

文章编号:1671-1637(2026)04-0286-17

基于路面识别的分布式电驱动客车自适应滑模驱动防滑控制

杨冰,付锐*,孙秦豫,蒋司杨,王畅

(长安大学汽车学院,陕西西安 710064)

摘要:为解决分布式电驱动客车在低附着路面上起步时驱动轮易发生过度打滑的问题,提出一种基于路面识别和自适应滑模控制(ASMC)的驱动防滑(ASR)控制策略。建立非线性的车辆动力学模型和Dugoff轮胎模型,基于奇异值分解的高阶容积卡尔曼滤波算法设计了路面附着系数估计方法;结合目标车型的轮胎参数,利用TruckSim中的轮胎测试模块对轮胎特性进行测试,确定不同路面下的最佳滑转率,并基于此设计了ASR触发与退出机制;设计了基于ASMC的防滑控制算法,其趋近律中引入了指数自适应增益,能够依据误差大小自适应调整控制力度,加快滑转率跟踪速度并抑制超调;结合采集到的实车起步工况数据设置测试工况,基于MATLAB/Simulink与TruckSim的联合仿真平台,在不同起步工况和载重下对所提出的ASR控制策略的性能进行验证,并与传统模型预测控制(MPC)、一阶滑模控制(FOSMC)和积分滑模控制(ISMC)方法进行了对比。分析结果表明:在4种典型测试工况下,基于ASMC的ASR控制策略使滑转率跟踪的平均绝对误差和均方根误差均为最小值;使客车车速比MPC分别提升30.45%、10.01%、24.55%和13.45%,比FOSMC分别提升5.62%、5.08%、5.38%和6.35%,比ISMC分别提升4.09%、2.74%、3.21%和4.64%。所提出的ASR控制策略能够提升分布式电驱动客车的纵向稳定性和驱动性能,对分布式电驱动客车的扭矩控制系统设计具有重要参考价值。

关键词:汽车工程;分布式电驱动客车;驱动防滑控制;自适应滑模控制;路面附着系数估计;高阶容积卡尔曼滤波

中图分类号:U461.6 文献标志码:A DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.020

Adaptive sliding mode acceleration slip regulation control based on road identification for distributed electric drive buses

YANG Bing, FU Rui*, SUN Qin-yu, JIANG Si-yang, WANG Chang

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To solve the problem of excessive slippage of the driving wheels when distributed electric drive buses start on low-adhesion roads, an acceleration slip regulation (ASR) control strategy based on road identification and adaptive sliding mode control (ASMC) was proposed. A nonlinear vehicle

出版历程:2025-04-07 收稿,2025-06-06 修回,2025-08-25 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52272412);陕西省重点研发计划(2024CY2-GJHX-87);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102224205,300102224501,300102224302)

作者简介:杨冰(1998-),女,河北邢台人,工学博士研究生,E-mail:yangbing_chd@163.com。

*通信作者:付锐(1965-),女,辽宁本溪人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:furui@chd.edu.cn。

引用格式:杨冰,付锐,孙秦豫,等.基于路面识别的分布式电驱动客车自适应滑模驱动防滑控制[J].交通运输工程学报,2026,26(4):286-302.

Citation: YANG Bing, FU Rui, SUN Qin-yu, et al. Adaptive sliding mode acceleration slip regulation control based on road identification for distributed electric drive buses[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(4): 286-302.

dynamics model and a Dugoff tire model were established. A road adhesion coefficient estimation method was designed based on the high-degree cubature Kalman filter algorithm with singular value decomposition. Combined with the tire parameters of the target vehicle model, the tire test module in TruckSim was utilized to test tire characteristics and determine the optimal slip ratios under different road surfaces, based on which an ASR trigger and exit mechanism was designed. An anti-slip control algorithm based on ASMC was designed, into the reaching law of which an exponential adaptive gain was introduced to adaptively adjust the control force according to the error size, accelerate the slip ratio tracking speed, and suppress overshoot. Test maneuvers were set combined with the collected real-vehicle starting data. Based on the joint simulation platform of MATLAB/Simulink and TruckSim, the performance of the proposed ASR control strategy was verified under different starting maneuvers and loads and compared with the traditional model predictive control (MPC), first-order sliding mode control (FOSMC), and integral sliding mode control (ISMC) methods. Analysis results indicate that under four typical test maneuvers, the ASR control strategy based on ASMC minimizes both the average absolute error and root mean square error of slip ratio tracking; it increases the bus speed by 30.45%, 10.01%, 24.55%, and 13.45% compared with MPC, by 5.62%, 5.08%, 5.38%, and 6.35% compared with FOSMC, and by 4.09%, 2.74%, 3.21%, and 4.64% compared with ISMC, respectively. The proposed ASR control strategy can improve the longitudinal stability and driving performance of distributed electric drive buses, providing an important reference for the torque control system design of distributed electric drive buses.

Keywords: automotive engineering; distributed electric drive bus; acceleration slip regulation control; adaptive sliding mode control; road adhesion coefficient estimation; high-degree cubature Kalman filter

Publication history: Received 2025-04-07; Received in revised form 2025-06-06; Accepted 2025-08-25

Funding: National Natural Science Foundation of China (52272412); Key R&D Program of Shaanxi Province (2024CY2-GJHX-87); Fundamental Research Funds for the Central Universities (300102224205, 300102224501, 300102224302)

* **Corresponding author:** FU Rui, professor, PhD, E-mail: furui@chd.edu.cn.

