

DOI: 10.3901/JME.2022.08.236

匹配机械弹性车轮的分布式驱动电动汽车 稳定性控制*

林 棻¹ 蔡亦璋¹ 赵又群¹ 臧利国² 王少博¹

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院 南京 210016;

2. 南京工程学院汽车与轨道交通学院 南京 211167)

摘要: 车辆的稳定性一直是车辆安全研究的重要问题, 车辆在紧急变道或者避障等极端工况下非常容易失去稳定性。首先, 根据车轮刷子理论, 建立匹配机械弹性车轮(Mechanical elastic wheel, MEW)的纵向和侧偏力学模型。接着, 为了深入研究装备 MEW 的分布式驱动电动汽车的横向稳定性, 提出一种分层控制结构。为了提高滑模控制器的鲁棒性, 上层控制器采用积分联合终端的滑模控制器, 通过获得期望的横摆力矩来提高车辆的横向稳定性。在下层控制器中根据采用全轮纵向力轴载比例分配模式, 以前、后轴载估计值为比例分配各轴总的驱动力与横摆力矩。建立匹配 MEW 的车辆动力学模型, 通过 Carsim 和 Matlab/Simulink 联合仿真对分层控制结构进行了多种复杂工况下的验证。仿真结果表明, 提出的控制算法能够有效地提升装备 MEW 车辆的横向稳定性。

关键词: 机械弹性车轮; 分布式驱动电动汽车; 滑模控制; 横向稳定性; 力矩分配

中图分类号: U461

Lateral Stability Control of Distributed Drive Electric Vehicle with Mechanical Elastic Wheel

LIN Fen¹ CAI Yizhang¹ ZHAO Youqun¹ ZANG Ligu² WANG Shaobo¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016;

2. School of Automobile and Rail Transportation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167)

Abstract: The stability of the vehicle has always been an important issue in vehicle safety research. Vehicle instability usually occurs under extreme conditions such as emergency lane change or obstacle avoidance. Firstly, according to the wheel brush model, a mechanical model of longitudinal and lateral of the mechanical elastic wheel(MEW) is established. Then, in order to ensure the lateral stability of the distributed drive electric vehicle(DDEV) equipped with MEW, an integrated framework is proposed. In order to improve the robustness of the sliding mode controller, a sliding mode controller combines integral and terminal terms is designed at the upper-level controller. The sliding mode controller can improve the lateral stability of the vehicle by obtaining the desired yaw moment. At the lower-level controller, the longitudinal force axial load proportional distribution strategy is used to distribute the torque and the yaw moment. Vehicle dynamic model with MEW brush model is established. The controller framework is verified by Carsim and Matlab/Simulink under emergency simulation conditions. The simulation results show that the controller framework can improve the lateral stability of DDEV with MEW effectively.

Key words: mechanical elastic wheel; distributed drive electric vehicle; sliding mode control; lateral stability; torque distribution

0 前言

轮胎的安全性是车辆安全研究的重要课题, 当

车辆在高速行驶发生爆胎时, 乘员的死亡率相当高。因此, 一种新型安全轮胎的^[1]提出即为迫切。本课题组提出的 MEW^[2-6]由于采用非充气式结构, 不会发生爆胎的危险。分布式驱动电动汽车^[7]作为电动化方向发展的一个重要分支, 其各驱动轮转矩独立可控, 这为车辆底盘动力学控制带来了巨大优势。

* 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NS2020016)。20210425 收到初稿, 20210820 收到修改稿

分布式驱动电动汽车驱动控制技术研究, 有助于充分发挥分布式驱动电动汽车转矩独立控制的优势, 提高整车的稳定性、安全性和平顺性。因此, 在该背景下, 把 MEW 装配在分布式驱动电动车上, 则更加提高车辆的安全性, 是该领域的一个重要尝试。

直接横摆力矩控制(Direct yaw moment control, DYC)是目前该领域的一个重要控制策略^[8], DYC 主要是分层控制, 上层通过设计横向稳定控制器获得附加的横摆力矩, 下层通过设计力矩分配算法, 合理地将四个力矩分配给 车辆。

近年来, 学者对横向稳定控制器已经进行了大量的研究, 主要有 PID 控制^[9-11], LQR 控制^[12-13]和滑模控制^[14-15]等。文献[9]分别基于传统 PID 和模糊 PID 设计了横向稳定性控制器, 模糊 PID 对质心侧偏角的抑制有着较大的提升。文献[10]的横向稳定控制器的设计基于神经网络算法。文献[11]设计了一种粒子群改进神经网络 PID 的横摆角速度控制算法。LQR 控制是一种比较常见最优控制算法, 文献[12]采用了基本的 LQR 控制实现了车辆的稳定性控制, 文献[13]引入了权重系数来描述稳定性控制对汽车质心侧偏角误差重视的权重。滑模控制由于设计简单, 被广泛运用于横向稳定性控制器的设计当中。文献[14]在滑模面的设计中考虑了驾驶员期望的横摆角速度。文献[14]采用了终端滑模控制, 比传统的滑模控制有着更好的效果。

