

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208756

改进滑模控制的轮毂驱动桥稳定性研究*

罗 巍^{1,2} 王志福^{1,2} 师庆玉¹ 白金² 王 阳² 卢彦希³(1. 广西科技大学电气电子与计算机科学学院 柳州 545000; 2. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;
3. 广西科技大学机械与汽车工程学院 柳州 545000)

摘要: 轮毂电机驱动可以极大的简化底盘机械结构,提高车辆的控制精度。首先在 Catia 软件中建立了 11 自由度的轮毂驱动车辆模块式模型,然后在 MATLAB/Simulink 环境下设计了改进型滑模控制的分层控制策略,对上下层控制器进行控制策略分析,提出了融合改进的非线性滑模控制方法,该策略不仅提高了鲁棒性和响应速度,还能有较强的抗干扰能力,最后采用实车对改进型滑模-分层控制策略用 J 型工况和蛇形工况进行验证。仿真和试验结果表明采用该策略能够显著提高轮毂驱动桥车辆运动的稳定性和动力传递效率。

关键词: 轮毂电机;动力桥驱动系统;新能源汽车;稳定性运动;分层协调控制

中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

Research on the stability of wheel hub drive axle with improved sliding mode control

Luo Wei^{1,2} Wang Zhifu^{1,2} Shi Qingyu¹ Bai Jin² Wang Yang² Lu Yanxi³(1. School of Electrical, Electronic and Computer Science, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545000, China;
2. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545000, China)

Abstract: The in-wheel motor drive can greatly simplify the chassis mechanical structure and improve the control accuracy of the vehicle. An 11-degree-of-freedom hub-driven vehicle modular model is first established in the Catia software, and then a layered control strategy of the improved sliding mode control is designed in the MATLAB/Simulink environment, and the control strategy of the upper and lower controllers is analyzed. The improved nonlinear sliding mode control method is integrated, which not only improves the robustness and response speed, but also has strong anti-interference ability. The working conditions and the serpentine working conditions are verified. The simulation and test results show that the strategy can significantly improve the stability and power transmission efficiency of the in-wheel drive axle vehicle motion.

Keywords: in-wheel motor; power axle drive system; new energy vehicle; steady motion; hierarchical coordinated control

0 引 言

随着新能源汽车的三电核心技术不断得到突破,发展新能源汽车成为了一项应对“碳中和”国家战略的重要举措。而通过轮毂驱动的新能源汽车不仅简化了传统的集中式车架结构,而且提高了车辆的控制精度和操纵的稳定性。各个车轮的轮毂动力桥都是在合适的范围内对车轮转矩进行任意分配,这样使得横摆力矩控制能力显著增强^[1],因具有模块式结构、机动灵活等优点,所以被广泛应用于民用和军用车辆^[2]。目前对电驱桥性能影响主要是 3 方面,分

别是电驱桥动力传递路径及分配方式、电驱桥结构和电驱桥控制策略^[3]。可以通过全局优化的控制策略来控制四轮电机扭矩分配,虽能达到较好的优化效果,但也因对车辆的模型要求精度高、计算量大难以实施^[4-5]。对于车辆稳定性,可以通过设计 MPC 控制器来达到效果,但同样存在计算步骤繁琐和计算量复杂的问题^[6]。针对计算量大的问题,可以采用将输出等效为二阶非线性常微分方程组并进行降阶处理,虽降低了计算量,但是增大了误差,且需要根据实际选择步长,耗费更多的计算资源^[7]。目前的大多数的研究是将纵向和横向的稳定性分别加以控制,较少