0 引言

近年来,分布式驱动因其结构紧凑、响应快速和智能控制等优势,成为电动客车发展的关键方向^[1]。分布式电驱动客车这一新兴车型取消了传统传动轴和差速器等机械部件,采用独立轮边电机分别驱动2个后轮,简化了客车的机械结构,提升了传动效率和续航能力^[2]。

然而,分布式电驱动客车扭矩输出响应迅速、输出激励强,特别是在低附着路面上起步或加速时,驱动轮容易发生过度滑转,这会影响车辆的稳定性和动力性,严重时会造成车辆甩尾或失控。因此,驱动防滑转系统(Acceleration Slip Regulation, ASR)在此类车辆中尤为重要^[3]。同时,电机独立驱动和精确可控的特性为ASR技术的优化提供了新的技术路径^[4]。

针对分布式驱动系统的ASR技术,现有方法主要分为2类。一类是直接扭矩控制,通过直接计算最优电机扭矩来实现最大牵引力输出,如Hori等^[5-6]提出的模型跟踪控制和最大可传递转矩估计。然而,此类方法无需计算滑转率或识别路面状态,对复杂路况的适应性不足,控制精度受限^[7]。另一类是基于滑转率的控制,该方法通过调节驱动扭矩,使车轮滑转率保持在最佳范围内^[8],以提高驱动性能。部分研究采用固定的最佳滑转率,如Ding等^[9]将其设定为0.15,提出了鲁棒滑模控制器,但该研究没有考虑路面变化引起的最佳滑转率差异。为提高扭矩控制精度,近年来研究者提出了根据路面识别自适应调整最佳滑转率的策略^[10],结合车辆动力学控制,实现对最佳滑转率的动态跟踪控制。然而,此类方法对路面识别的精度和实时性依赖较

高,仍面临复杂工况适应性差等挑战。

路面附着系数估计是实现滑转率自适应控制的关键。主流方法包括基于视觉图像识别^[11]、基于数据的学习估计^[12]和基于模型的估计^[13]。其中,视觉识别方法受光照等环境影响较大,难以精确估计路面附着系数值^[14];数据驱动方法依赖大量训练数据,泛化能力和可靠性有限。相比之下,基于模型的路面附着系数估计器具有低成本、实时性强等优势,并且在激励充分的情况下能够实现较高的估计精度^[15]。基于模型的方法有2种,第1种是基于Burckhardt轮胎模型的相似性匹配法。Kang等^[16]将当前滑移率下的利用附着系数与Burckhardt模型的标准曲线进行相似性匹配,得到行驶道路的峰值附着系数。这种方法计算适用于路面稳定、变化较缓慢的场景。第2种是基于动力学模型和轮胎模型的观测器估计法^[17]。Wang等^[18-19]基于三自由度车辆动力学模型和Dugoff轮胎模型,分别使用了无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)和强跟踪容积卡尔曼滤波算法(Cubature Kalman Filter, CKF)估计路面附着系数。这种基于观测器的估计方法能更好地适应复杂工况,并具备更强的实时性和鲁棒性。因此,从分布式电驱动客车运营成本和实用性的角度来看,基于动力学模型设计收敛快速、鲁棒性强的观测器,更具有实际应用价值。

现有ASR研究的主流控制方法包括滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)^[20]和模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)^[21-22]。Savitski等^[23]指出,SMC具有高鲁棒性和低计算成本等优势,使其更适用于车轮滑移控制。张利鹏等^[24]提出了一种基于滑模极值搜索的ASR控制器,以增强系统的鲁棒性。Li等^[25]针对多轮分布式电驱动车轮,设计了基于SMC的ASR控制策略。MPC能够施加控制增量约束,但对预测模型的精度要求更高。Yuan等^[26-27]分别面向集中式驱动电动车辆和轮边驱动赛车,采用非线性MPC算法设计了防滑控制器。此外,MPC的计算复杂度较高,对车辆硬件的在线计算能力提出了更高的挑战。总体而言,SMC和MPC各具优势,但现有ASR研究大多面向乘用车,针对分布式电驱动客车的控制设计仍相对有限。相比小型车辆,客车的质量和载荷变化显著,同时起步时惯性更大,频繁启停时易打滑且恢复困难,需要考虑控制算法对客车扭矩控制的适应性。此外,客车所用的轮胎具有更大的接地面积、更宽的胎面、更大

的滚动半径以及不同的纵向刚度特性。这些结构性差异不仅影响轮胎与地面的附着力,还直接影响最佳滑转率的设置,进而对ASR控制策略的鲁棒性和实时性提出更高要求。

基于上述研究,本文以4×2的分布式后驱客车为研究对象,提出了一种融合高精度路面附着系数估计与自适应控制的ASR控制策略,以实现精确的扭矩控制。采用基于奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)的高阶容积卡尔曼滤波算法(High-degree Cubature Kalman Filter, HCKF)来估计路面附着系数,提高了路面附着系数的估计精度。利用TruckSim中的轮胎测试模块对客车轮胎特性进行测试,根据路面附着系数估计值自适应调整最佳滑转率,并基于此设计ASR触发与退出机制。基于自适应滑模控制(Adaptive Sliding Mode Control, ASMC)设计ASR控制器,在趋近律中加入自适应增益,可以根据滑转率误差自适应调整控制力度。设置不同路面和载重的仿真工况,验证了所提出控制策略的控制性能和实时性。

1 整车动力学建模

为实现分布式电驱动客车的ASR控制,本节建立了包含车身模型和Dugoff轮胎模型的整车动力学模型,为后续的路面附着系数估计与扭矩控制算法设计提供了物理建模基础。

1.1 车身模型

车辆动力学模型是实现路面附着系数精确估计和驱动扭矩精确控制的前提。在忽略悬架影响的前提下,假设作用在客车车身上的所有外力都来自作用在轮胎上的地面力。建立了如图1所示的七自由度车辆动力学模型,包括纵向、横向、横摆和4个轮胎运动。

纵向动力学公式为

$$\begin{cases} ma_x = \sum_i F_i^x - F_{\text{roll}} - F_{\text{air}} \\ a_x = \dot{v}_x - v_y \gamma \\ \sum_i F_i^x = (F_{\text{n}}^x + F_{\text{r}}^x) \cos(\delta_i) - (F_{\text{n}}^y + F_{\text{r}}^y) \cdot \sin(\delta_i) + F_{\text{n}}^x + F_{\text{r}}^x \\ F_{\text{roll}} = fmg \\ F_{\text{air}} = C_d A \rho v_x^2 / 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为客车质量; v_x 为纵向速度; v_y 为横向速度; a_x 为纵向加速度; δ_i 为前轮转角; γ 为横摆角速度; F_i^x 为轮胎纵向力(i 为车轮位置, i 取fl、fr、rl、rr,分别代