下层力矩分配算法也有着较多的研究, 文献[16]通过广义逆法和数学规划法相结合的方法把附加横摆力矩分配到驱动轮胎上。文献[17]提出了基于稳定性优先的原则进行扭矩分配。文献[11]在保证滑移率的基础上, 研究了针对转向工况的最优力矩分配算法, 得到最适合分布式电动汽车转向时的各轮驱动力矩。文献[18]下层力矩分配算法, 分为稳定性控制模式、最小能耗控制模式和联合控制模式, 采用伪逆优化算法对各车轮的驱动力矩进行优化分配。

本文建立了匹配 MEW 的 Carsim 模型, 上层设计了积分项联合终端项的滑模控制器, 下层采用全轮纵向力轴载比例分配力矩来完成整个控制算法的搭建。最后验证算法的可行性和正确性, 使分布式驱动电动汽车可以达到期望要求。

1 车辆动力学模型

1.1 二自由度车辆模型

对车辆进行动力学描述时, 需要建立动力学模

型, 在此基础上制定车辆稳定性控制目标。二自由度车辆模型对装备 MEW 的分布式独立驱动电动汽车的动力学描述较为精确, 因此采用如图 1 所示的动力学模型作为运动跟踪控制层的参考模型。

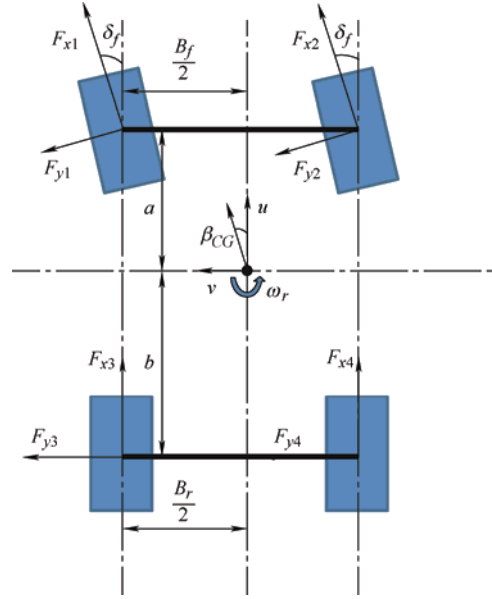


图 1 二自由度车辆模型

考虑侧向运动时, 有

$$mu \left(\dot{\beta} + \omega_r \right) = (F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta_f + (F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta_f + F_{y3} + F_{y4} \quad (1)$$

考虑横摆运动时, 有

$$I_z \dot{\omega}_r = [(F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta_f + (F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta_f] a - (F_{y3} + F_{y4}) b + M_z \quad (2)$$

由于一般情况下转向角 δ_f 很小, 因此 $\sin \delta_f \approx 0$, 式(1)和式(2)可以化简为

$$mu \left(\dot{\beta} + \omega_r \right) = (F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta_f + F_{y3} + F_{y4} \quad (3)$$

$$I_z \dot{\omega}_r = [(F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta_f] a - (F_{y3} + F_{y4}) b + M_z \quad (4)$$

车辆在正常行驶时, 侧向加速度一般不超过 $0.4g$, 侧偏角不超过 $4^\circ \sim 5^\circ$, 可以认为侧偏角与侧偏力成线性关系, 因此有

$$F_{y1} = F_{y2} = C_1 \alpha_1 \quad (5)$$

$$F_{y3} = F_{y4} = C_2 \alpha_2 \quad (6)$$

式中, C_1 和 C_2 分别是前后车轮的实际侧偏刚度; α_1 和 α_2 分别是前后车轮的侧偏角。

轮胎的侧偏刚度主要受轮胎垂向载荷和轮胎与

路面间附着系数的影响,机械弹性车轮侧偏刚度的估计可描述如下

$$C_1 = \mu C_{f0} \frac{F_{z1}}{2F_{f0}} \quad (7)$$

$$C_2 = \mu C_{r0} \frac{F_{z2}}{2F_{r0}} \quad (8)$$

式中, μ 为轮胎与路面间的附着系数, C_{f0} 和 C_{r0} 分别为前后轴的标称侧偏刚度, F_{f0} 和 F_{r0} 分别为前后轴的标称垂向载荷。