收稿日期:2022-01-03

* 基金项目:国家自然科学基金(51775042)、广西科技大学研究生教育创新计划(GKYC202103)项目资助

考虑纵横向稳定性的联合控制效果^[8]。虽然在不同工况下采用分层控制策略设计观测器能够较好地弥补因车轮导致车辆发生稳定性失控的状态,但不能很好地消除在车辆平稳行驶过程中的抖振现象^[9]。对于车辆的精确建模,可以运用系统辨识来进行模型的建立,并采用试验平台对转弯、制动、牵引、蛇形等不同工况来对策略进行试验验证^[10-11]。针对上述对轮毂驱动桥的影响因素,本文采用建立 11 自由度的车辆模型,首先在 Catia 软件中建立车辆模型,其次并在建立车辆模型基础上采用分层协同控制中融合具有抑制抖振现象产生的改进型非线性滑模控制,最后通过 J 型和蛇形两种工况对控制策略进行试验验证。这样使得在处理非线性不确定情况时可以减少计算量的同时也能增强鲁棒性。

1 轮毂驱动桥系统结构

目前新能源汽车根据驱动方案可以分为以一台电机为主的差速半轴的驱动方案、以电动轮为主的轮边驱动方案、将电机安装在轮毂的轮毂电机驱动方案 3 大类^[12]。由于轮毂电机驱动方案在简化车辆结构时直接省略了车辆中间的机械传动部件,所以提高了整车的传动效率。由于单独控制的轮毂电机响应速度可以达到毫秒级,因此可以通过控制电机实现精确控制^[13]。对于轮毂驱动桥控制系统,不仅可以提高系统的机械强度和稳定性,还可以提高轮毂单元的整体生产能力,并同时确保轮毂发动机的生产性能和冷却散热满足整车的要求^[14]。轮毂电机驱动结构图及布置简图如图 1 所示。

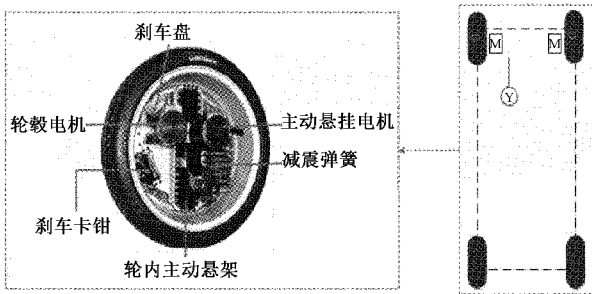


图 1 轮毂电机驱动结构图及布置简图

2 轮毂驱动桥系统模型的建立

当车辆的轮胎进入非线性区域时,若继续使用二自由度车辆模型不能精确地描述车辆的运动状态,可以设计移动模块,根据现实中不同的需求,可以自由组合 4×4、8×8 等多种独立驱动模型。模块化设计简图如图 2 所示。

本文选用 11 自由度的车辆模型,为了考虑模型的准确性,考虑车辆在各个方向的运动。当车辆在实际行驶时,对整个车辆及车辆的轮胎通过运动学理论分解为纵向和横向的运动。针对车辆的受力分析得到动力学方程^[15]。整车动力学模型如图 3 所示。

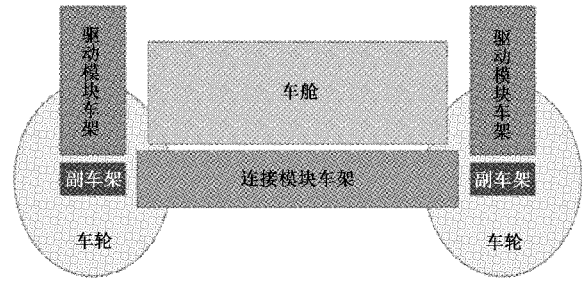


图 2 模块化设计简图

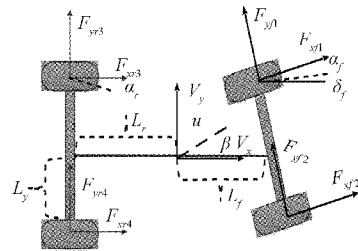


图 3 整车动力学模型

对 11 自由度的车辆进行 x 轴方向的受力分析,得到动力学方程:

$$ma_x = \sum F_x = F_{xf} \cos \delta_f - F_{yf} \sin \delta_f + F_{xr} \quad (1)$$

