

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007110

一种基于自抗扰控制的电子差速控制策略研究*

姚芳^{1,2}, 赵晓鹏^{1,2}, 吴正斌^{3,4}, 林祥辉^{1,4}, 郑帅^{1,2}

(1. 河北工业大学电气工程学院 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300132; 2. 河北工业大学 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室 天津 300132; 3. 中国科学院大学深圳先进技术研究院 深圳 518055; 4. 天津中科先进技术研究院有限公司 天津 300392)

摘要: 电动车辆转向时,复杂路况及车况综合作用下,驱动轮承载更强扰动的负荷,驱动轮滑移运动所占比重不确定性增大,影响行车稳定与安全。为此,设计基于自抗扰控制(ADRC)的电子差速控制(EDC)策略,并利用混沌粒子群优化算法(CPSO)设计控制器参数。构建7自由度整车模型,以滑移率为控制量、驱动轮电机转矩为输出,设计基于CPSO-ADRC的电子差速控制器,使转向过程中滑移率始终保持在目标值上;提出的EDC系统与配置有模糊PID控制器和滑模控制器(SMC)的EDC系统进行了对比分析,在Simulink/Carsim平台和实车上进行不同路况的EDC实验。结果表明,基于CPSO-ADRC的EDC策略具有强抗干扰能力,其快速性相较其他两种策略提高了20%和14.4%,横摆角速度的波幅均降低了约50%,增强了EDC的快速性和鲁棒性,更有效保证电动车辆转向过程的行驶安全。

关键词: 滑移率;自抗扰控制;电子差速控制;混沌粒子群优化算法;Simulink/Carsim

中图分类号: U469.72 TH113.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Research on an electronic differential control strategy based on active disturbance rejection control

Yao Fang^{1,2}, Zhao Xiaopeng^{1,2}, Wu Zhengbin^{3,4}, Lin Xianghui^{1,4}, Zheng Shuai^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China; 3. Shenzhen Advanced Technology Research Institute, University of Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China; 4. Tianjin Zhongke Advanced Technology Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300392, China)

Abstract: When the electric vehicle is steering, the driving wheel will bear more disturbing load under the combined actions of complex road conditions and vehicle conditions, and the proportion uncertainty of the sliding motion of the driving wheel increases, which will affect the driving stability and safety. Therefore, the active disturbance rejection control (ADRC) based electronic differential control (EDC) strategy is designed, and the Chaos Particle Swarm Optimization (CPSO) algorithm is used to design the controller parameters. A seven degree of freedom complete automobile model is constructed, and the electronic differential controller based on CPSO-ADRC is designed taking slip rate as the control quantity and driving wheel motor torque as the output, so that the slip rate is always kept at the target value in the steering process. The proposed EDC system is compared with the EDC systems equipped with fuzzy PID controller and sliding mode controller and analyzed, and the EDC experiments under different road conditions were carried out on Simulink/CarSim platform and real vehicles. The results show that the electronic differential control strategy based on CPSO-ADRC has strong anti-interference ability, its speediness is increased by 20% and 14.4%, respectively compared with the other two strategies, the amplitude of yaw rate is reduced by about 50%, the speediness and robustness of EDC are enhanced, and the driving safety in electric vehicle steering process is more effectively guaranteed.

Keywords: slip rate; active disturbance rejection control; electronic differential control; chaos particle swarm optimization algorithm; Simulink/Carsim

收稿日期:2020-11-16 Received Date: 2020-11-16

* 基金项目:河北省自然科学基金(E2019202481)、天津市科委(18YFZBFX00030)项目资助

0 引言

新能源汽车取代燃油车已为大势所趋,提高其行驶过程的稳定性和安全性是整车可靠性研究的重要内容之一^[1]。独立驱动的电动汽车采用电子差速器代替传统的机械差速器,即根据汽车转向及动力模型,考虑到车辆动力、经济、操控稳定、平顺以及通过等性能,计算各轮毂电机转速、转矩的转弯目标值,实现精确的多轮线性控制,具有实际研究价值^[2-3]。电子差速控制 (electronic differential control, EDC) 按控制变量分为转速控制和转矩控制,其中,汽车防抱死制动、驱动防滑以及横摆力矩控制系统都是电动汽车电子差速控制的主要辅助研究方向^[4]。文献[5]对两驱电动汽车转速进行 PID 抗扰协调控制,内外轮分别施加 5 N·m 和 3 N·m 的负载扰动,仿真结果表明两机转速极不稳定、车轮易打滑。文献[6]以横摆角速度的偏差及偏差率作为输入,横摆力矩 ΔM 作为输出进行设计模糊抗扰的电子差速控制,虽提高系统鲁棒性,但依旧存在无法消除静差的问题。文献[7]设计了线性二次型最优滑模控制器 (sliding mode control, SMC) 用于电子差速控制中的相对滑移率控制,使得驱动轮的相对滑移率稳定时间缩短到了 0.5 s。

电动汽车在转弯时内外驱动轮的转矩不协调容易出现轮胎打滑的现象,因此通过控制不同车轮的滑移率在最佳值来协调车轮的转矩,增强汽车转弯的稳定性。所设计的电子差速控制策略在分析目标滑移率的基础上,采用自抗扰控制 (active disturbance rejection control, ADRC) 并结合混沌理论改进的粒子群算法 (chaos particle swarm optimization, CPSO) 优化其参数,设计了 CPSO-ADRC 电子差速控制策略。CPSO 是鸟群模拟人类的最佳决策过程,鸟群成员通过学习、共享来获得最大的食物获取概率,结合混沌策略遍历性的优化算法,已经广泛应用于实际工程领域^[8]。而 ADRC 是一种新型控制技术,能对系统运行时收到的复杂扰动实时估算并补偿,适用于非线性系统,拥有良好的控制品质。将所设计控制器与模糊 PID、滑模控制器^[9-10]分别配置到电子差速控制系统,在典型及复杂路况下进行仿真对比分析,结果表明,所设计的电子差速控制策略使得汽车转向具有良好的鲁棒性、强抗扰能力及操纵稳定性。

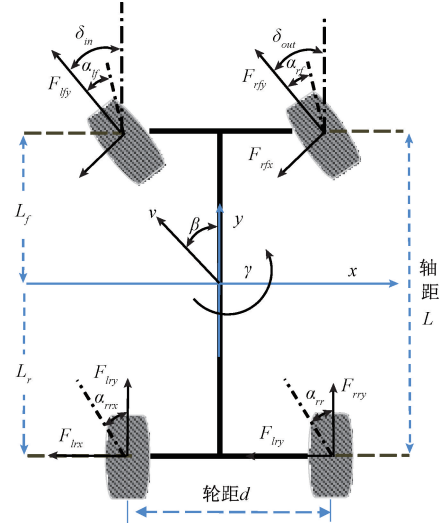
1 两驱电动车辆系统模型的构建

为反应路面、轮胎等随机因素影响,便于分析转向过程操纵稳定性和安全性,选用轮毂驱动、前轮转向、后轮两驱的电动汽车为研究对象,设计 EDC 策略,搭建七自由度整车模型^[11] (包括整车动力学模型、电机模型、轮胎

模型和路面识别模型)。

1.1 整车动力学模型

整车受力状况由横向、纵向、垂直平移及绕这 3 条轴线转动的 6 自由度受力模型描述^[12-13]。假定忽略垂直运动、俯仰运动及侧倾运动,考虑横向平移、纵向平移和横摆运动以及 4 个车轮旋转共 7 个自由度,整车受力如图 1 所示。



注: $l_f, l_r, l_r, r_r, i_n, o_u$ 分别表示左前, 右前, 左后, 右后, 内, 外, L_f —前轴到质心的距离, L_r —后轴到质心的距离, β —质心侧偏角, α —车轮侧偏角, F_y, F_x —纵、横向力, δ —转向角。

图 1 汽车转向受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of automobile steering force

依据牛顿第二定律,汽车横向运动方程为^[14]:

$$F_x = -m \frac{dv}{dt} \sin \delta = -F_{fy} \sin \delta_{in} - F_{fy} \cos \delta_{in} - F_{lx} - F_{ry} \sin \delta_{out} - F_{rx} \cos \delta_{out} - F_{rx} \quad (1)$$