当车辆在加减速时,垂直载荷会被重新分配,有

$$F_{z1} = \frac{bmg - hma_x}{l} \quad (9)$$

$$F_{z2} = \frac{amg + hma_x}{l} \quad (10)$$

式中, a_x 为车辆的纵向加速度; l 为车辆的轴距即 $a + b$; g 为重力加速度。

前、后轮的侧偏角

$$\alpha_1 = \delta_f - \left(\beta + \frac{a\omega_r}{u} \right) \quad (11)$$

$$\alpha_2 = \frac{b\omega_r}{u} - \beta \quad (12)$$

横摆角速度的理想值

$$\omega_{rd1} = \frac{u/l}{1 + Ku^2} \delta_f \quad (13)$$

式中, $K = \frac{m}{2l^2} \left(\frac{b}{C_1} - \frac{a}{C_2} \right)$ 。

由于车辆在行驶时受到路面附着条件的限制,其侧向加速度 a_y 应受到如下约束

$$|a_y| \leq \mu g \quad (14)$$

当车辆的质心侧偏角很小的时候有

$$a_y \approx u\omega_r \quad (15)$$

联立式(12)、(13),有^[19]

$$\omega_{rd2} \leq 0.85 \times \left| \frac{\mu g}{u} \right| \quad (16)$$

结合式(11)和(14),期望的横摆角速度

$$\omega_{rd} = \min \left\{ |\omega_{rd1}|, 0.85 \times \left| \frac{\mu g}{u} \right| \right\} \cdot \text{sgn}(\delta_f) \quad (17)$$

期望的质心侧偏角可由式(16)得到

$$\beta_d = \frac{C_2 bl + mau^2}{C_2 l^2 (1 + Ku^2)} \delta_f \quad (18)$$

实际上,大多数研究期望质心侧偏角为 0,因此本文的期望质心侧偏角设置为 0。

将式(5)、(6)、(9)和(10)代入式(3)、(4)中,可以得到整理后的二自由度汽车运动微分方程式为

$$mu \left(\dot{\beta} + \omega_r \right) = 2C_1 \delta_f \cos \delta_f - 2\beta (C_1 \cos \delta_f + C_2) + \frac{2l_2 C_2 - 2l_1 C_1 \cos \delta_f}{u} \omega_r \quad (19)$$

$$I_z \dot{\omega}_r = - \frac{2(l_1^2 C_1 \cos \delta_f + l_2^2 C_2)}{u} \omega_r + 2l_1 C_1 \delta_f \cos \delta_f - 2\beta (l_1 C_1 \cos \delta_f - l_2 C_2) + M_z \quad (20)$$

1.2 机械弹性车轮刷子模型

机械弹性车轮是一种新型的非充气式安全轮胎,其结构组成如图 2 所示。

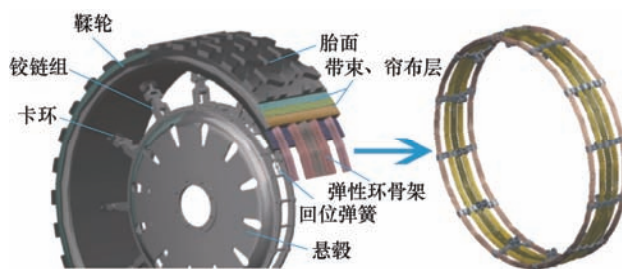


图 2 机械弹性车轮结构示意图

机械弹性车轮主要由橡胶轮、铰链组和悬架组成。外层的橡胶轮还包括弹性钢丝、橡胶层和卡环。采用该非充气式结构的轮胎可以克服传统充气轮胎的漏气、胎压不稳甚至爆胎等潜在的不足和危险。

刷子模型建模机理简单且表达轮胎力学特性好,在 MEW 的应用中,将悬架简化为刚性圆环,将弹性部件简化为连接在圆环上的弹性刷毛,刷毛与路面接触承受纵向力、侧向力和垂向力。不考虑胎宽影响,将所有变形集中到接触面的中分线上。本课题组在前期已经对 MEW 的力学特性进行了大量的研究,参考文献[2]可知 MEW 的刷子模型公式。

纵向力刷子模型可由式(19)得到

$$F_x = \frac{1}{3} \mu \lambda_c d^2 (3l_p - d) + \frac{1}{2} \mu \lambda_c d (2l_p - d)^2 \quad (21)$$

式中, F_x 为车轮的纵向力; $\lambda_c = \frac{3F_z}{4l_p^3}$, 其中 F_z 是垂直载荷, l_p 是轮胎接地印记的长度; d 为接地印记附着区域的长度。

侧向力刷子模型可由式(20)得到

$$F_y = \mu F_z \theta_y (3 \tan \alpha - 3\theta_y \tan^2 \alpha + \theta_y^2 \tan^3 \alpha) \quad (22)$$

式中, F_y 是车轮的侧向力; $\theta_y = \frac{2c_{ey} l_p^2}{3\mu F_z}$, 其中 c_{ey} 是车轮的侧向分布刚度; α 是车轮的侧偏角。