其中, F_x 是车轮所受纵向力, $a_x = v_x - v_y \eta$ 是车整体的纵向加速度, $F_{xf} = F_{xf1} + F_{xf2}$ 是两个前面轮胎受的纵向力并假定两者是相同的, $F_{xr} = F_{xr1} + F_{xr2}$ 是车辆两个后面轮胎受的纵向力, $\delta_{f1} = \delta_{f2} = \delta_{f3}$ 是车辆两个前面轮胎的转向角。

对 11 自由度的车辆进行 y 轴方向的受力分析,得到动力学方程:

$$ma_y = \sum F_y = F_{yr} + F_{yf} \cos \delta_f + F_{xf} \sin \delta_f \quad (2)$$

对 11 自由度的车辆进行 z 方向的横摆运动,得到动力学方程:

$$I_z \dot{\omega} = \frac{B}{2} (-F_{xf1} \cos \delta_f + F_{xf2} \cos \delta_f + F_{yf1} \sin \delta_f - F_{yf2} \sin \delta_f - F_{xf3} + F_{xf4}) + L_f (F_{xf1} \sin \delta_f + F_{xf2} \sin \delta_f + F_{yf1} \cos \delta_f + F_{yf2} \cos \delta_f) - L_r (F_{yf3} + F_{yf4}) \quad (3)$$

其中, I_z 为车辆绕 z 轴转动的转动惯量, L_i 代表各轴到质心的纵向距离。

任意选择整车中轮胎的一个建立动力学方程:

$$J \omega = T_d - T_b - RF_x \quad (4)$$

其中, J 是每个车轮的转动惯量; T_d 、 T_b 是车轮的驱动力矩和制动力矩; R 是车轮的半径。

通过 Catia 软件对轮毂驱动桥系统进行模型的建立,并通过在 Catia 环境中设计的单组驱动桥扩展成两组驱动桥,进而建立成拥有 4 个车轮的整车模型。用 Catia 软件建立部分模型如图 4 所示。

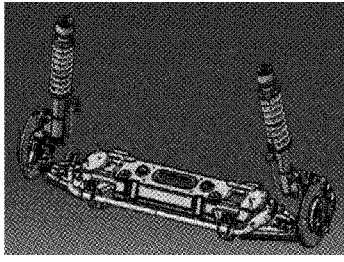


图 4 软件建立部分模型

3 改进型滑模-分层控制

因车辆在行驶过程中出现颠簸导致稳定性差,为了提高车辆在行驶中的稳定性和控制精度,所以采用改进型滑模-分层控制策略来对车辆进行控制,其中分层控制器来控制整车的上层运动,并搭配改进型滑模控制策略,然后经过层层计算与求解,实现对纵向、侧向和横摆运动进行控制,下层控制模块采用最优控制分配方法重点解决约束条件下的轮胎力分配控制。基于改进型滑模-分层控制策略的流程如图 5 所示。

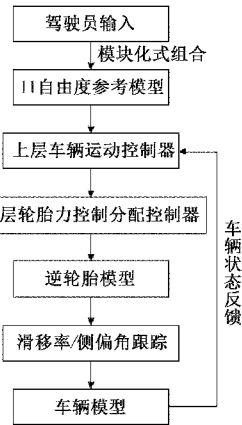


图 5 基于改进型滑模-分层控制策略的流程

基于车辆动力学,3 个运动的微分方程可以表示为:

$$m(\dot{v}_x - v_y \omega_z) = F_{xc} - F_R + \xi_x \quad (5)$$

$$mv_x(\dot{\beta} + \omega_z) = F_{yc} + \xi_y \quad (6)$$

$$I_z \dot{\omega}_z = M_{zc} + \xi_z \quad (7)$$

其中, F_{xc} 、 F_{yc} 及 M_{zc} 为整车全部车轮纵向合力、侧向合力及横摆力矩; ξ_x 、 ξ_y 、 ξ_z 为由于模型简化、外界干扰等造成的不确定项。