纵向运动方程为:

$$F_y = -m \frac{dv}{dt} \cos \delta = -F_{fy} \cos \delta_{in} - F_{fx} \sin \delta_{in} + F_{ly} + F_{ry} \cos \delta_{out} - F_{rx} \sin \delta_{out} + F_{rx} \quad (2)$$

横摆运动方程为:

$$I_z \gamma = L_f (F_{fy} \sin \delta_{in} + F_{fx} \cos \delta_{in}) + L_f (F_{ry} \sin \delta_{out} + F_{rx} \cos \delta_{out}) - L_r F_{lx} - L_r F_{ly} \quad (3)$$

式中: m 为整车质量, I_z 为绕 z 轴转动惯量, γ 为横摆角速度。

将车速 v 解耦得到 4 个车轮在坐标轴方向的速度:

$$\begin{bmatrix} v_{fx} \\ v_{fy} \\ v_{rx} \\ v_{ry} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{fx} \\ v_{fy} \\ v_{rx} \\ v_{ry} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \beta & L_f \\ \cos \beta & -0.5d \\ \cos \beta & 0.5d \\ \sin \beta & -L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

转向时汽车车轮侧向发生弹性形变,根据轮胎侧偏特性各轮产生侧偏角:

$$\begin{cases} \alpha_{lf} = \arctan(v_{lfx}/v_{lfy}) - \delta_{in} \\ \alpha_{rf} = \arctan(v_{rfx}/v_{rfy}) - \delta_{out} \\ \alpha_{lr} = \arctan(v_{lrx}/v_{lry}) \\ \alpha_{rr} = \arctan(v_{rrx}/v_{rry}) \end{cases} \quad (5)$$

质心侧偏角为:

$$\beta = \arctan(v_x/v_y) \quad (6)$$

转向时向心力 F_c 为:

$$F_c = mv(\gamma + \dot{\beta}) \quad (7)$$

汽车直线行驶时左右车轮承受的载荷相同。转向时由于向心力的作用导致汽车的垂直载荷发生转移:

$$\begin{cases} F_{lfz} = \frac{L_r}{2(L_f + L_r)} \left(mg - \frac{2hF_c}{d} \right) \\ F_{rfz} = \frac{L_r}{2(L_f + L_r)} \left(mg + \frac{2hF_c}{d} \right) \\ F_{lrz} = \frac{L_r}{2(L_f + L_r)} \left(mg - \frac{2hF_c}{d} \right) \\ F_{rrz} = \frac{L_r}{2(L_f + L_r)} \left(mg + \frac{2hF_c}{d} \right) \end{cases} \quad (8)$$

式中: h 为质心高度。

定义车轮转速为 ω , 车轮半径为 R , 则车轮运动方程及滑移率 λ 公式为:

$$J_\omega \dot{\omega} = F_{ix}R + T_d - T_b \quad (9)$$

$$\lambda_i = \frac{\omega_i R - v}{\omega_i R} \quad (10)$$

式中: $i=lf, rf, lr, rr$, T_b 为制动力矩; T_d 为驱动力矩; J_ω 为车轮绕自身轴线的转动惯量。

1.2 电机模型

所研究电动汽车采用永磁无刷直流电机^[15], 将PWM放大器的传递函数近似看成比例环节即:

$$u_d = k_1 \cdot u_c \quad (11)$$

式中: u_c 为输入电机的控制电压; u_d 为电机端电压; k_1 为放大倍数。

直流电机数学模型为:

$$\begin{cases} L\dot{I} + R_a I + C_e \Omega = u_d \\ J\dot{\Omega} + B\Omega + T_L = k_2 I \end{cases} \quad (12)$$

式中: I 为电枢电流; Ω 为电机角速度; k_2 为电机转矩系数; C_e 为反电势系数; R_a 为电枢电阻; J 为等效(驱动轮折算到电机轴上)转动惯量; B 为粘滞摩擦系数; T_L 为负载转矩。

1.3 Dugoff 轮胎模型

Dugoff 轮胎模型用于分析轮胎纵滑和侧偏, 作用在第 i 轮胎上的纵向力 F_{ix} 和侧向力 F_{iy} 为^[16]:

$$\begin{cases} F_{ix} = \mu_i F_{il} C_x \frac{\lambda_i}{1 - \lambda_i} f(\phi) \\ F_{iy} = \mu_i F_{il} C_y \frac{\tan(\alpha)}{1 - \lambda_i} f(\phi) \end{cases} \quad (13)$$

式中: μ 为路面附着系数; ϕ 为轮胎动态参数:

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{C_x^2 \lambda_i^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha_i}} (1 - \lambda_i) \cdot (1 - \varepsilon \mu \cdot \sqrt{C_x^2 \lambda_i^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha_i}) \quad (14)$$

$f(\phi)$ 为轮胎动态约束函数:

$$f(\phi) = \begin{cases} \phi(2 - \phi), & \phi < 1 \\ 1, & \phi \geq 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中: C_x 为轮胎纵向刚度; C_y 为轮胎侧偏刚度; ε 为速度影响因子。

1.4 基于滑移率的路面识别模型

路面的滑移率 λ 和附着系数 μ 的经验关系模型为^[17]:

$$\mu(\lambda) = C_1(1 - e^{-2C_2\lambda}) - C_3\lambda \quad (16)$$

式中: C_1 、 C_2 和 C_3 为 μ 和 λ 的经验关系模型系数, 标准路面相关参数如表 1 所示。

C_1 、 C_2 和 C_3 为非负常数, 通过分析式(16)函数的曲线特征可以解得路面的最佳滑移率和最大利用附着系数。

最佳滑移率(目标滑移率) λ_{opt} 为:

$$\lambda_{opt} = \frac{1}{C_2} \ln \frac{C_1 C_2}{C_3} \quad (17)$$

最大利用附着系数 μ_{max} 为:

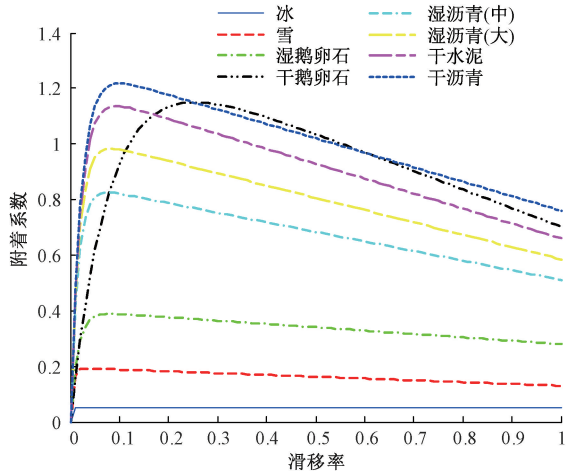
$$\mu_{max} = C_1 - \frac{C_3}{C_2} \ln \frac{C_1 C_2}{C_3} \quad (18)$$

表 1 不同路面经验系数

Table 1 Empirical coefficients of different pavements

路面	C_1	C_2	C_3
冰	0.050	306.400	0
雪	0.195	94.130	0.065
干鹅卵石	1.370	6.456	0.669
湿鹅卵石	0.400	33.710	0.120
湿沥青(中)	0.856	33.821	0.345
湿沥青(大)	1.027	29.494	0.442
干水泥	1.197	25.170	0.537
干沥青	1.280	23.990	0.520

由式(16)及表1可以得到不同基本路面的曲线 $\mu_1(\lambda) - \mu_s(\lambda)$, 如图2所示。

图2 八条 μ - λ 曲线Fig. 2 Eight μ - λ curves

将车轮滑移率代入已知参数的基本路面经验关系模型式(16),对比各个基本路面的附着系数和车辆的附着系数可以得到各个路面的权重系数如式(19)所示。

$$a_i = \frac{1}{|\mu_i(\lambda) - \mu_i| + \varepsilon} \quad (19)$$

式中: $i=1 \sim 8$ 。

由此计算出车轮对应的路面峰值附着系数及目标滑移率如式(20)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \mu_{\max} &= \frac{\sum_{i=1}^8 a_i \mu_{\max i}}{\sum_{i=1}^8 a_i} \\ \lambda_{\text{opt}} &= \frac{\sum_{i=1}^8 a_i \lambda_{\text{opt}i}}{\sum_{i=1}^8 a_i} \end{aligned} \right. \quad (20)$$