选取某型 MEW 的力学试验数据作为轮胎模型的参数,利用二次多项式拟合方法,得到车轮接地印迹半长和侧向分布刚度随着垂向载荷的变化关

系, 分别为

$$l_p = a_1 F_z^2 + a_2 F_z + a_3 \quad (23)$$

$$c_{ey} = b_1 F_z^2 + b_2 F_z + b_3 \quad (24)$$

MEW 力学模型拟合参数如表 1 所示。

表 1 MEW 力学模型拟合参数

a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
-0.040	3.390	49.890	-0.016	0.490	3.590

2 稳定性控制策略

本文设计了如图 3 所示的分层控制结构。二自由度车辆模型通过期望的车速 u_d 和前轮转向角 δ_f , 获得期望的质心侧偏角 β_d 和期望的横摆角速度 ω_{rd} 。在上层控制器中, 设计了滑模控制器。滑模控制器通过质心侧偏角的误差 $e(\beta) = \beta - \beta_d$ 和横摆角速度的误差 $e(\omega) = \omega_r - \omega_{rd}$ 来获得横摆力矩 M_z 。 β 、 ω_r 和实际车速 u 来自于 Carsim 的输出。在下层控制器中, 采用全轮纵向力轴载比例分配模式, 以前、后轴载估计值为比例分配各轴总的驱动力与横摆力矩。最后将计算出的驱动力矩输出给力矩分配模块, 并传递给 Carsim。

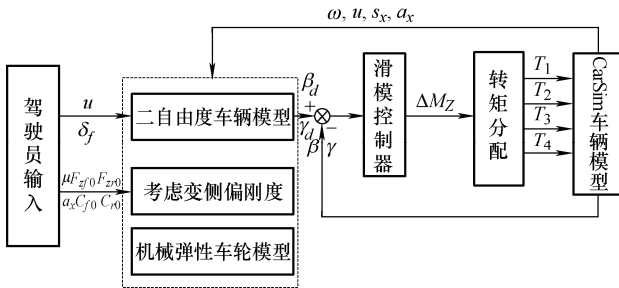


图 3 整体控制框架

2.1 上层控制器设计

滑模面的设计是滑模控制策略设计的关键, 滑模面设计的准确与否影响着系统的控制效果。综合考虑本文装备机械弹性车轮的分布式驱动电动汽车的横向稳定性控制, 本文选取结合了积分和终端项的滑模面。该滑模面的前面为积分项, 可以解决外部扰动带来的干扰, 有效地提高控制系统的鲁棒性, 后面为指数形式的终端项, 使系统能够收敛。为了使实际的横摆角速度和质心侧偏角能够很好地跟随横摆角速度和质心侧偏角的理想值, 则滑模面方程为

$$s = e + \int_0^t k_1 e + k_2 |e|^{k_3} dt \quad (25)$$

式中, e 为横摆角速度和质心侧偏角的误差。

$$e = \omega_r - \omega_{rd} + k_4 (\beta - \beta_d) \quad (26)$$

式中, k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 可以根据经验获得。

根据式(23)有

$$\dot{s} = \dot{\omega}_r - \dot{\omega}_{rd} + k_4 (\dot{\beta} - \dot{\beta}_d) + k_1 e + k_2 |e|^{k_3} \quad (27)$$

将式(17)、(18)代入式(25)中, 有

$$\begin{aligned} \dot{s} = & -\frac{2(a^2 C_1 \cos \delta_f + b^2 C_2)}{I_z u_d} \omega_r + \\ & \frac{2a C_1 \delta_f \cos \delta_f - 2\beta(a C_1 \cos \delta_f - b C_2) + M_z}{I_z} + \\ & k_4 \left[\frac{2C_1 \delta_f \cos \delta_f - 2\beta(C_1 \cos \delta_f + C_2)}{mu_d} + \right. \\ & \left. \frac{2b C_2 - 2a C_1 \cos \delta_f}{mu_d^2} \omega_r - \omega_r - \dot{\beta}_d \right] - \\ & \dot{\omega}_{rd} + k_1 e + k_2 |e|^{k_3} \end{aligned} \quad (28)$$

滑模趋近律的设计合理与否对滑模控制器的控制效果也有极大的影响, 滑模趋近律的作用就是控制切换函数取值趋向于零的速度。趋近律直接关系到滑模变结构控制器的性能好坏, 如果趋近律的值太小的话, 将会导致切换函数值趋近于零速度减慢, 从而系统达到稳态所需的时间将会变长; 如果趋近律的值太大, 切换函数值趋近于零速度太快, 会在零值附近振荡, 就会导致滑模控制的抖振变强。