$$F_{xc} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 F_{xw_{ij}} \cos \delta_{ij} - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 F_{yw_{ij}} \sin \delta_{ij} \quad (8)$$

$$F_{yc} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 F_{xw_{ij}} \sin \delta_{ij} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 F_{yw_{ij}} \cos \delta_{ij} \quad (9)$$

$$M_{zc} = \frac{B}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 [(-1)^j F_{xw_{ij}} \cos \delta_{ij} + (-1)^{j-1} F_{yw_{ij}} \sin \delta_{ij}] +$$

$$L_f \sum_{j=1}^2 (F_{xw_{1j}} \sin \delta_{1j} + F_{yw_{1j}} \cos \delta_{1j}) - L_r \sum_{j=1}^2 (F_{xw_{2j}} \sin \delta_{2j} + F_{yw_{2j}} \cos \delta_{2j}) \quad (10)$$

其中,车辆参考运动状态纵向车速 v_x 、质心侧偏角 β 以及横摆角速度 ω_z 可以分别通过 F_{xc} 、 F_{yc} 及 M_{zc} 进行跟踪控制,下面进行滑模控制算法设计。为最大程度地实现期望车速、横摆角速度及质心侧偏角跟踪,滑模面均选择为车辆实际状态值与驾驶员期望值之间的偏差,即:

$$s_{v_x} = v_x - v_{xd} \quad (11)$$

$$s_{\omega_z} = \omega_z - \omega_{zd} \quad (12)$$

$$s_{\beta} = \beta - \beta_d \quad (13)$$

实现纵向车速跟踪所需的期望纵向合力:

$$F_{xc} = m[\dot{v}_{xd} - v_y \omega_z - \epsilon_{v_x} \text{sat}(s_{v_x}) - k_{v_x} s_{v_x} + F_R] \quad (14)$$

其中, ϵ 、 k 、 ϕ 为滑模控制参数。

实现横摆角速度跟踪所需的期望横摆力矩:

$$M_{zc} = I_z[\dot{\omega}_{zd} - \epsilon_{\omega_z} \text{sat}(s_{\omega_z}) - k_{\omega_z} s_{\omega_z}] \quad (15)$$

其中, $\epsilon_{\omega_z} > 0$, $k_{\omega_z} > 0$ 。

实现质心侧偏角跟踪所需的期望侧向合力:

$$F_{yc} = mv_x[\omega_z + \dot{\beta}_d - \epsilon_{\beta} \text{sat}(s_{\beta}) - k_{\beta} s_{\beta}] \quad (16)$$

其中, ω_z 代表车辆实际横摆角速度,且 $\epsilon_{\beta} > 0$, $k_{\beta} > 0$ 。

下层控制是通过轮毂电机转矩和制动器转矩来控制轮胎力,进而实现转矩分配控制。上层控制器输出实现驾驶员期望车辆运动所需的广义合力/力矩 $F_v = [F_{xc}, F_{yc}, M_{zc}]^T$ 。广义合力/力矩必须要通过各轮的实际轮胎力进行实现。针对轮胎力分配控制问题,选用最优控制分配方法进行设计。

4 仿真结果分析及试验验证

4.1 仿真结果分析

建立的模型采用基于改进型滑模-分层的驱动桥系统控制,仿真时间都设置为 10 s,分别对车辆在直线工况和转向工况进行仿真验证。其中车辆在 MATLAB/Simulink 中建立仿真模型所需的具体参数如表 1 所示,仿真模型中车辆的转动惯量是依据实车的参数计算得到,车辆在直线工况下的仿真结果如图 6 所示,转向工况下的仿真结果如图 7 所示。