2 基于自抗扰的 EDC 策略设计

电动汽车 EDC 策略,以最佳滑移率作为控制目标,转换成电机角速度作为控制器的输入,通过控制电机电压,对两后驱动轮电机进行转矩控制。为解决控制系统中扰动未知且复杂的情况引入自抗扰控制器,自抗扰控制技术将外部扰动和参数变化造成的内部扰动扩张为综合扰动,运用反馈补偿的方式抑制扰动^[18],适用于 EDC 系统中。

2.1 基于自抗扰控制器的 EDC 结构设计

1) 自抗扰 EDC 结构设计

路面识别模型通过输入的车轮转速和路面附着系数结合式(19)得出基本路面的权重,进而获得最佳滑移率,系统由此计算出转速目标值,通过一阶非线性自抗扰

控制器完成对驱动电机的控制。基于 ADRC 的电子差速控制器整体如图 3 中虚框所示。

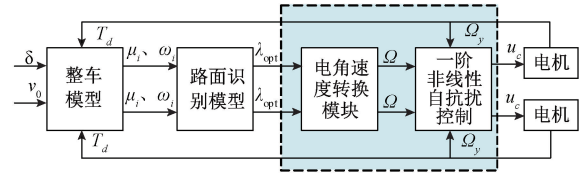


图3 基于 ADRC 的 EDC 结构设计

Fig. 3 EDC structure design based on ADRC

2) 基于电角速度的 EDC 一阶自抗扰建模

设定滑移率目标值 λ_{opt} ,根据式(10)得转速目标值

ω_{opt} :

$$\omega_{\text{opt}} = \frac{v}{(1 - \lambda_{\text{opt}})R} \quad (21)$$

且有:

$$\Omega = p\omega \quad (22)$$

式中: p 为电机减速比; Ω 为电机角速度; ω 为车轮角速度。由式(19)~(20)将对最佳滑移率的控制转换成对电机角速度的控制。

由式(9)、(10)、(21)、(22)得自抗扰控制器的状态方程为:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\Omega} &= -\left(\frac{L\dot{I} + RI}{C_e}\right) + \frac{k_1 u_c}{C_e} \\ \dot{\Omega} &= \frac{k_2 I - T_L}{J} + \frac{BL\dot{I} + BRI}{C_e J} - \frac{Bk_1 u_c}{C_e J} \end{aligned} \right. \quad (23)$$

根据自抗扰一阶被控对象:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{x} &= f(x, w(t)) + b(t)u \\ y &= x \end{aligned} \right. \quad (24)$$

令:

$$\left\{ \begin{aligned} x &= \Omega \\ f(x, w(t)) &= \frac{k_2 I - T_L}{J} + \frac{BL\dot{I} + BRI}{C_e J} \\ b(t) &= -\frac{Bk_1 I}{C_e J} \\ u &= u_c \end{aligned} \right. \quad (25)$$

式中: 将 $\frac{k_2 I - T_L}{J} + \frac{BL\dot{I} + BRI}{C_e J}$ 考虑成内外扰动 $f(x, w(t))$, $-\frac{Bk_1 I}{C_e J}$ 为系统增益 $b(t)$ 。由此构成电角速度控制一阶非线性系统,设计基于 ADRC 的 EDC 系统。

2.2 基于电角速度的 EDC 自抗扰控制器设计

1) 电角速度跟踪微分器设计

电角速度跟踪微分器 (tracking differentiator, TD) 完

成对输入信号的跟踪,在保证快速性的同时减少跟踪信号的超调和振荡, Ω_{id} 的跟踪微分方程为:

$$\begin{cases} f = f_{han}(\Omega_{ref}(k) - \Omega_{id}, \Omega_{id}(k), r_0, h_0) \\ \Omega_{id}(k+1) = \Omega_{id}(k) + h\dot{\Omega}_{id}(k) \end{cases} \quad (26)$$

式中: Ω_{ref} 为期望信号; h 为采样周期; r_0 为速度因子;其值与跟踪速度正相关; h_0 为 f_{han} 函数步长, f_{han} 为具有安排过渡过程作用的最速综合函数^[19], h_0 的取值需与 r_0 配合,其值与噪声抑制效果成正相关。

2) 电角速度扩张状态观测器设计

将扩张状态观测器(extended state observer, ESO)跟踪得到的输出 Ω_{eso} 记做 z_1 ,再将输入信号 $b \times u_c$ 、 Ω_y 的组合为 N_{eso} ,记做 z_2 ,则电角速度 Ω_{eso} 的扩张观测方程为:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(k) = \Omega_{eso}(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) - h[z_2(k) - \beta_{01}f_{al}(\varepsilon_1(k), a, \delta) + b(k)u_c(k)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) - h\beta_{02}f_{al}(\varepsilon_1(k), a, \delta) \end{cases} \quad (27)$$

式中: β_{01} 、 β_{02} 为非线性最优综合控制函数 f_{al} 的系数^[20],其值决定了ESO对状态变量的估计效果; δ 为 f_{al} 函数的滤波因子。

3) 电角速度非线性状态误差反馈控制率设计

非线性状态误差反馈控制率(nonlinear state error feedback, NLSEF)承接TD和ESO,完成对被控对象的控制和扰动补偿,设计NLSEF方程为:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(k+1) = \Omega_{id}(k) - \Omega_{eso}(k) \\ N_0(k) = \beta_{03}f_{al}(\varepsilon_1(k), 0.5, \delta) \\ N(k) = [N_0(k) - z_2(k)]/b_0 \end{cases} \quad (28)$$

式中: β_{03} 为增益系数; b_0 为控制系数;一般取值等于 b 。

4) 基于电角速度的EDC自抗扰控制结构

分别以 Ω_{ref} 和 u_c 作为自抗扰控制器的输入和输出,综合TD、ESO及NLSEF设计方案,搭建一阶非线性自抗扰控制器,ADRC的组成如图4虚线部分所示。

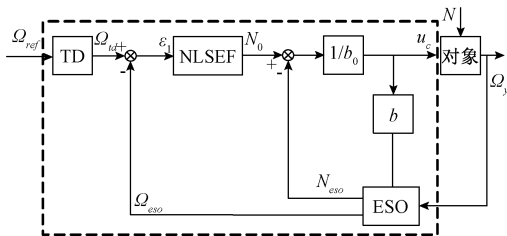


图4 自抗扰控制器结构

Fig. 4 Structure of active disturbance rejection controller

2.3 基于CPSO的ADRC参数设计

自抗扰控制器具有一定的复杂度^[21],其参数整定是ADRC应用中的关键环节。根据工程调节经验,TD的参

数调节比较独立,速度因子 r_0 和 f_{han} 函数步长 h_0 的选取满足对输入信号跟踪的快速、无超调即可;ESO为ADRC的核心,其精度对控制器的影响较大,其中 f_{al} 函数的 a ,一般选取0.25或者0.5,参数 β_{01} 、 β_{02} 决定了ESO对状态变量的控制效果,需要通过优化算法来调节;NLSEF的 β_{03} 参数与 β_{01} 、 β_{02} 同理。

在线PSO优化算法搜索速度快、效率高,但用于优化ADRC参数时,可能过早收敛,陷入局部最优。而混沌策略具有遍历性,可以解决陷入局部最优问题,缩短搜索时间,提高收敛精度。因此,设计混沌粒子群优化算法,

将CPSO适应度函数设计为 $J_s = \int_0^\infty |\varepsilon(t)| dt$,其中 $\varepsilon(t)$ 为电角速度的输入误差,通过选定ADRC其余参数可完成ADRC参数 β_{01} 、 β_{02} 和 β_{03} 的快速寻优和整定。CPSO优化控制结构图及优化流程图如图5。