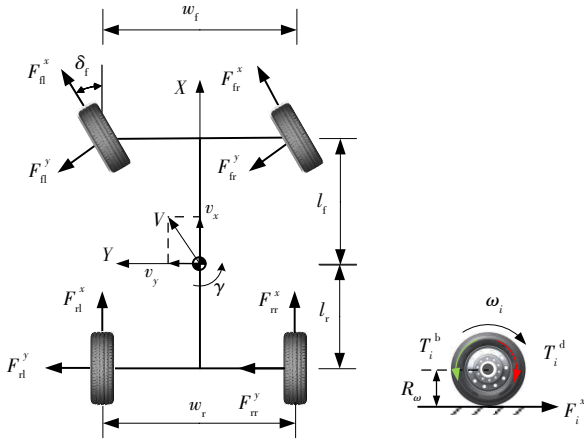


图 1 七自由度车辆动力学模型

Fig. 1 Seven-degree-of-freedom vehicle dynamics model

表左前轮、左后轮、右前轮和右后轮); F_i^y 为轮胎横向力; F_{roll} 为滚动阻力; F_{air} 为空气阻力; f 为滚动阻力系数; g 为重力加速度; C_d 为空气阻力系数; A 为迎风面积; ρ 为空气密度。

横向动力学公式为

$$\begin{cases} ma_y = \sum_i F_i^y \\ a_y = \dot{v}_y + v_x \gamma \\ \sum_i F_i^y = (F_{fl}^x + F_{fr}^x) \sin(\delta_i) + (F_{fl}^y + F_{fr}^y) \cos(\delta_i) + F_{rl}^y + F_{rr}^y \end{cases} \quad (2)$$

式中: a_y 为横向加速度。

横摆动力学公式为

$$I_z \dot{\gamma} = \sum M_z = \left[(F_{fl}^x + F_{fr}^x) \sin(\delta_i) + (F_{fl}^y + F_{fr}^y) \cos(\delta_i) \right] l_f + \left[(F_{rl}^x - F_{rr}^x) \cos(\delta_i) + (F_{rl}^y - F_{rr}^y) \sin(\delta_i) \right] l_r + (w_f/2) - (F_{rl}^y + F_{rr}^y) l_r + (F_{rr}^x - F_{rl}^x) (w_r/2) \quad (3)$$

式中: I_z 为横摆转动惯量; M_z 为客车横摆力矩; l_f 为前轴到质心的距离; l_r 为后轴到质心的距离; w_f 为前轴轮距; w_r 为后轴轮距。

轮胎动力学公式为

$$I_\omega \dot{\omega}_i = T_i^d - F_i^x R_\omega - T_i^b \quad (4)$$

式中: I_ω 为轮胎转动惯量; ω_i 为车轮轮速; T_i^d 为车轮驱动扭矩; T_i^b 为车轮制动扭矩; R_ω 为轮胎滚动半径。

1.2 轮胎模型

为便于实现对路面附着系数的有效估计, 选择 Dugoff 轮胎模型来计算轮胎的纵向力和横向力^[28]。该模型能够反映路面附着系数对轮胎力的影响, 纵向力和横向力模型公式如下

$$F_i^x = \mu_i F_{i0}^x = \mu_i F_i^z C_x \frac{\lambda_i}{1 - \lambda_i} f(L) \quad (5)$$

$$F_i^y = \mu_i F_{i0}^y = \mu_i F_i^z C_y \frac{\tan(\alpha_i)}{1 - \lambda_i} f(L) \quad (6)$$

$$L = \frac{1 - \lambda_i}{2\sqrt{C_x^2 \lambda_i^2 + C_y^2 \tan^2(\alpha_i)}} \quad (7)$$

$$f(L) = \begin{cases} (2 - L)L & L < 1 \\ 1 & L \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: μ_i 为轮胎-路面附着系数; F_{i0}^x 为归一化轮胎纵向力; F_{i0}^y 为归一化轮胎横向力; λ_i 为滑转率; α_i 为车轮侧偏角; C_x 为轮胎纵向刚度; C_y 为轮胎侧向刚度; L 为轮胎滑移过程中的非线性特性参数。

Dugoff 模型表明, 轮胎的纵向刚度 C_x 与侧向刚度 C_y 是影响轮胎力的关键参数。轮胎刚度受多种因素影响, 其中垂直载荷变化的影响最为显著, 且客车在运行过程中轮胎所承受的垂直载荷变化范围较大。为此, 本文基于 TruckSim 中的轮胎数据对不同垂直载荷条件下的刚度参数进行拟合, 结果如表 1 所示。在实际计算中, 刚度值可通过插值法根据实时载荷进行动态估算。

表 1 不同垂直载荷下轮胎的纵向刚度和侧向刚度

Table 1 Longitudinal and lateral stiffness of tires under different vertical loads		
F_z/N	$C_x/(N \cdot m^{-1})$	$C_y/(N \cdot rad^{-1})$
7 357.5	94 925	72 517
14 715.0	183 024	139 820
29 430.0	338 976	258 959
44 145.0	467 856	357 416
58 860.0	576 288	440 252

为验证上述 Dugoff 轮胎模型的计算精度, 在 TruckSim 中设置了一个起步与向左换道的典型工况。该工况下, 客车处于空载状态, 从静止加速至 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 持续时间为 $0 \sim 30 \text{ s}$, 并在第 15 s 向左换道驶入主路, 路面附着系数 $\mu = 0.8$ 。基于所建立的 Dugoff 轮胎模型计算轮胎纵向力与横向力, 并将其结果与 TruckSim 仿真数据进行对比。由于客车采用前轮转向、后轮驱动结构, 以左前轮和右后轮为例, 对比结果如图 2 所示。