表 1 车辆仿真建模参数

参数	值
满载质量 M/kg	700
满载质心到前轴距离 L_f/mm	1 300
满载质心到后轴距离 L_r/mm	1 000
满载横摆转动惯量 $I_z/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	896
满载侧倾转动惯量 $I_x/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	711
满载俯仰转动惯量 $I_y/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	1 143
车轮总成转动惯量 $I_w/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	15
轮胎滚动阻力系数 f	0.2
轮距 B/mm	913

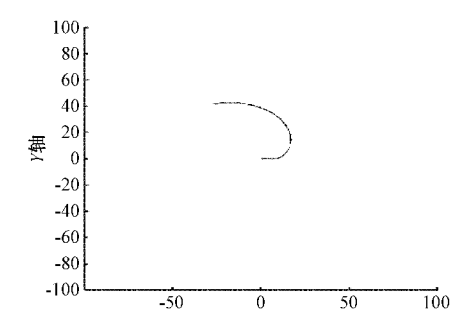
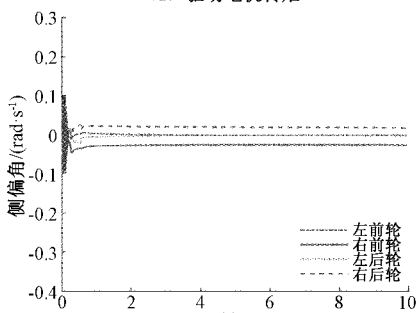
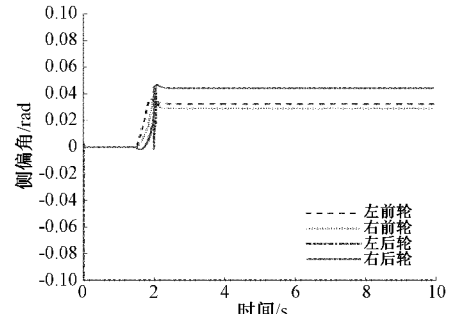
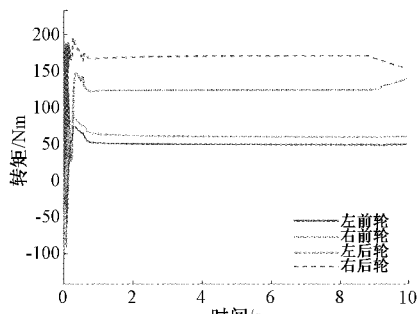
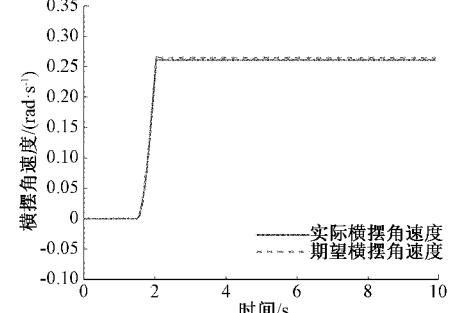
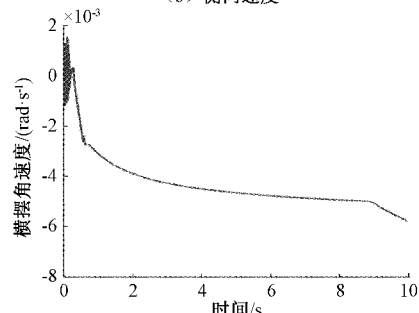
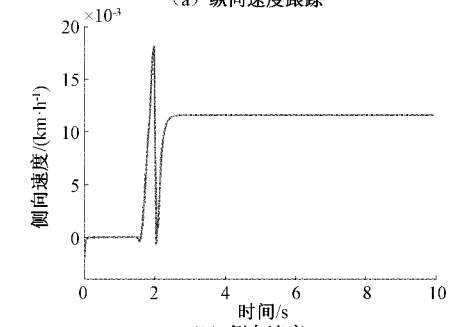
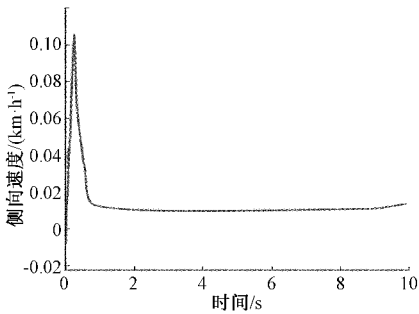
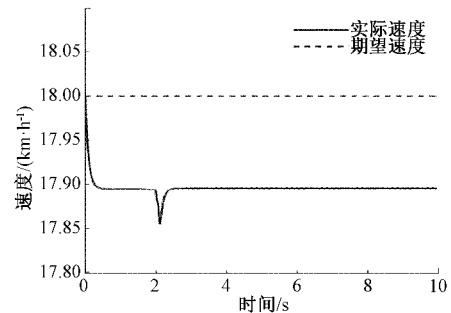
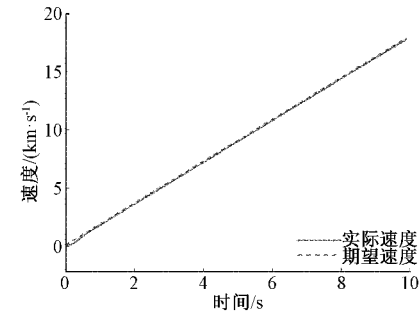