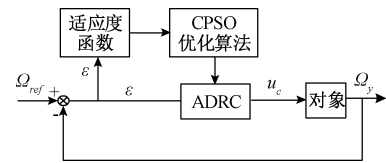


图5 CPSO优化控制结构

Fig. 5 CPSO optimization control structure

3 基于自抗扰的EDC验证

为验证基于自抗扰的EDC策略和CPSO用于自抗扰控制器参数优选的有效性,在Matlab/Simulink环境中搭建7自由度整车模型和EDC模型。EDC分别采用模糊PID控制、滑模控制(SMC)、自抗扰控制和基于CPSO的自抗扰控制。设置汽车初速度 $v_0 = 72$ km/h,汽车以 $\delta = 5^\circ$ 小角度左转,转角信号直行3 s后施加。仿真参数如表2、3所示。

表2 CPSO参数设置

Table 2 CPSO parameter setting

惯性因子 w	加速常数 c_1	加速常数 c_2
0.6	2	2
最大迭代次数 MaxIter	粒子群规模 SwarmSize	维数 Dim
100	20	3

3.1 典型路况下EDC控制效果分析

当电动汽车转向时,可通过观测汽车的状态参数来分析汽车的稳定性,如滑移率和横摆角速度可以分析汽车的方向稳定性,驱动力矩可以分析汽车的动力性能等。因此在冰面、水泥面和冰-水泥对开路面(对开路面指汽车左右轮行驶在不同路况,用于考察所设计系统对汽

表 3 汽车参数

Table 3 Automobile parameters

车轮半径	转动惯量	重力加速	汽车质量	前后轴距
R/m	$I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	M/kg	L/m
0.31	2 549	9.8	2 100	2.6
质心高度	左右轮距	电枢电阻	反电动势	电机转矩
h/m	d/m	R_a/Ω	系数 k_1	系数 k_2
0.7	1.65	0.11	0.047	0.45
前轮到质心 距离 L_f/m	后轮到质心距 离 L_r/m	等效转动惯 量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	电枢回路 电感 L/H	转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
1.25	1.35	13.7	0.06	13.8

车横摆及滑移率的协调效果。)3 种典型路况下,采用 3 种抗扰控制方式分别进行 EDC 仿真,结果如图 6~8 所示。

仿真结果表明:1) 基于 CPSO-ADRC 的 EDC 系统,在水泥路面和冰面左右驱动轮的恢复稳定时间(t_a, t_b)分别为(0.5 s, 0.38 s)和(0.78 s, 0.55 s),基于 SMC 的 EDC 系统在调节时间上略迟于 CPSO-ADRC 系统,而基于模糊 PID 的 EDC 系统滑移率逐渐逼近最佳值,其在水泥路面和冰面左右驱动轮的恢复稳定时间分别为(3.1 s, 2.5 s)和(3.5 s, 0.2 s),约为 CPSO-ADRC 的 6~7 倍;2) 随着控制时间的推移,横摆角速度逐渐趋于平稳,基于 CPSO-ADRC 控制器的横摆角速度波动最小,稳定性更高,基于 SMC 控制器的系统的横摆角速度波动较

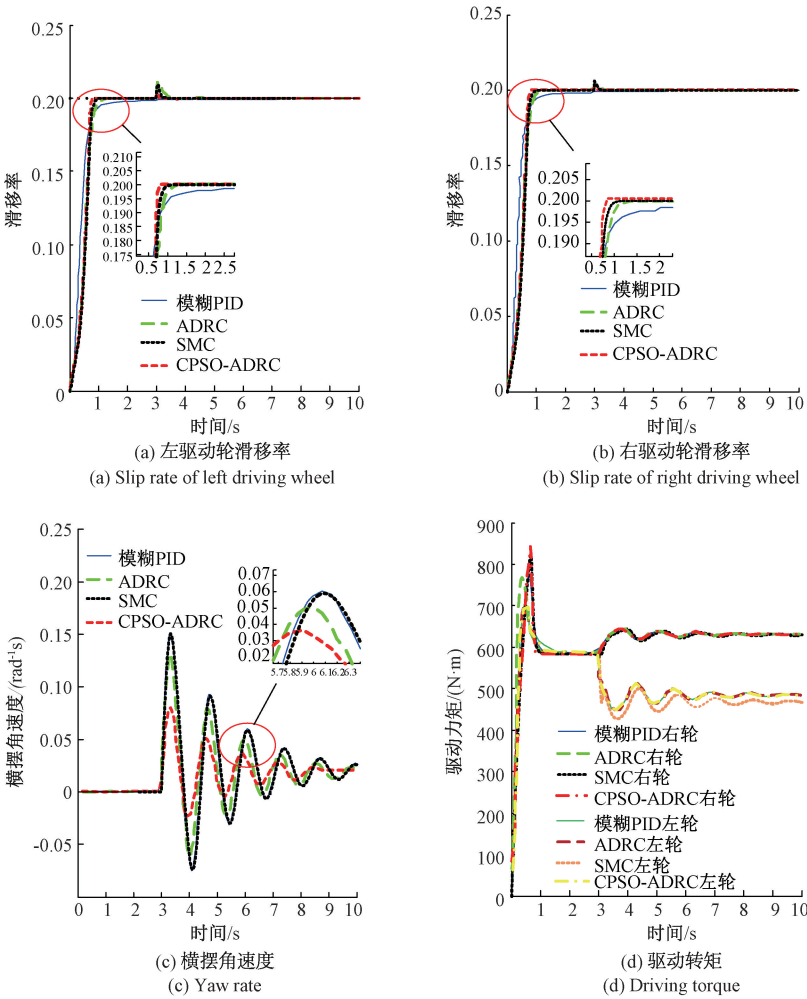


图 6 水泥路面电子差速系统性能

Fig. 6 The performance of electronic differential system on cement pavement

大,在转弯后的横摆角速度波动幅度与模糊 PID 接近,而基于模糊 PID 控制器的系统在未转弯时横摆角速度已出现抖动,显然稳定性不足;3) 转向外侧车轮驱动力矩大于内侧车轮驱动力矩,左右车轮驱动力矩的波动逐渐减

小,最大驱动转矩波动范围不超过 10 N·m,基于 ADRC 的 EDC 系统的驱动转矩波动最小,更有利于汽车的行驶稳定性和安全性;4) 所设计自抗扰控制器的响应速度快,对不确定因素的敏感程度低,对滑移率、横摆角速度