结果表明, 在起步初期阶段, 左前轮的纵向力和横向力与仿真数据之间存在一定误差, 主要原因是该阶段轮胎滑转率变化较快, 模型对瞬态工况响应的精度有限。相比之下, 作为驱动轮的右后轮, 其轮胎力计算结果更加准确。总体而言, Dugoff 模型在纵向力和横向力的拟合方面均具有较高精度, 能够较为准确地反映轮胎受力的动态变化特性。

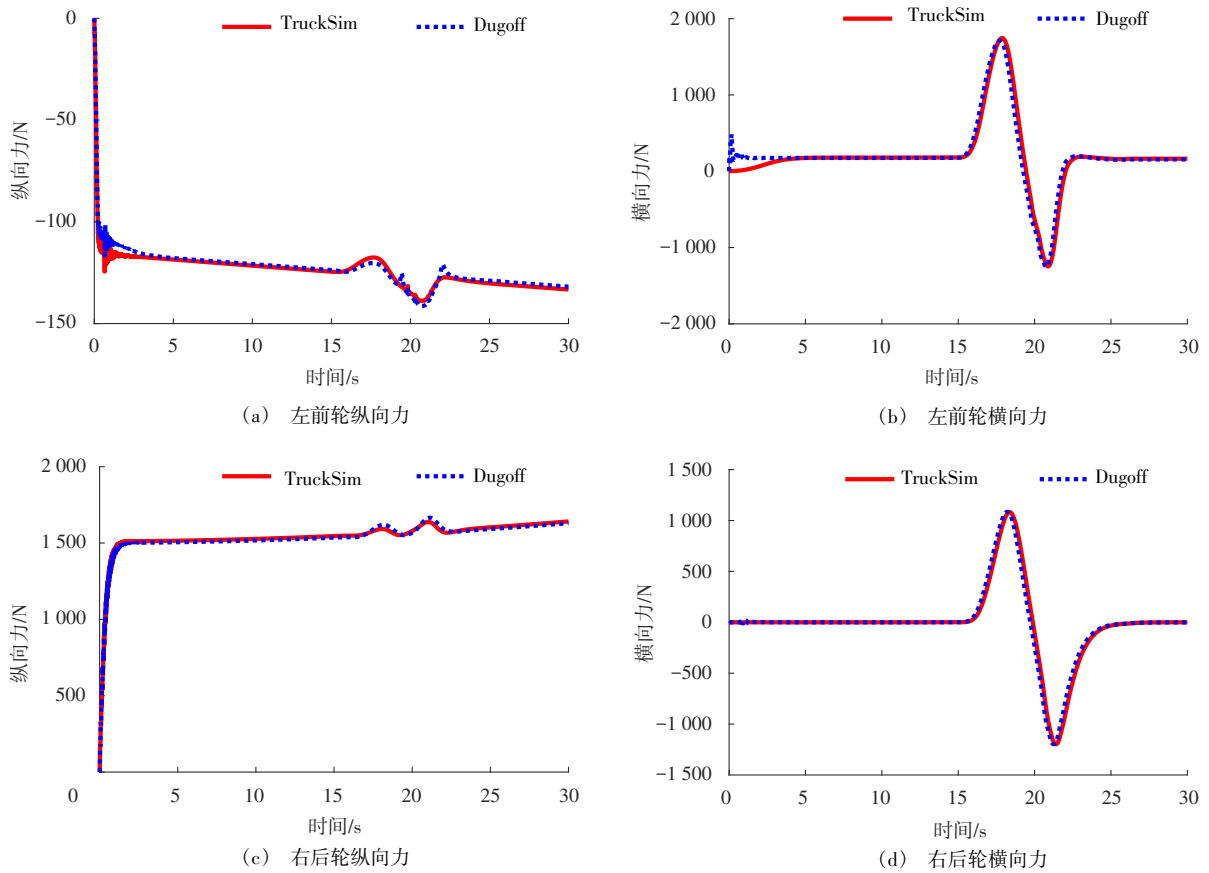


图2 Dugoff轮胎模型计算精度验证

Fig. 2 Calculation accuracy of the Dugoff tire model

2 路面附着系数估计

2.1 路面附着系数估计模型

由于被控车型为分布式后驱客车, ASR控制时只需要获得后轮的路面附着系数。当客车直线起步时, 前轮作为从动轮, 其纵向力和横向力均较小。此外, 考虑到道路连续性与实际场景, 为了降低估计算法的复杂度, 假定车辆同侧前后车轮的路面附着系数相同 ($\mu_l = \mu_{ll} = \mu_{rl}, \mu_r = \mu_{lr} = \mu_{rr}$), 则路面附着系数估计的状态量设为 $x_{\text{TRFC}} = (\mu_l, \mu_r)^T$ ^[29]。车轮的横向加速度、纵向加速度和横摆角速度为可测量信号, 因此, 将这些参数设为观测量 $z_{\text{TRFC}} = (a_x, a_y, \dot{\gamma})^T$ 。

卡尔曼滤波估计器的标准状态空间方程公式为^[30]

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1} \\ z_k = h(x_k, u_k) + v_k \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_k 为 k 时刻的状态量; u_k 为 k 时刻的控制量; z_k 为 k 时刻的观测量; w 和 v 分别为系统过程噪声和测量噪声, 它们的协方差矩阵分别为 Q_w 和 R_v 。

路面附着系数在正常道路上是一个稳定范围的值, 因此可以将其看作一个有干扰的定值, 则状态方程为

$$\begin{cases} f_1(\bullet) = x_1 \\ f_2(\bullet) = x_2 \end{cases} \quad (10)$$