图 6 车辆在直线工况下的仿真图

图 7 车辆在转向工况下的仿真图

从图 6 可以看出,车辆在路面上匀加速直线行驶时,纵向速度从 0 开始到 10 s 时增加到 18 km/h,跟踪效果良好,对于侧向速度在刚开始时增加到了 0.1 km/h,随后降为 0,由于纵向速度从 0 开始增加,导致刚开始时质心侧偏角偏大,但在控制系统作用下很快降为 0,车辆横摆角速度很小,最大值为 -5.8×10^{-3} rad/s,电机转矩比较平稳,各轮侧偏角较小,绝对值均未超过 0.1 rad/s,对车辆的各项参数的控制效果良好,总体上车辆在控制策略作用下对直线工况表现良好。

从图 7 可以看出,车辆在转向工况下,车辆纵向速度跟踪期望车速 18 km/h 误差较小,在 3.5 s 后稳定在 17.9 km/h,横摆角速度控制效果良好,最终稳定在 0.27 rad/s,侧向速度稳定在 0.012 km/h,侧向稳定性良好,各车侧偏角很小,均未超过 0.02,车辆行驶轨迹符合预期,在转向工况下总体上改进型滑模-分层控制效果明显。

4.2 试验验证

选用车辆实物、遥控通信器、雷达通信、VCU 整车控制器、工作电压 3.3~5 V 的 IMU 和 NPOSS220 型号的 GPS 系统通信等搭建验证平台验证设计的控制策略是否具有有效性。验证车辆在 J 型工况下和蛇形工况下的控制策略的控制情况。为了验证策略的有效性,采用如图 8 所示的车辆进行试验测试,测试车辆参数如表 2 所示。

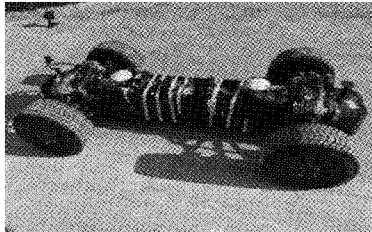


图 8 测试车辆实物图

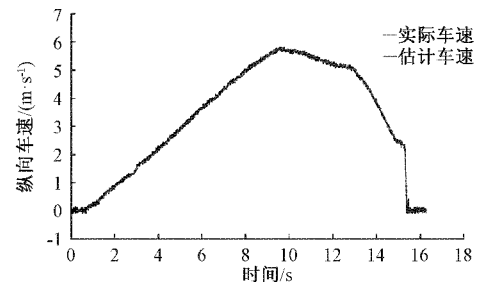
在进行 J 型工况试验时,设置车轮处于附着系数约为 0.8 的良好平坦路面,对 CAN 记录仪和 GPS 接收器采集的数据进行筛选、滤波与对比,得到试验结果。J 型工况下车辆控制策略的验证情况如图 9 所示。