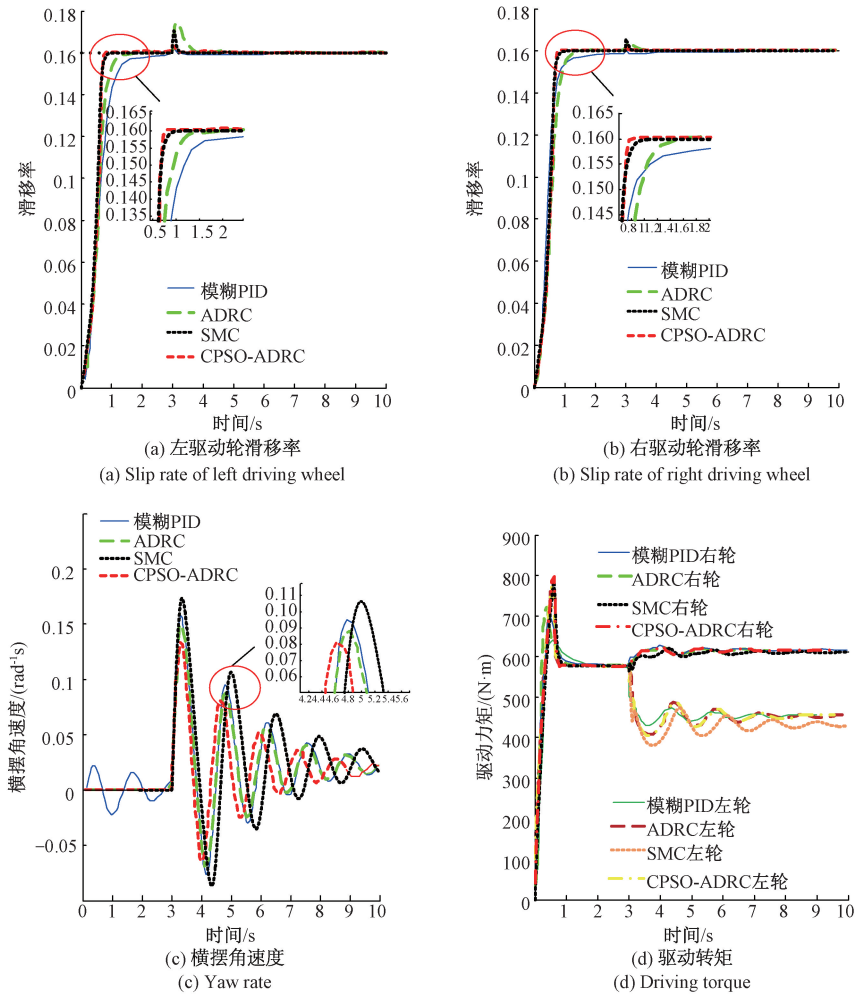


图7 冰面电子差速系统性能

Fig. 7 The performance of electronic differential system on ice

及驱动力矩的波动有较强的抑制效果。当控制器参数由 CPSO 优化整定后,基于自抗扰控制器电子差速控制系统对性能变化参数的扰动抑制能力更好,响应时间更短,抗干扰的能力更强,使车辆更快行驶处在滑移率的最佳值,保证了汽车鲁棒稳定性和行驶安全性,更好地实现汽车的电子差速功能。

3.2 变化载荷状态分析

汽车在转向过程中必定会出现因路况繁杂而出现的重心不定负载转移的不确定情况,将载荷及复杂路况考虑成外部扰动^[22],因此在变化载荷及对开路面转向观察系统抗扰能力,仿真周期为 10 s,仿真结果如图 9 所示。

由图 9 可见,在对开路面转向过程中,载荷发生随机变化时,左右驱动轮的滑移率依旧能快速无超调地恢复最佳值,横摆角速度及左右轮的驱动力矩存在极微小的变化,但随着控制时间地延长,基本与无添加扰动的性能参数相同,波动逐渐减小趋于平稳状态,系统对载荷变换

因素的敏感程度小,具有强抗干扰性能。结果表明,基于自抗扰控制器设计的电子差速控制系统具有非常强的鲁棒性。

3.3 Simulink/Carsim 联合仿真验证

1) Simulink/Carsim 联合仿真平台设计

Carsim 是专门针对车辆动力学的仿真软件,是国内的一汽、上汽、吉利、五菱等车企的车辆动力学仿真模型工具,是汽车行业的标准软件,在分析车辆的稳定、动力、安全性方面有很高的认可度。建立基于 Carsim 和 Matlab/Simulink 的联合仿真平台可对电子差速控制策略进行有效的验证^[23-26]。

Carsim 主要针对传统汽车行业,目前还未开发完整的电动汽车模型。因此,拟利用 Carsim 在汽车架构和仿真方面的优势,修改传统的内燃机汽车模型,改为后驱轮毂电动汽车模型,而后基于 Carsim 和 Matlab/Simulink 的联合仿真平台,验证控制策略。

为了利用 Carsim 实现对电动汽车的仿真,需要对

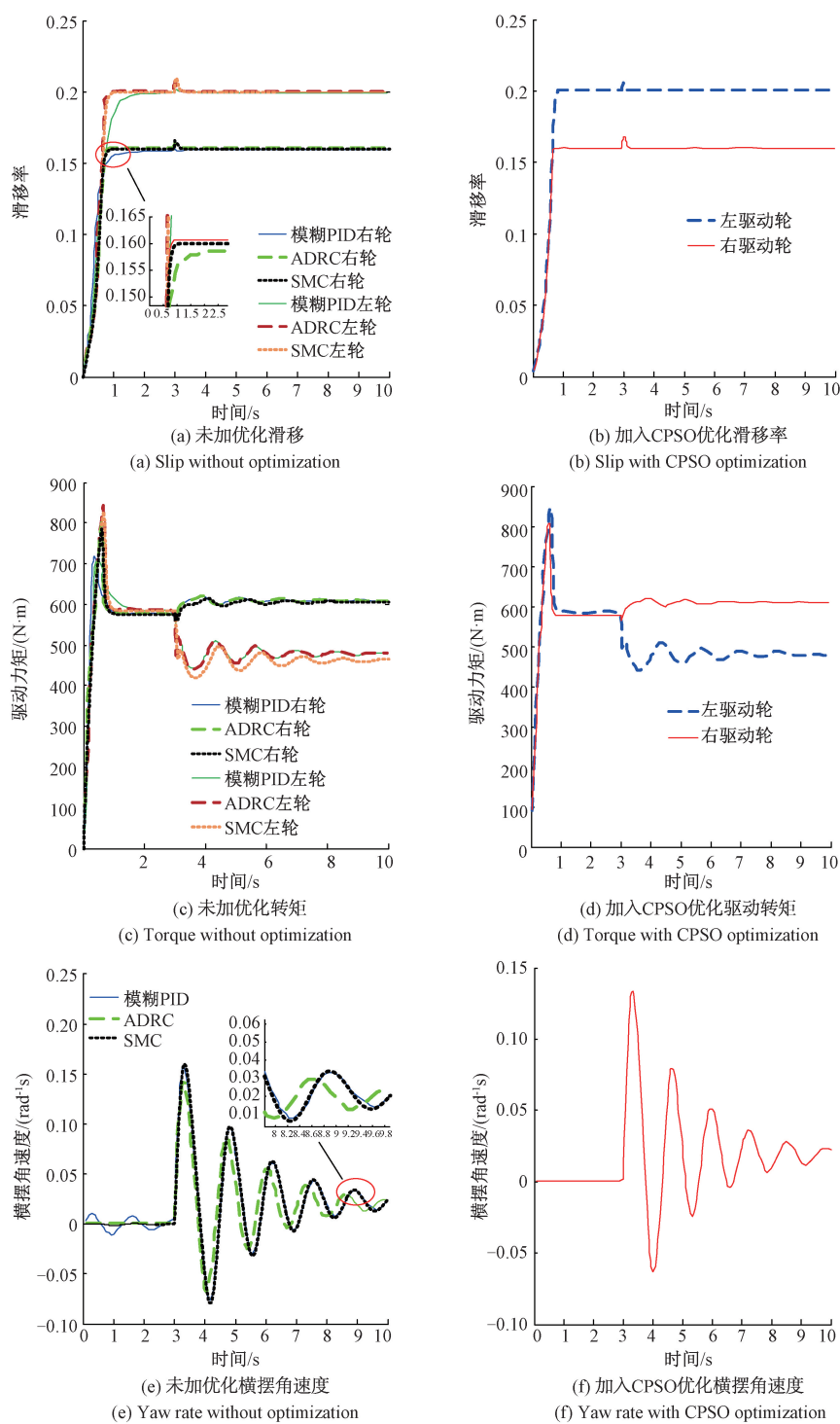


图8 对开路面电子差速系统性能

Fig. 8 The performance of electronic differential system on split road

Carsim 中 B 型车辆模型做如下处理:

(1) 切断 Carsim 中的车辆原有的燃油动力传动系统,即中断传动系与车轮之间的动力传输,使得汽车动力完全来自外部,通过配置 Simulink 和 Carsim 的接口来驱动车轮。

(2) 改变车辆模型的主要参数,设置参数如表 3 所示,修改后的车辆参数如图 10 所示。

(3) 修改 Carsim 中的路面模型,建立水泥、冰、和水泥-冰对开路面模型。

(4) 设置 Carsim 与 Simulink 的输入输出接口,输入

设置仿真车速为 72 km/h, 输入前轮转角 $\delta=5^\circ$ 左转, 分别将建立好的路面模型替代原有的路面, 利用

表 4 联合仿真输入/输出接口设置
Table 4 Co-simulation input/output interface settings

输入/输出	变量名	物理意义描述
输入	IMP_MY_OUT_D2_L	左后轮转矩
	IMP_MY_OUT_D2_R	右后轮转矩
	IIMP_STEER_SW	转角
输出	AVy_L2	左后轮转速
	AVy_R2	右后轮转速
	AVz	横摆角速度
	Vx	车速