本文采用如式(27)的趋近律, 在传统的等速趋近律的基础上加上一项, 这样就有效地解决了收敛速度不变的问题, 并且也缓解了系统的抖振。

$$\dot{s} = -k_5 s - k_6 \operatorname{sgn}(s) \quad (29)$$

因此, 直接横摆力矩控制律为

$$\begin{aligned} M_z = & \frac{2(a^2 C_1 \cos \delta_f + b^2 C_2)}{u_d} \omega_r - 2a C_1 \delta_f \cos \delta_f + \\ & 2\beta(a C_1 \cos \delta_f - b C_2) + \\ & I_z k_4 \left(\frac{2\beta(C_1 \cos \delta_f + C_2) - 2C_1 \delta_f \cos \delta_f}{mu_d} - \right. \\ & \left. \frac{2b C_2 - 2a C_1 \cos \delta_f}{mu_d^2} \omega_r + \omega_r + \dot{\beta}_d \right) + \\ & I_z (\dot{\omega}_{rd} - k_1 e - k_2 |e|^{k_3} - k_5 s - k_6 \operatorname{sgn}(s)) \end{aligned} \quad (30)$$

本文采用边界层发削弱抖振影响, 在零值附近设置一个较薄的边界层, 在边界层内以连续的饱和函数 $\operatorname{sat}(s)$ 来替代传统的符号函数 $\operatorname{sgn}(s)$

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(s/\kappa) & |s/\kappa| > 1 \\ s/\kappa & |s/\kappa| \leq 1 \end{cases} \quad (31)$$

为了对控制器进行稳定性分析, 首先需要建立

李雅普诺夫函数(Lyapunov), 其表达式为

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (32)$$

从式(30)可以发现 $V \geq 0$ 恒成立。

对式(30)求导可得 V 的变化率

$$\dot{V} = S \dot{S} = S(-k_5 s - k_6 \text{sat}(s)) \quad (33)$$

由于 k_5 和 k_6 皆大于 0, 所以当 $S \neq 0$ 时, $\dot{V} < 0$, 因此函数 $V(t)$ 是减函数, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $S \rightarrow 0$, 切换函数 $S=0$ 是渐进可达到的, 所以该控制系统是稳定的。

2.2 下层控制器设计

下层控制器中, 采用全轮纵向力轴载比例分配模式, 以前、后轴载估计值为比例分配各轴总的驱动力与横摆力矩。汽车行驶过程中需要满足附加横摆力矩和整体纵向加速度的要求, 因此有

$$F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} = m a_x \quad (34)$$

$$(F_{x2} - F_{x1}) \frac{B_f}{2} + (F_{x4} - F_{x3}) \frac{B_r}{2} = M_z \quad (35)$$

式中, F_{x1} 、 F_{x2} 、 F_{x3} 、 F_{x4} 分别为左前轮, 右前轮, 左后轮, 右后轮驱动力; B_f 和 B_r 为前后轮距; a_x 为纵向加速度。

由式(7)、(8)可知当车辆在加减速时, 垂直载荷会被重新分配。

各车轮还满足

$$\frac{F_{x1} + F_{x2}}{F_{z1}} = \frac{F_{x3} + F_{x4}}{F_{z2}} \quad (36)$$

$$\frac{F_{x2} - F_{x1}}{F_{z1}} = \frac{F_{x4} - F_{x3}}{F_{z2}} \quad (37)$$

基于以上, 可得

$$\begin{cases} T_1 = \frac{gb - a_x h}{2gl} \left(T_d - \frac{2M_z r_w}{B_f} \right) \\ T_2 = \frac{gb - a_x h}{2gl} \left(T_d + \frac{2M_z r_w}{B_f} \right) \\ T_3 = \frac{a_x h + ga}{2gl} \left(T_d - \frac{2M_z r_w}{B_r} \right) \\ T_4 = \frac{a_x h + ga}{2gl} \left(T_d + \frac{2M_z r_w}{B_r} \right) \end{cases} \quad (38)$$

式中, $T_d = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 = (F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4}) r_w$ 。

3 仿真分析

为了验证本文所提出的分层控制结构的合理性, 本节利用 Carsim/Simulink 进行联合仿真, 仿真采用给定的前轮转角输入, 仿真所用的车型为装备机械弹性车轮的越野车, 仿真时长设置为 12 s, 仿真了两种不同的工况, 分别为 $\mu=0.8$, 即沥青或混凝土的干路面, 和 $\mu=0.4$ 的沥青湿路面, 仿真车速皆为 80 km/h 的固定车速。车辆参数如表 2 所示, 双移线的前轮转角输入如图 4 所示。

表 2 车辆的主要参数

参数	数值
总质量 m/kg	3 450
质心到前、后轴的距离 $a, b/\text{m}$	1.52, 1.83
质心到地面的距离 h/m	1.035
车轮滚动半径 r_w/m	0.465
轮距 $B_f, B_r/\text{m}$	1.82
前、后轮侧偏刚度 $C_1, C_2/(\text{N/rad})$	63 025, 57 295
横摆转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	5 757