考虑到客车行驶在左右附着条件不同的对开路面上时, 会因横向力差异而引发一定的横向和横摆运动。因此, 根据车辆纵向、横向、横摆动力学公式以及 Dugoff 轮胎模型, 并在忽略空气阻力与滚动阻力的前提下, 可以得到路面附着系数估计的观测方程为

$$\begin{cases} h_1(\bullet) = \frac{x_1}{m}(Z_{11} + F_{r10}^x) + \frac{x_2}{m}(Z_{12} + F_{r10}^x) \\ h_2(\bullet) = \frac{x_1}{m}(Z_{21} + F_{r10}^y) + \frac{x_2}{m}(Z_{22} + F_{r10}^y) \\ h_3(\bullet) = \frac{x_1}{I_x} \left(Z_{21} l_f - Z_{11} \frac{w_f}{2} - F_{r10}^y l_r - F_{r10}^x \frac{w_r}{2} \right) + \\ \frac{x_2}{I_x} \left(Z_{22} l_f + Z_{12} \frac{w_f}{2} - F_{r10}^y l_r + F_{r10}^x \frac{w_r}{2} \right) \end{cases} \quad (11)$$

为了简明表示, 使用4个符号对上式中的长式子进行指代, 分别定义为 $Z_{11} = F_{r10}^x \cos(\delta_f) - F_{r10}^y \sin(\delta_f)$,

$$Z_{12} = F_{f0}^x \cos(\delta_f) - F_{f0}^y \sin(\delta_f), Z_{21} = F_{f0}^x \sin(\delta_f) + F_{f0}^y \cos(\delta_f), Z_{22} = F_{f0}^x \sin(\delta_f) + F_{f0}^y \cos(\delta_f).$$

2.2 基于奇异值分解的高阶容积分卡尔曼滤波算法

基于车辆动力学和Dugoff轮胎模型的路面附着系数估计是一个强非线性系统,尤其是对于起步工况来说,车辆的纵向力、速度和纵向加速度等参数波动很大。因此,采用HCKF算法对路面附着系数进行估计。相比传统的CKF,HCKF更适用于强非线性系统,对状态所设置初始值的依赖较小,收敛速度更快,估计精度更高^[31]。

此外,为了避免状态误差协方差矩阵 P_k 分解时出现非正定问题,使用SVD来代替HCKF中传统的Cholesky分解。SVD-HCFK算法包括滤波初始化、时间更新和测量更新3个步骤,具体推导公式如下。

步骤1:滤波初始化

$$\hat{x}_0 = E[x_0] \quad (12)$$

$$P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T] \quad (13)$$

式中: x_0 为初始状态值; \hat{x}_0 为初始状态估计值; P_0 为初始状态误差协方差矩阵。

步骤2:时间更新

对上一时刻的误差协方差矩阵 P_{k-1} 进行SVD

$$P_{k-1} = U_{k-1} S_{k-1} U_{k-1}^T \quad (14)$$

式中: S_{k-1} 为对角矩阵,对角线上的元素为 P_{k-1} 的奇异值; U_{k-1} 为正交矩阵。

计算容积点

$$\chi_{\ell, k-1} = \hat{x}_{k-1} + U_{k-1} \sqrt{S_{k-1}} \xi_{\ell} \quad \ell = 0, 1, \dots, 2n^2 \quad (15)$$

式中: $\chi_{\ell, k-1}$ 为容积点; n 为状态量 x 的个数。

点集 ξ_{ℓ} 为

$$\xi_{\ell} = \begin{cases} (0, 0)^T & \ell = 0 \\ \sqrt{n+2} s^+ & \ell = 1, 2, \dots, n(n-1)/2 \\ -\sqrt{n+2} s^+ & \ell = n(n-1)/2 + 1, \dots, n(n-1) \\ \sqrt{n+2} s^- & \ell = n(n-1) + 1, \dots, 3n(n-1)/2 \\ -\sqrt{n+2} s^- & \ell = 3n(n-1)/2 + 1, \dots, 2n(n-1) \\ \sqrt{n+2} e_{\ell-2n(n-1)} & \ell = 2n(n-1) + 1, \dots, n(2n-1) \\ -\sqrt{n+2} e_{\ell-n(2n-1)} & \ell = n(2n-1) + 1, \dots, 2n^2 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} s_j^+ = \sqrt{1/2} (e_p + e_q) & p < q; \quad p, q = 1, 2, \dots, n \\ s_j^- = \sqrt{1/2} (e_p - e_q) & p < q; \quad p, q = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (17)$$

$$j = \begin{cases} 1 & q = 2, p = 1 \\ \frac{(q-1)(q-2)}{2} + p & q > 2, p < q \end{cases} \quad (18)$$

式中: e_{ℓ} 为 n 维单位向量,且第 ℓ 个元素为1。

计算状态方程传播后的容积点 $\chi_{\ell, k-1}^*$

$$\chi_{\ell, k-1}^* = f(\chi_{\ell, k-1}) \quad (19)$$

计算状态一步预测值 $\hat{x}_{k|k-1}$

$$\hat{x}_{k|k-1} = \sum_{\ell=0}^{2n^2} \omega_{\ell} \chi_{\ell, k-1}^* \quad (20)$$

权重 ω_{ℓ} 计算如下

$$\omega_{\ell} = \begin{cases} \frac{2}{n+2} & \ell = 0 \\ \frac{1}{(n+2)^2} & \ell = 1, 2, \dots, 2n(n-1) \\ \frac{4-n}{2(n+2)^2} & \ell = 2n(n-1) + 1, \dots, 2n^2 \end{cases} \quad (21)$$

误差协方差矩阵一步预测值计算如下

$$P_{k|k-1} = \sum_{\ell=0}^{2n^2} \omega_{\ell} (\chi_{\ell, k-1}^* - \hat{x}_{k|k-1}) (\chi_{\ell, k-1}^* - \hat{x}_{k|k-1})^T + Q_w \quad (22)$$