Simulink 中的电子差速控制策略的转矩输出直接驱动后轮转动,并与采用 SMC 的控制策略做对比,在水泥路面

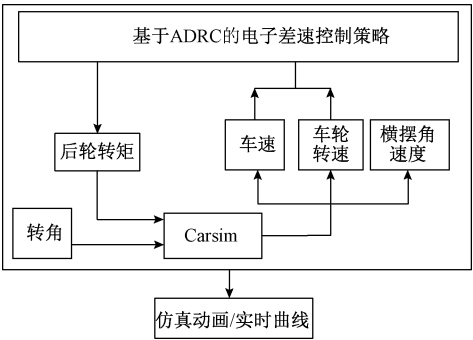


图 11 电子差速控制联合仿真框图
Fig. 11 Co-simulation block diagram of electronic differential control

面的电子差速控制性能如图 12 所示。

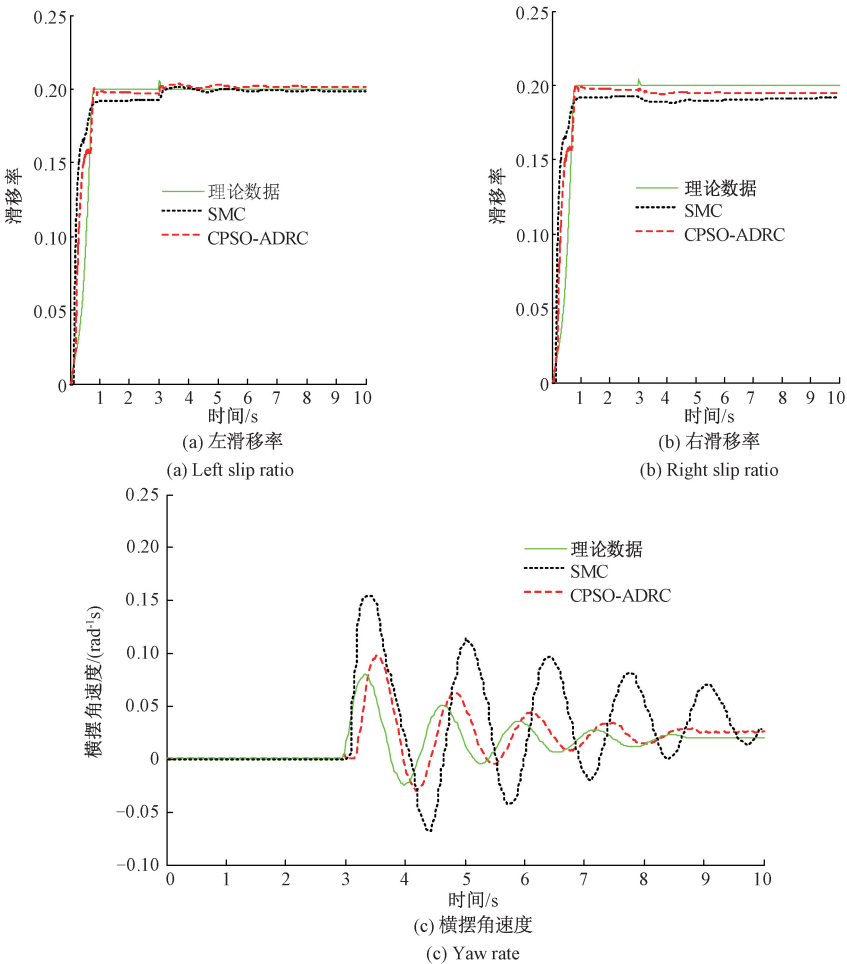


图 12 水泥路面理论与试验结果对比
Fig. 12 Comparison between theoretical result and test result on cement pavement

修改路面模型为冰路面,在冰路面上的电子差速控制性能如图 13 所示。

多次监控控制系统的运行时间,进行控制策略的求

解效率分析,模糊 PID 运行 60 001 次花费 0.234 4 s, SMC 运行 60 001 次花费 0.21 875 s,ADRC 运行 120 000 次花费 0.375 0 s, CPSO-ADRC 运行 120 000 次花费

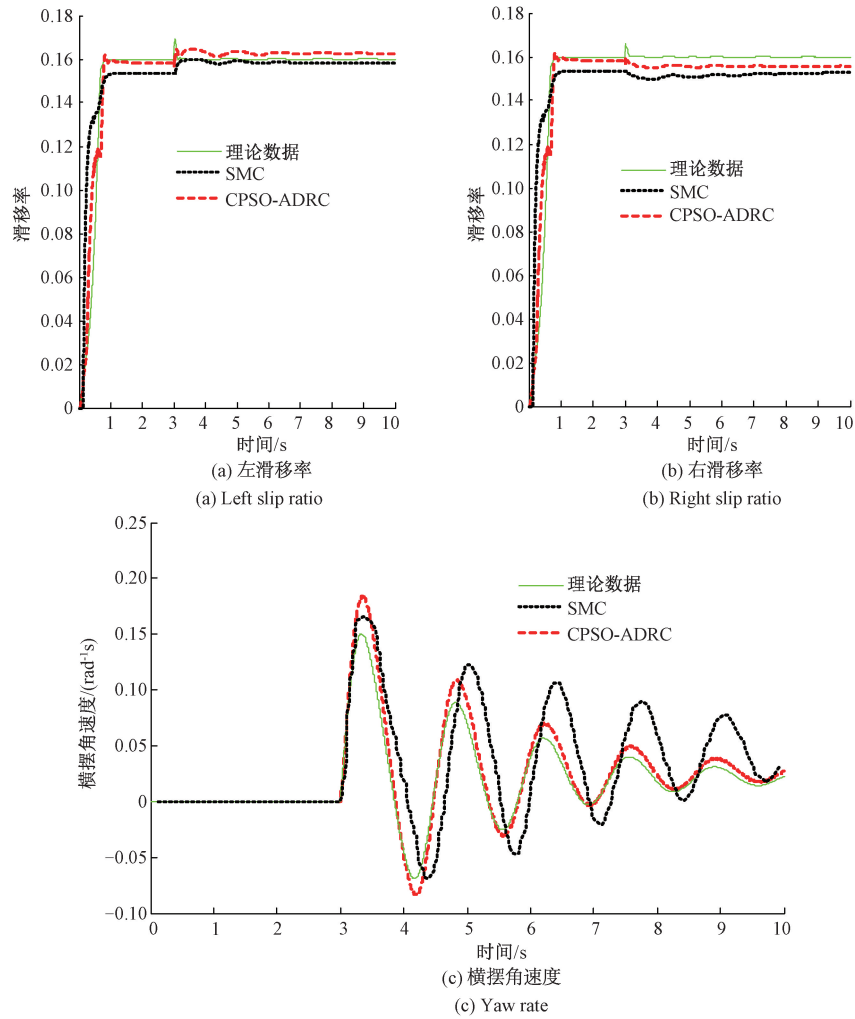


图 13 冰路面理论与试验对比

Fig. 13 Comparison between theoretical result and test result on ice

0.468 75 s,得到运行时间对比如表 5 所示。

表 5 控制策略运行时间对比

Table 5 Comparison of control strategy running time

控制方式	模糊 PID	SMC	ADRC	CPSO-ADRC
单次运行时间/ μs	3.91	3.64	2.69	3.12

由图 12 和 13 可见,SMC 的滑移率控制较 CPSO-ADRC 偏差较大,且存在较大静差,横摆角速度的控制与理想效果和 CPSO-ADRC 的控制效果偏差较大,波动幅度增加了约 50%,且在短时间内难以稳定,而 CPSO-ADRC 在水泥和冰路面上的实际滑移率控制效果良好,滑移率控制的快速性和稳定性均与理论结果一致。实验初始的 0.5 s 内,滑移率略高于理论数据,且在滑移率接近稳定时,存在一定程度的微小波动和静差,分析原因如下:由于数学模型忽略了汽车悬架和简化了轮胎的滚动