由图 9 可知,车辆纵向速度估计情况较好,GPS 测量的速度曲线与由速度估计算法得到的速度曲线基本重合,在良好平整路面行驶时,整车测量速度与实际速度误差始终小于 10%。当车辆基于操纵稳定性控制算法进行转矩分配时,横摆角速度减小明显,侧向稳定性得到了比较明显地提升,验证了基于改进型滑模-分层控制策略的有效性。

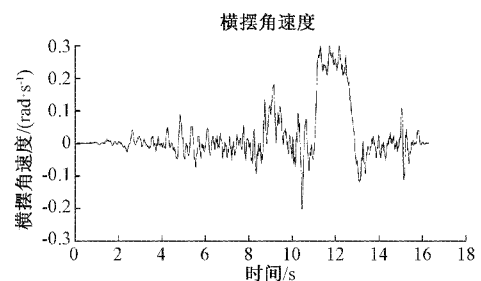
在进行蛇形工况试验验证时以 15 km/h 的车速通过间距为 4 m 的木桩,并且让起始点、入弯点与出弯点保持一致,完成蛇形转弯工况,通过 CAN 记录仪和 GPS 接收器采集的数据进行筛选、滤波,得到试验结果。蛇形工况下车辆控制策略的验证情况如图 10 所示。

表 2 测试车辆参数

外形尺寸	2 100 mm×1 120 mm× 455 mm(长×宽×高)
离地间隙/mm	120
重量及载重量	重量 250 kg,最大载重 300 kg
最大加速度	0.8 g(空载)
功率	额定功率 12 kW
峰值功率/kW	24
最高时速/(km·h ⁻¹)	100
转向类型	全轴转向
驱动形式	独立四驱
总线类型	CAN 总线
车身长度/mm	2 100
车身宽度/mm	1 120
轮距/mm	913
轴距/mm	1 474
轮胎直径/mm	455



(a) 实际车速与估计车速



(b) 横摆角速度

图 9 J 型工况下车辆有无控制策略的验证

在蛇形工况下,当车辆基于操纵稳定性控制策略进行转矩分配时,质心侧偏角极限值在 0.1 rad,侧向稳定性得到了比较明显的提升,验证了基于分层结构的操纵稳定控制策略的有效性。对于车辆在进行蛇形的左转和右转时,通过分层结构的操纵稳定性控制策略的转矩分配后,左右两侧车轮轮速变化趋势相反,轮速差分布均匀。经过上述试验验证了设计的改进型滑模-分层控制策略对车辆的稳定性的改善效果显著。