步骤3:测量更新

计算时间更新后新的状态容积点 $\chi_{\ell, k-1}$

$$\chi_{\ell, k-1} = \hat{x}_{k|k-1} + U_{k|k-1} \sqrt{S_{k|k-1}} \xi_{\ell} \quad \ell = 0, 1, \dots, 2n^2 \quad (23)$$

$$P_{k-1} = U_{k|k-1} S_{k|k-1} U_{k|k-1}^T \quad (24)$$

计算经过测量方程传递的容积点 $Z_{\ell, k-1}$

$$Z_{\ell, k-1} = h(\chi_{\ell, k-1}) \quad (25)$$

计算观测量预测值 $\hat{z}_{k|k-1}$ 、观测量协方差矩阵

$$P_{zz, k|k-1} \text{ 和互相关协方差矩阵 } P_{xz, k|k-1} \quad \hat{z}_{k|k-1} = \sum_{\ell=0}^{2n^2} \omega_{\ell} Z_{\ell, k-1} \quad (26)$$

$$P_{zz, k|k-1} = \sum_{\ell=0}^{2n^2} \omega_{\ell} (Z_{\ell, k-1} - \hat{z}_{k|k-1}) (Z_{\ell, k-1} - \hat{z}_{k|k-1})^T + R_v \quad (27)$$

$$P_{xz, k|k-1} = \sum_{\ell=0}^{2n^2} \omega_{\ell} (\chi_{\ell, k-1} - \hat{x}_{k|k-1}) (Z_{\ell, k-1} - \hat{z}_{k|k-1})^T \quad (28)$$

计算增益矩阵 K_k

$$K_k = P_{xz, k|k-1} (P_{zz, k|k-1})^{-1} \quad (29)$$

计算 k 时刻的状态估计值 \hat{x}_k

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k(z_k - \hat{z}_{k-1}) \quad (30)$$

计算 k 时刻的状态误差协方差矩阵 P_k

$$P_k = P_{k-1} - K_k P_{z, k-1} K_k^T \quad (31)$$

为了验证基于 SVD-HCKF 算法的路面附着系数估计性能,在 TruckSim 中设置了仅用 PI 控制器做起步工况的速度跟踪,初始车速为 0,目标车速为 $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。与 MATLAB/Simulink 中的估计算法联合仿真,进行了 5 种工况的验证,包括 3 个单一路面 ($\mu=0.2, 0.3, 0.8$), 1 个对接路面(前 10 m 时 $\mu=0.4$, 随后 $\mu=0.6$), 1 个对开路面(左侧 $\mu=0.3$, 右侧

$\mu=0.4$)。其中,冰雪路面 $\mu=0.2$ 的起步时间设为 16 s,其他工况都为 10 s。此外,将所设计的 SVD-HCKF 路面附着系数估计算法与传统的 SVD-CKF 算法进行对比,其中状态初始值都设为常规道路 $x_0=(0.8, 0.8)^T$, $P_0=\text{diag}(10, 10)$, $Q_w=\text{diag}(1 \times 10^{-6}, 1 \times 10^{-6})$, $R_v=\text{diag}(0.01, 0.01)$ 。

SVD-CKF 和 SVD-HCKF 的估计结果如图 3 所示。可以看出,在各类工况起步开始时 SVD-HCKF 收敛过程波动较小,并能在 1 s 内收敛到真实值;当估计值稳定后, SVD-HCKF 的估计精度明显更高。

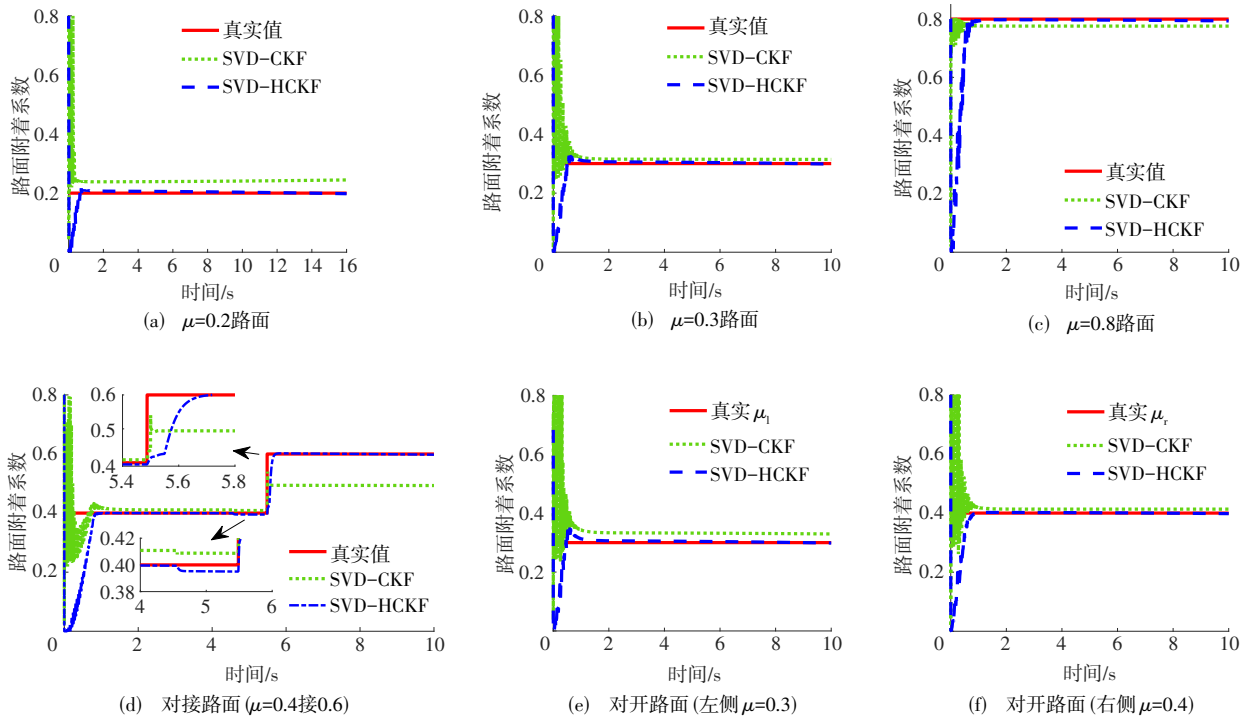


图3 不同路面工况下 SVD-CKF 和 SVD-HCKF 估计结果

Fig. 3 Estimation results of SVD-CKF and SVD-HCKF under different road maneuvers

特别是对接路面[图 3(d)],当路面附着系数发生突变后, SVD-CKF 跟踪性能很差,难以准确拟合到 $\mu=0.6$ 的对接路面工况,而 SVD-HCKF 的估计值则可以准确收敛,收敛时间约为 0.3 s,表现出更强的适应性和估计精度。此外,在该仿真工况下,客车前轴在 4.53 s 进入 $\mu=0.6$ 的对接路面,后轴则在 5.49 s 进入,前后轴附着不同的时间不足 1 s。从局部放大图可见,由于前后轴路面附着不同,且估计算法采用同侧附着相同的简化假设,在此短暂阶段内 SVD-HCKF 的估计误差略有增大,误差值约为 0.005,但整体来看,该误差幅度较小,估计结果仍具有较高精度,能够满足后续控制需求。