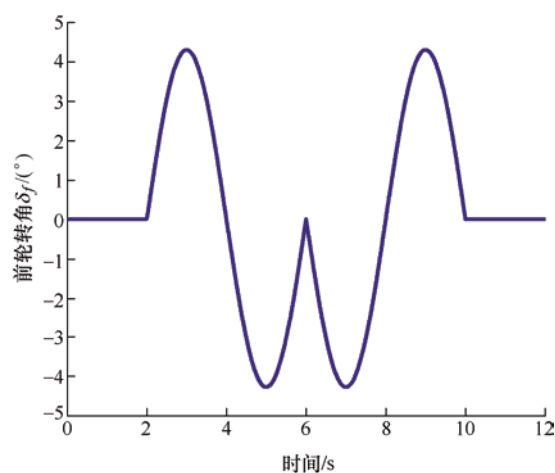


图 4 前轮转角输入曲线

3.1 附着系数为 0.4 的仿真分析

该仿真工况下, 附着系数设置为 0.4。采用如图 4 所示的双移线转角输入进行仿真分析。

图 5 是附着系数为 0.4 的工况下双移线的横摆角速度仿真结果图。从图中可以看出, 用本文设计的滑模控制器得出的横摆角速度可以很好地跟踪上横摆角速度的期望值, 且横摆角速度的峰值仅为 0.174 rad/s。而 PID 控制器得出的横摆角速度在车辆转向期间会发生振荡, 影响了车辆在高速行驶时的稳定性, 且横摆角速度的极值略高于滑模控制器的值。

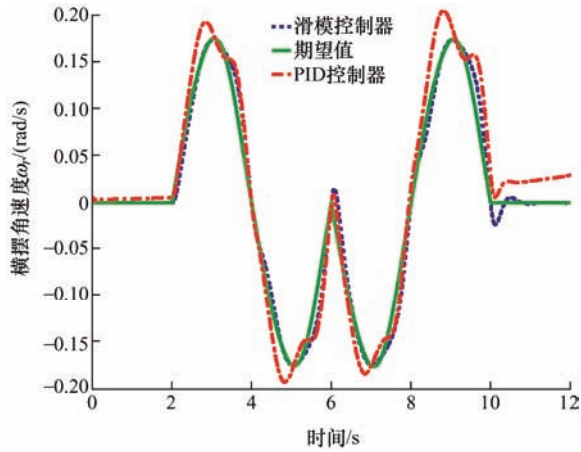


图 5 附着系数为 0.4 的横摆角速度曲线

图 6 是附着系数为 0.4 的工况下双移线的质心侧偏角仿真结果图。从图中可以看出，滑模控制器的控制效果依然好于 PID 控制器，滑模控制器质心侧偏角的峰值是 0.026 rad，数值较小，车辆处于稳定状态。

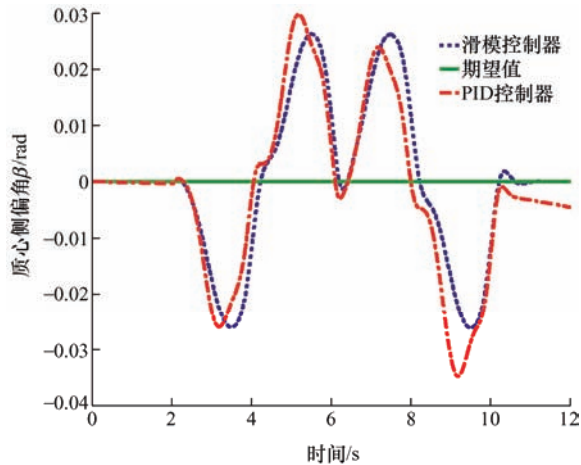


图 6 附着系数为 0.4 的质心侧偏角曲线

3.2 附着系数为 0.8 的仿真分析

该仿真工况下，附着系数设置为 0.8。采用如图 4 的双移线转角输入进行仿真分析。

从图 7 可以看出，在高附着系数的工况下，PID 控制器难以获得较为理想的横摆角速度值。本文设计的滑模控制器可以较好地跟踪横摆角速度的理想值，横摆角速度的极值为 0.144 rad/s，其数值低于附着系数为 0.4 的工况，随着附着系数提高，车辆在滑模控制器的作用下能够有较好的稳定性能。

从图 8 可以看出，在高附着系数的工况下，PID 控制器产生的质心侧偏角较大，而滑模控制器产生的质心侧偏角只有 0.014 8 rad 左右，说明车辆在滑模控制器的作用下，稳定性能得到了较好的提升。