阻力,数学模型的轮胎转动角速度理论值与 Carsim 车辆模型的轮胎转动角速度实际值存在一定的误差,联合仿真中转角输入需经过转向系统作用到车轮上,也会带来一定的误差,因此轮胎的滑移率实际值与理论值会出现一定的偏差。

对比 CPSO-ADRC 在水泥和冰路面上的横摆角速度,试验中的横摆角速度稳定时较理论值偏大,但仍能保持在 0.05 以内,趋于平稳的时间略长,原因如下: Carsim 通过传感器获取车辆的轮速、方向盘转角等信号,通过实时计算或查表等方法估计车辆当前的横摆角速度,且联合仿真环境中充分考虑到悬架减振器的阻尼、轮胎侧偏刚度车辆振动等力学特性,使得车辆的横摆角速度较理论值略有增加。

由表 5 可见,CPSO-ADRC 较模糊 PID 运行用时减少了 20%,较 SMC 运行时间减少了 14.4%,在保证调节的快速性的同时,也增加了算法的求解效率。

3.4 实车试验

实验基于搭建的四轮轮毂驱动电动汽车实验平台,实验车辆采用后轮驱动,额定车速为 50 km/h,汽车其他参数如表 6。实验平台的控制器是基于 TI 公司的 TMS320F28069 芯片,通过 Matlab 提供的硬件 TI C2000 硬件支持包和 TI 公司的 controlSUITE 和 Code Composer Studio 软件包,将仿真 CPSO-ADRC 的 Simulink 程序编写成工程文件并写入 TMS320F28069 芯片,实验用车如图 14 所示。

表 6 电动汽车参数

Table 6 Electric automobile parameters

尺寸/mm	轴距/m	续航里程/km
2 750×1 200×1 570	2 050	100
车轮半径/m	整车质量 M1/kg	最大载重 M2/kg
0.3	2 100	250

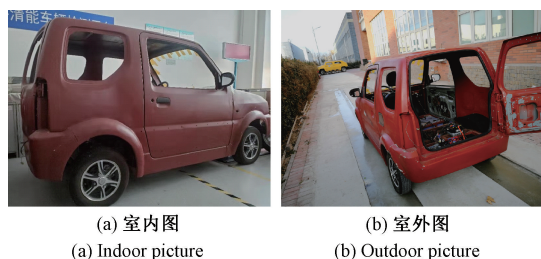


图 14 实验电动汽车

Fig. 14 Experiment electric automobile

实验车辆分别在水泥路面和冰路面以 36 km/h 行驶,在 3 s 后左转,方向盘转角为 5° 。得到汽车的左轮和横摆角速度数据,与 36 km/h 的理论数据对比如图 15~16 所示。

由图 15 和 16 所示,实车滑移率和横摆角速度实测值与 Simulink/Carsim 联合仿真结果相近,滑移率控制实测较仿真略慢,但仍可在 1 s 内稳定,稳定值略高于仿真值;横摆角速度在转向后 2.5 s 内稳定,随后在仿真值附近浮动,由于实际中转角信号无法突加到目标值,即转角

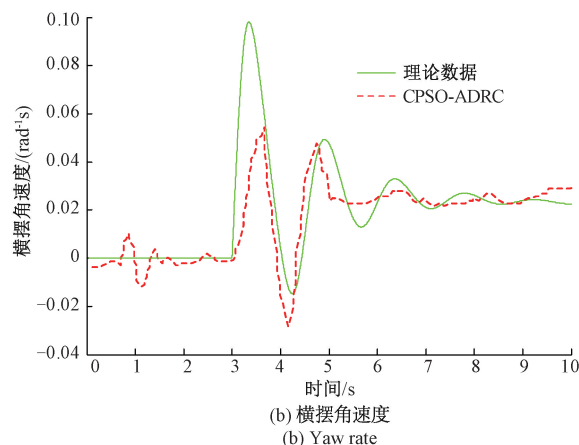
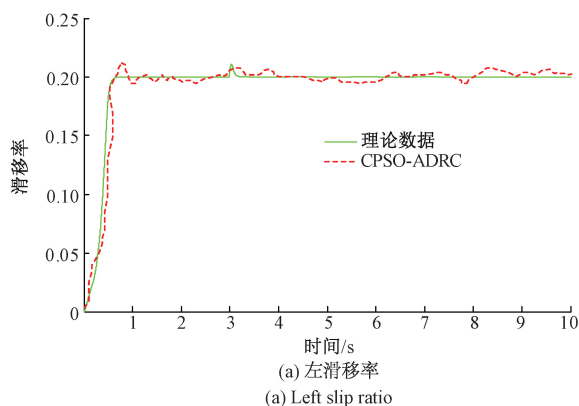


图 15 水泥路面实验对比

Fig. 15 Experiment comparison on cement pavement

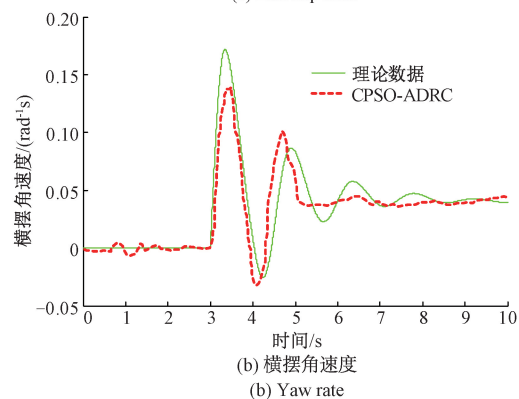
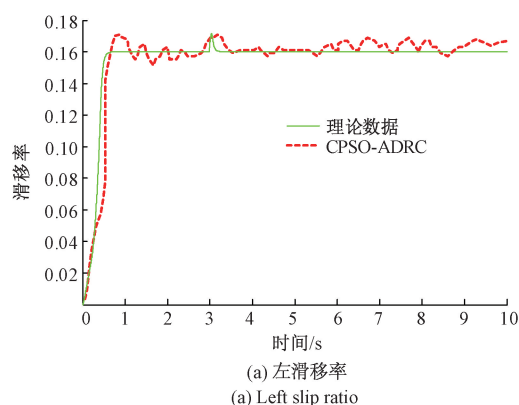


图 16 冰路面实验对比

Fig. 16 Experiment comparison on ice

需要一定时间才可到目标值,故横摆角速度的峰值较仿真值偏小。实验结果表明,所设计的 CPSO-ADRC 在实际应用中的效果保持了仿真分析的快速、稳定,能更好的恢复汽车行驶的稳定。

综上所述,基于自抗扰控制器设计的电子差速控制系统在联合仿真和实际应用中,都保持了快响应,强抗扰等优势,能更快的调节车辆滑移率和横摆角速度,使其处

在最佳值,保障了汽车安全稳定行驶和电子差速控制控制系统的鲁棒性。

4 结 论

将滑移率作为控制目标,设计了一种基于自抗扰控制器的电子差速控制策略,并利用混沌粒子群优化算法对控制器参数进行优化,将其注入电子差速控制系统中,并与加入先进控制模糊PID控制器的电子差速控制系统对比分析,得到如下结论:

1) 所设计的电子差速控制策略能保证汽车在转弯过程中,滑移率处于该路况的最佳值,降低驱动转矩及横摆角速度的波动范围,增强了系统的鲁棒稳定性和操纵稳定性,更好地实现汽车的电子差速功能。

2) 在变化载荷及对开路面状态下仿真,验证了将一阶自抗扰控制器注入电子差速控制系统中的强鲁棒性,降低了系统受到干扰的敏感程度,使得在转向行驶过程中,性能参数基本不发生改变,增强了汽车行驶的安全性和舒适性。

3) 对控制器参数使用CPSO优化算法进行优化,所得参数更适用于电子差速控制系统中,使得驱动轮转矩及横摆角速度波动范围更小,对其具有抑制作用,响应速度更快时间更短,因此,所设计的基于CPSO-ADRC的EDC系统确实对抗扰起巨大作用,具有强鲁棒性,适用于工程开发。

4) 通过建立Simulink/Carsim联合仿真的分布式驱动整车模型并设计了实车实验,对比CPSO-ADRC的两种路面工况下实车模型的响应,验证了所设计电子差速控制策略的快速性和准确性。