3 驱动防滑控制策略

本节设计了分布式电驱动客车的 ASR 控制策略,控制策略框架如图 4 所示。首先,根据三自由度动力学模型、Dugoff 轮胎模型和传感器信号,采用 SVD-HCKF 算法进行路面附着系数估计。其次,基于 TruckSim 中的轮胎测试模块,得到不同路面附着系数对应的最佳滑转率,使用一维查表法,获得当前路面的最佳滑转率。随后,当驱动轮滑转率满足 ASR 触发条件时,ASR 介入并进行驱动轮的独立扭矩控制。最后,设计了一种基于动态自适应调整的 ASMC 防滑控制器,在趋近律中引入指数自适应增益,根据误

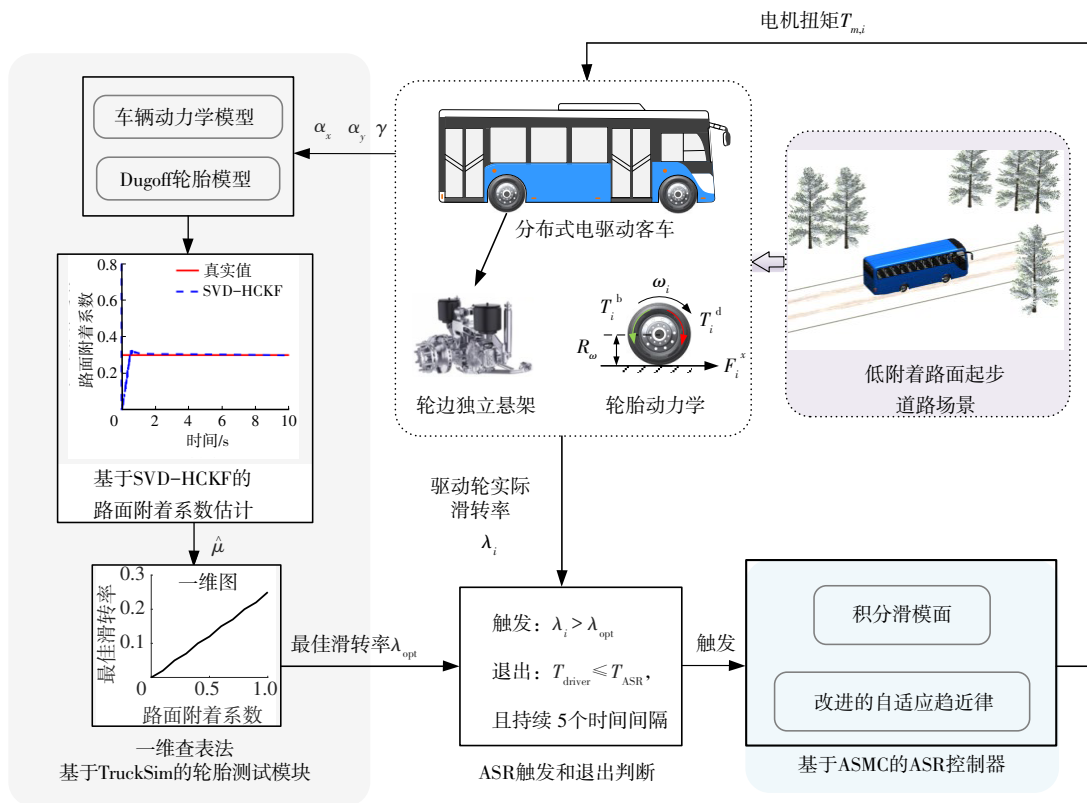


图 4 分布式电驱动客车 ASR 控制策略框架

Fig. 4 ASR control strategy framework for distributed electric drive buses

差自适应调整控制力度,将控制器计算出来驱动轮扭矩除以扭矩传动比,即可得到所需电机扭矩。

3.1 基于实车数据的起步工况分析

为深入分析分布式电驱动客车的起步工况,本文使用CANoe软件对目标车型的日常行驶参数进行了数据采集。首先,选取了2个典型的直线起步工况,其加速踏板开度变化曲线如图5所示。在这2个实车直线起步工况下,加速踏板开度从0到全油门的时间分别为1.0 s和1.2 s,随后全油门状态分别保持了10.2 s和6.5 s,实车起步总时间分别为23 s和8 s。可以看出,在直线起步过程中,驾驶人普遍采用“快速踩下踏板”的激烈操作方式。

其次,选取了2个转弯起步工况,其加速踏板开度变换曲线如图6所示。在2种转弯起步工况下,客车起步总时间分别为18 s和27 s,但加速踏板开度上升过程相对平缓,整体加速节奏较为温和,因而触发ASR功能的概率较低。

需要指出的是,在分布式电驱动客车的转弯过程中,电子差速器通常作为扭矩主控制器,用于实现电机间的差扭分配,从而保障车辆的横向稳定性。因此,本文所提出的ASR控制策略主要用于直线行驶过程中的扭矩控制,在车辆转向时则可作为

