28(1): 31-37.
- WANG H F, ZHANG Y P, ZOU C. Effects of deflectors on the wake and aerodynamic drag of a 25° slant angle Ahmed model[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(1): 31-37.
- [10] 汪怡平, 郭承奇, 王涛, 等. 基于自由变形技术的 Ahmed 模型气动减阻优化[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(3): 221-228.
- WANG Y P, GUO C Q, WANG T, et al. Aerodynamic drag reduction of Ahmed model based on free form deformation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(3): 221-228.
- [11] 庄礼贤, 尹协远, 马晖扬. 流体力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 328-329.
- ZHUANG L X, YIN X Y, MA H Y. Fluid mechanics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 328-329.
- [12] ZHANG B F, ZHOU Y, TO S. Unsteady flow structures around a high-drag Ahmed body [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 777: 291-326.
- [13] HE K, MINELLI G, WANG J, et al. Numerical investigation of the wake bi-stability behind a notchback Ahmed body [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2021, 926: A36.
- [14] LIU J S, ZHANG Z H, WANG Y M, et al. Experimental study on the three-dimensional wake structure of the DrivAer standard model[J]. Journal of Visualization, 2021, 24: 443-460.
- [15] LIU X, FU Q X, XU S J. Experimental study of underbody flow of electric vehicle[C]. The 1st International Conference on Intelligent Optimization of Aerodynamics and Heat Flow Control, June 14-16, 2023.
- [16] 中国汽车工程学会汽车空气动力学分会. 乘用车空气动力学仿真技术规范: T/CSAE 112-2019[S]. [2019-07-10]. China-SAE Automotive Aerodynamics Committee. Technical specification of passenger car aerodynamic numerical simulation: T/CSAE 112-2019[S]. [2019-07-10].
- [17] ASHTON N, REVELL A. Key factors in the use of DDES for the flow around a simplified car [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2015, 54(43): 236-249.

(上接第 896 页)

- [20] HUSSAIN A H. Tuning and performance evaluation of 2DOF PI current controllers for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1401-1414.
- [21] 张志坚, 荆龙, 赵宇明, 等. 高速低开关频率下永磁同步电机的解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6345-6353.
- ZHANG Z J, JING L, ZHAO Y M, et al. Decoupling control of permanent magnet synchronous motor at high speed and low switching frequency [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6345-6353.
- [22] 刘宇博, 王旭东, 周凯. 基于滑模观测器的永磁同步电机电流偏差解耦控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1642-1652.
- LIU Y B, WANG X D, ZHOU K. Decoupling control of current deviation of permanent magnet synchronous motor based on sliding mode observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1642-1652.
- [23] 吴为, 丁信忠, 严彩忠. 基于复矢量的电流环解耦控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4184-4191.
- WU W, DING X Z, YAN C Z. Research on control method of current loop decoupling based on complex vector [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4184-4191.
- [24] 陈志成, 朱冰, 赵健, 等. 考虑非线性特性的电控助力制动系统多闭环压力控制策略[J]. 机械工程学报, 2023, 59(4): 190-198.
- CHEN Z C, ZHU B, ZHAO J, et al. Multi-closed-loop pressure control strategy considering nonlinear characteristics of electro-booster brake system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(4): 190-198.