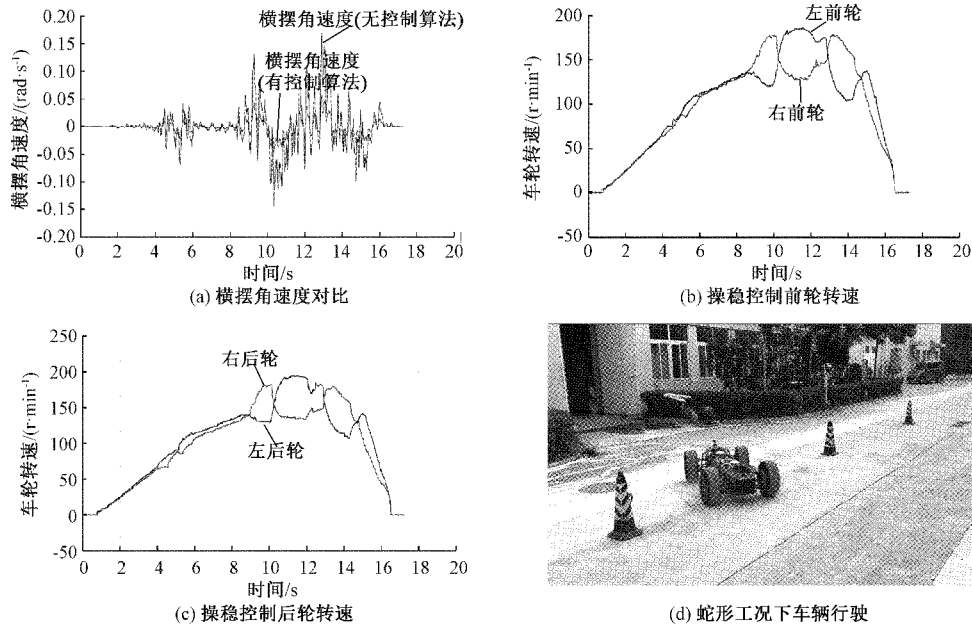


图 10 蛇形工况下车辆有无控制策略的验证

5 结 论

本文选取 11 自由度的车辆进行非线性动力学建模,然后在 MATLAB/Simulink 环境下设计改进型滑模-分层控制策略来有效的控制轮毂驱动桥,并通过直线和转向工况下进行仿真分析和通过 J 型和蛇形工况进行试验验证,结合车辆的行驶状态和 VCU 发送的车辆运动状态验证了本文设计的控制策略具有有效性,使得车辆的稳定性方面得到显著性提高。其中对于整车受到外部干扰时,改进型滑模控制算法能够实时的对车辆进行稳定性控制,并且能最大限度减少执行误差。

参考文献

- [1] 余卓平,冯源,熊璐. 分布式驱动电动汽车动力学控制发展现状综述[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 105-114.
- [2] 王志福,白金,黄康伦,等. 基于模型预测控制的轮毂电机驱动车辆防侧翻控制[J]. 兵工学报, 2021, 42(1): 11-25.
- [3] 王建华,黄剑飞,靳迪. 电驱动桥关键技术综述[J]. 汽车技术, 2021(6): 33-40.
- [4] CHEN Y, WANG J M. Fast and global optimal energy-efficient control allocation with applications to over actuated electric ground vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(5): 1202-1211.
- [5] 邵长江,杨坤,王杰,等. 轮毂电机式三轴纯电动铰接客车辆扭矩优化分配控制策略研究[J/OL]. 机械科学与技术, 2021: 1-10.
- [6] 夏勇生,吴东升,平兰兰. 基于 MPC 的爆胎车辆轨迹控制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6): 154-160.
- [7] 曹萌萌. 汽车驾驶模拟器在环动力学模型解算与仿真[J]. 电子测量技术, 2021, 44(8): 17-22.
- [8] 张丽霞,王亚平,潘福全,等. 轮毂电机驱动汽车纵向和横向稳定性联合控制[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 13-20.
- [9] 岳兴莲,刘军. 分布式驱动电动汽车稳定性控制策略优化设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(5): 154-157.
- [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.
- [11] 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.
- [12] 田春林. 新能源商用车驱动方案及电驱动桥的应用[J]. 汽车制造业, 2020(5): 16-19.
- [13] 廖自力,蔡立春,张新喜. 轮毂电机驱动电动车稳定性横摆力矩控制研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(8): 73-76.
- [14] 柴凤,于雁磊,裴宇龙. 电传动车辆永磁轮毂电机技术现状及展望[J]. 兵工学报, 2021, 42(10): 2060-2074.
- [15] 张云灵. 基于模型预测的分布式驱动电动汽车稳定性控制[D]. 长沙:湖南大学, 2018.

作者简介

罗崑,硕士研究生,主要研究方向为分布式动力学控制、新能源汽车动力电池故障诊断研究等。
E-mail: barry218@163.com

王志福(通信作者),工学博士,副教授,主要研究方向为智能电动车动力学、电机驱动系统控制与测试、多域分布式驱动平台等。

E-mail: wangzhifu@bit.edu.cn