参考文献

- [1] 胡超芳,曹磊,赵凌雪,等.基于预测控制的无人驾驶车辆爆胎转向控制[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(5):468-474.
HU CH F, CAO L, ZHAO L X, et al. Tire burst steering control of driverless vehicle based on predictive control [J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology Edition), 2019, 52 (5): 468-474.
- [2] 靳立强,田端洋,刘阅.电动轮汽车驱动助力转向与稳定性协调控制[J].机械工程学报,2018,54(16):160-169.
JIN L Q, TIAN D Y, LIU Y. Coordinated control of driving power steering and stability of electric wheel vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54 (16): 160-169.
- [3] 王洪礼,张伯俊,张锋,等.汽车四轮转向系统的 H_{∞} 控制[J].天津大学学报,2004(3):221-224.
WANG H L, ZHANG B J, ZHANG F, et al. H_{∞} control of automobile four-wheel steering system [J]. Journal of Tianjin University, 2004 (3): 221-224.
- [4] 徐寅,陈东.电动汽车差速系统研究综述[J].中国机械工程,2011,22(4):498-503.
XU Y, CHEN D. Overview of research on differential system of electric vehicles [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22 (4): 498-503.
- [5] 谭会生,廖雯.模糊PID在轮式机器人转向控制中的应用[J].湖南工业大学学报,2018,32(1):81-87.
TAN H SH, LIAO W. Application of fuzzy PID in steering control of wheeled robot [J]. Journal of Hunan University of technology, 2018, 32 (1): 81-87.
- [6] 童贻银.双电机后轮驱动电动汽车电子差速系统的仿真研究[D].华南理工大学,2016.
TONG Y Y. Simulation research on electronic differential system of dual motor rear wheel drive electric vehicle [D]. South China University of technology, 2016.
- [7] 臧怀泉,戴彦,张素燕,等.一种基于相对滑移率的电动汽车电子差速控制方法研究[J].机械工程学报,2017,53(16):112-119.
ZANG H Q, DAI Y, ZHANG S Y, et al. Research on electronic differential control method of electric vehicle based on relative slip rate [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (16): 112-119.
- [8] 汪旭东,夏涛,许孝卓,等.永磁同步直线电机的粒子群PID空间矢量控制[J].电子测量与仪器学报,2015,29(5):655-661.
WANG X D, XIA T, XU X ZH, et al. Particle swarm PID space vector control of permanent magnet synchronous linear motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (5): 655-661.
- [9] 目云奎,李祥飞,陈玄.自适应高阶滑模永磁同步电机永磁磁链观测[J].电子测量与仪器学报,2020,34(3):163-170.
MU Y K, LI X F, CHEN X. Permanent magnet flux linkage observation for PMSM based on adaptive high-order sliding mode [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34 (3): 163-170.

- [10] 王慧丽,杨海忠. 基于系统辨识的车辆动力学建模方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6): 1275-1282.
WANG H L, YANG H ZH. Vehicle dynamics modeling method based on system identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (6): 1275-1282.
- [11] HAN J Q. From PID technology to “active disturbance rejection control” technology [J]. Control Engineering, 2002(3): 13-18.
- [12] GAO D W, MI C, EMADI A. Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(4): 729-745.
- [13] RAJAMANI R, PIYABONGKARN D N. New paradigms for the integration of yaw stability and rollover prevention functions in vehicle stability control [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 249-261.
- [14] ZHANG X, GOHLICH D, LI J. Energy-efficient torque allocation design of traction and regenerative braking for distributed drive electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017: 1-1.
- [15] 杨福广,李贻斌,阮久宏,等. 独立电驱动车辆车轮驱动防滑自抗扰控制 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13(5): 739-743.
YANG F G, LI Y B, RUAN J H, et al. Wheel drive anti-skid auto disturbance control of independent electric vehicle [J]. Journal of Electrical Machinery and Control, 2009, 13 (5): 739-743.
- [16] XIONG H, LIU J, ZHANG R, et al. An accurate vehicle and road condition estimation algorithm for vehicle networking applications [J]. IEEE Access, 2019 (7): 17705-17715.
- [17] 王其东,刘伟,陈无畏,等. 基于路面识别的汽车稳定系统滑模控制 [J]. 汽车工程, 2018, 40 (1): 82-90+106.
WANG Q D, LIU W, CHEN W W, et al. Sliding mode control of vehicle stability system based on road surface identification [J]. Automotive Engineering, 2018, 40 (1): 82-90+106.
- [18] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [19] PU Z, YUAN R, YI J, et al. A class of adaptive extended state observers for nonlinear disturbed systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5858-5869.
- [20] ZHANG D Y, YAO X L, WU Q H, et al. ADRC based control for a class of input time delay systems [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(6): 1210-1220.
- [21] 金辉宇,张瑞青,王雷,等. 线性自抗扰控制参数整定鲁棒性的根轨迹分析 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 1648-1653.
JIN H Y, ZHANG R Q, WANG L, et al. Root locus analysis of parameter setting robustness of linear ADRC [J]. Control Theory and Application, 2018, 35 (11): 1648-1653.
- [22] 徐国卿,骆媛媛,杨影,等. 面向汽车动力学性能测试的新型轮-地模拟负载模型与系统 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 214-223.
XU G Q, LUO Y Y, YANG Y, et al. Novel tire-road simulation load model for vehicle dynamic performance test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 214-223.
- [23] 姚震,崔苗. 电动汽车驱动装置测试仿真系统的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2006(S2): 1460-1462.
YAO ZH, CUI M. Study on test and simulation system of electric vehicle driver [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006(S2): 1460-1462.
- [24] 陈建兵,向青青. 分布式驱动电动汽车 Simulink/Carsim 联合仿真平台的建立 [J]. 机械科学与技术, 2018, 37(10): 1496-1500.
CHEN J B, XIANG Q Q. Establishing simulink/carsim co-simulation platform for distributed drive electric vehicle [J]. Mechanical Science and Technology, 2018, 37 (10): 1496-1500.
- [25] 熊璐,陈晨,冯源. 基于 Carsim/Simulink 联合仿真的分布式驱动电动汽车建模 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(5): 1143-1148+1155.
XIONG L, CHEN CH, FENG Y. Modeling of distributed drive electric vehicle based on co-simulation of carsim/simulink [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(5): 1143-1148+1155.
- [26] 刘昭. 基于 CARSIM 和 MATLAB 的汽车电子稳定系统联合仿真研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
LIU ZH. Co-simulation research of vehicle electronic stability program based on CARSIM and MATLAB [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.

作者简介



姚芳(通信作者),1995年于吉林大学获得学士学位,2001年于河北工业大学获得硕士学位,2004年于河北工业大学获得博士学位,现为河北工业大学教授,主要研究方向为电工装备可靠性、永磁同步电机控制。

E-mail:yaofang@hebut.edu.cn

Yao Fang (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 1995 from Jilin University, received her M. Sc. degree in 2001 and Ph. D. degree in 2004 both from Hebei University of Technology. Now, she is a professor in Hebei University of Technology. Her main research interest includes electrical equipment reliability and permanent magnet synchronous motor control.



赵晓鹏,2018年于河北工业大学获得学士学位,现为河北工业大学硕士研究生,主要研究方向为电动汽车永磁同步电机控制。

E-mail:zhaoxp0706@qq.com

Zhao Xiaopeng received his B. Sc. degree in 2018 from Hebei

University of Technology. Now, he is a master candidate in Hebei University of Technology. His main research direction is permanent magnet synchronous motor control for electric automobile.



吴正斌,2006年于英国佩斯利大学获得博士学位,现为中国科学院大学深圳先进技术研究院院长,研究员,博士生导师,主要研究方向为电动汽车能量转换与优化控制。

E-mail:zb.wu@siat.ac.cn

Wu Zhengbin received his Ph. D. degree in 2006 from Paisley University, UK. Now, he is the president, a research fellow and doctoral supervisor in Shenzhen Advanced Technology Research Institute, University of Chinese Academy of Sciences. His main research direction is energy conversion and optimal control of electric automobile.