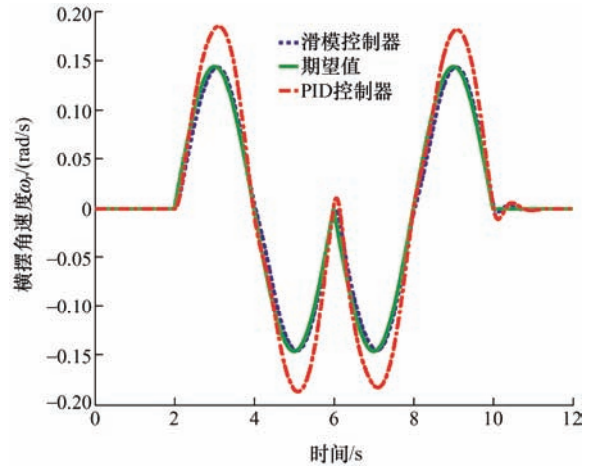


图 7 附着系数为 0.8 的横摆角速度曲线

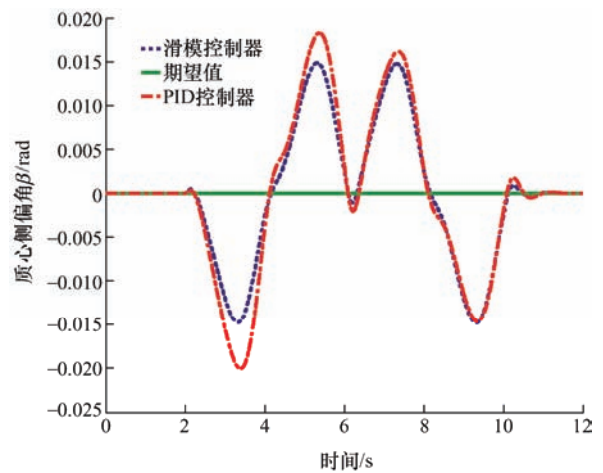


图 8 附着系数为 0.8 的质心侧偏角曲线

4 结论

机械弹性车轮是非充气车轮发展的重要方向，对其进行研究具有重要的理论和实际应用价值。为了提高匹配机械弹性车轮的电动汽车的稳定性，本文提出了一种分层控制框架。基于二自由度车辆模型，提出了一种积分项联合终端项的滑模控制器来获得附加的横摆力矩，滑模控制器采用饱和函数替代符号函数来削弱抖振现象，采用李雅普诺夫函数证明了其稳定性。二自由度车辆模型里考虑了变侧偏刚度的因素。下层控制器采用纵向力轴载比例分配的力矩分配方法。仿真分析采用了给定前轮转角输入的双移线工况，由于我们重点关心的是车辆在高速情况下的行驶稳定性，因此本文仿真了高速时，高附着系数和低附着系数的两种变道工况。仿真结果表明，本文设计的滑模控制器无论是在高附着还是低附着的工况下，都可以很好地跟踪理想的质心侧偏角和横摆角速度，而传统的 PID 控制器在同等

条件下对稳定性的提升远远低于设计的滑模控制器。仿真结果提高了匹配机械弹性车轮车辆的安全性,具有较高的工程意义。

参 考 文 献

- [1] ZANG Ligu, CAI Yizhang, WANG Baosheng, et al. Optimization design of heat dissipation structure of inserts supporting run-flat tire[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(14): 3746-3757.
- [2] 李海青, 赵又群. 匹配机械弹性车轮的汽车稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(1): 71-79.
LI Haiqing, ZHAO Youqun. Stability of vehicles with mechanical elastic wheel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(1): 71-79.
- [3] DU Xianbin, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Numerical and experimental investigation on the camber performance of a non-pneumatic mechanical elastic wheel[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39(9): 3315-3327.
- [4] ZHAO Youqun, ZANG Ligu, CHEN Yueqiao, et al. Non-pneumatic mechanical elastic wheel natural dynamic characteristics and influencing factors[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(5): 1707-1715.
- [5] LI Haiqing, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Integrated yaw and rollover stability control of an off-road vehicle with mechanical elastic wheel[J]. Journal of Vibroengineering, 2019, 21(2): 450-471.
- [6] WANG Qiuwei, ZHAO Youqun, XU Han, et al. Adaptive backstepping control with grey signal predictor for nonlinear active suspension system matching mechanical elastic wheel[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 131: 97-111.
- [7] 徐坤, 骆媛媛, 杨影, 等. 分布式电驱车辆状态感知与控制研究综述[J]. 机械工程学报, 2019, 55(22): 60-79.
XU Kun, LUO Yuanyuan, YANG Ying, et al. Review on state perception and control for distributed drive electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(22): 60-79.
- [8] LIN Fen, ZHANG Yaowen, ZHAO Youqun, et al. Trajectory tracking of autonomous vehicle with the fusion of DYC and longitudinal-lateral control[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32: 16.
- [9] ZHAO Youqun, DENG Huifan, LI Yong, et al. Coordinated control of stability and economy based on torque distribution of distributed drive electric vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, 2019, 234(6): 095440701988042.
- [10] 严运兵, 张振宇, 许小伟, 等. 独立驱动电动汽车神经网络 PID 稳定性控制[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(10): 1598-1605.
YAN Yunbing, ZHANG Zhenyu, XU Xiaowei, et al. PID control of independent drive electric vehicle stability based on neural network[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(10): 1598-1605.
- [11] 郭烈, 葛平淑, 许林娜, 等. 转向工况下的分布式电动汽车稳定性控制[J]. 华南理工大学学报, 2020, 48(3): 100-107.
GUO Lie, GE Pingshu, XU Linna, et al. Stability control for distributed drive electric vehicle under steering condition[J]. Journal of South China University of Technology, 2020, 48(3): 100-107.
- [12] 张缓缓, 李庆望, 彭博, 等. 紧急避障工况下的分布式驱动电动汽车稳定性控制[J]. 汽车技术, 2019(7): 30-35.
ZHANG Huanhuan, LI Qingwang, PENG Bo, et al. Stability control of distributed driving electric vehicle under emergency obstacle avoidance[J]. Automobile Technology, 2019(7): 30-35.
- [13] 丁海涛, 郭孔辉, 陈虹. 汽车稳定性控制中横摆力矩决策的 LQR 方法[J]. 吉林大学学报, 2010, 40(3): 597-601.
DING Haitao, GUO Konghui, CHEN Hong. LQR method for vehicle yaw moment decision in vehicle stability control[J]. Journal of Jilin University, 2010, 40(3): 597-601.
- [14] 张恒, 杨鹏, 张高巍, 等. 基于终端滑模控制的电动汽车转向稳定性研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(3): 134-138, 143.
ZHANG Heng, YANG Peng, ZHANG Gaowei, et al. Research on stability of electric vehicle based on terminal sliding mode control[J]. Computer Simulation, 2020, 37(3): 134-138, 143.
- [15] 张新锋, 朱明, 王奥特. 分布式驱动电动汽车横摆稳定性控制研究[J]. 重庆理工大学学报, 2020, 34(2): 24-31.
ZHANG Xinfeng, ZHU Ming, WANG Aote. Research on yaw stability control of distributed drive electric vehicles[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2020, 34(2): 24-31.
- [16] 韩伟, 熊璐, 侯一萌, 等. 基于线控制动系统的车辆横摆稳定性优化控制[J]. 同济大学学报, 2017, 45(5):

- 732-740.
HAN Wei, XIONG Lu, HOU Yimeng, et al. Vehicle yaw stability control based on brake by wire system[J]. Journal of Tongji University, 2017, 45(5): 732-740.
- [17] 熊璐, 李越, 冷搏. 基于运动跟踪的分布式驱动电动汽车操纵稳定性控制[J]. 同济大学学报, 2017, 45(增刊 1): 53-57.
XIONG Lu, LI Yue, LENG Bo. Handling and stability control of distributed drive electric vehicle based on motion tracking[J]. Journal of Tongji University, 2017, 45(Suppl.1): 53-57.
- [18] 陈无畏, 王晓, 谈东奎, 等. 基于最小能耗的电动汽车横摆稳定性灰色预测可拓控制研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(2): 156-167.
CHEN Wuwei, WANG Xiao, TAN Dongkui, et al. Study on the grey predictive extension control of yaw stability of electric vehicle based on the minimum energy consumption[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(2): 156-167.
- [19] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control[M]. New York, USA: Springer-Verlag, 2012.
-
- 作者简介: 林葵, 男, 1980 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学与控制。
E-mail: flin@nuaa.edu.cn
蔡亦璋, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为车辆动力学与控制。
E-mail: hzcyz1996@163.com
赵又群(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学与控制。
E-mail: yqzhao@nuaa.edu.cn
臧利国, 男, 1986 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学与控制。
E-mail: zangliguo@njit.edu.cn
王少博, 男, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为车辆动力学与控制。
E-mail: shaobo@nuaa.edu.cn



(上接第 235 页)

- Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 95-101.
- [13] PEI Lei, LU Rengui, ZHU Chunbo. Relaxation model of the open-circuit voltage for state-of-charge estimation in lithium-ion batteries[J]. IET Electr. Syst. Transp., 2013, 3(4): 112-117.
- [14] 向兆军, 胡凤玲, 罗明华, 等. 基于电池组模型和聚类算法的锂离子电池组 SOC 不一致估计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18): 154-163.
XIANG Zhaojun, HU Fengling, LUO Minghua, et al. Estimation of SOC inconsistencies in lithium-ion battery packs based on battery pack modeling and clustering algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(18): 154-163.
-
- 作者简介: 刘海东, 男, 1997 年出生。主要研究方向为锂离子电池开路电压估计。
E-mail: cr7haidong@163.com
郑岳久(通信作者), 男, 1986 年出生, 副教授。主要研究方向为新能源动力电池管理系统的集成、优化与控制。
E-mail: yuejiu_zheng@163.com