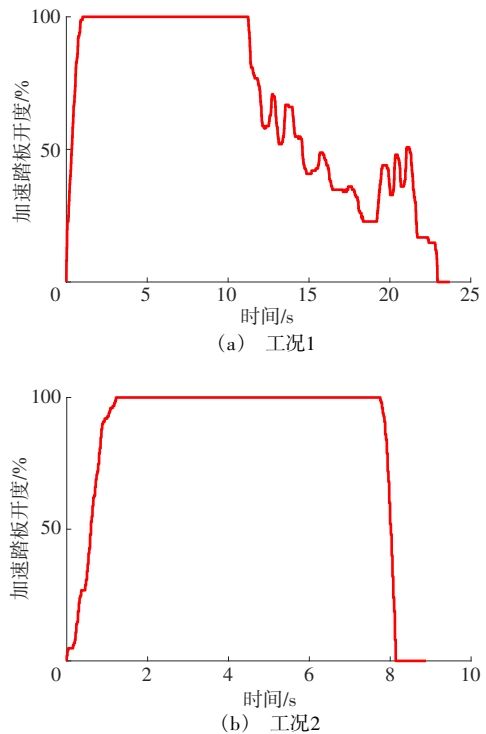


图 5 两个直线起步工况的加速踏板开度变化曲线

Fig. 5 Acceleration pedal opening changing curves of two straight starting maneuvers

电子差速功能的辅助控制器,用于限制电机扭矩输出。

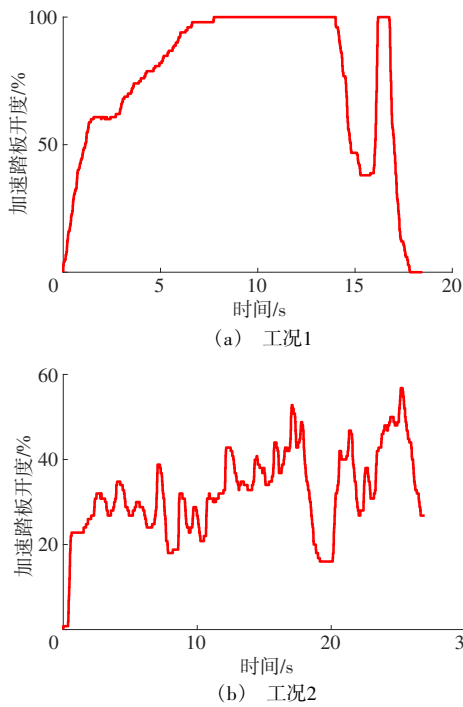


图6 两个转弯起步工况的加速踏板开度变化曲线
Fig. 6 Acceleration pedal opening changing curves of two steering starting maneuvers

3.2 驱动防滑触发与退出机制

ASR在满足驾驶人操作需求的同时,需要具备合理的触发和退出条件,以防ASR频繁干预和退出,保证客车行驶的平顺性。最佳滑转率的获取是设计ASR触发与退出机制的前提。现有ASR研究中的最佳滑转率多使用Burckhardt模型数据^[10,16],而客车所用的轮胎结构与乘用车不同,其具有更大的接地面积、更宽的胎面、更大的滚动半径以及不同的纵向刚度特性。这些结构性差异会影响轮胎与地面的附着力和不同路面的最佳滑转率,所以将传统的最佳滑转率数据直接用于分布式电驱动客车的ASR功能会造成扭矩控制精度降低。

因此,基于TruckSim软件中的轮胎测试(Tire Tester Utility)模块可以测试不同路面条件下的轮胎性能,其中寻找最佳滑转率步骤为:①根据实际分布式电驱动客车的轮胎参数设置TruckSim轮胎模型,目标车型的轮胎型号是455/45R22.5;②在相同的垂直载荷下,设置不同路面附着系数路面进行测试,找到纵向力最大时对应的滑转率。

在测试中,设置轮胎垂直载荷为30 kN,路面附着系数以0.2为间隔,根据纵向力-滑转率数据作图,如图7所示。可以看出,不同路面下轮胎的峰值纵向力对应的滑转率不同, $\mu=0.8$ 时峰值纵向力对应的滑转率为0.2, $\mu=0.2$ 时峰值纵向力对应的滑转

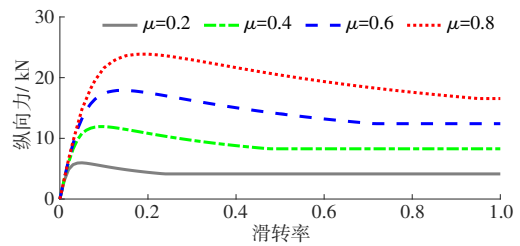


图7 不同路面下纵向力与滑转率曲线
Fig. 7 Longitudinal force and slip ratio curves under different road surfaces

率为0.05,路面状况越好则最佳滑转率越大。

当驱动轮滑转率保持在最佳滑转率附近时,车辆的起步驱动性能最好,纵向稳定性最高。而一旦实际滑转率超过当前路面条件下的最佳滑转率时,轮胎纵向力将迅速下降,导致车辆驱动性能降低,引发驱动轮打滑失稳。因此,在ASR控制中,通常将最佳滑转率作为控制的期望值及触发阈值。

随后,设置路面附着系数以更密的0.1为间隔,得到如表2所示的路面附着系数-最佳滑转率的映射关系表格。在分布式电驱动客车起步时,使用一维查表法可以快速获取当前路面下的最佳滑转率。

表2 路面附着系数-最佳滑转率的映射关系

Table 2 Mapping relationship between road adhesion coefficient and optimal slip ratio

路面附着系数	最佳滑转率
0.1	0.02
0.2	0.05
0.3	0.07
0.4	0.10
0.5	0.12
0.6	0.15
0.7	0.17
0.8	0.20
0.9	0.22
1.0	0.25

基于最佳滑转率和客车行驶参数,ASR触发与退出机制如下。

(1)当驱动轮的实际滑转率超出最佳滑转率,即 $\lambda_i > \lambda_{opt}$ 时,ASR触发并介入,控制驱动轮滑转率趋近于最佳滑转率,以获得最佳的驱动性能。此外,考虑到客车起步阶段路面附着系数需要约1s的估计拟合时间,为避免初始阶段ASR频繁或误触发,将起步1s内的ASR触发阈值设置为0.2。

(2)当驾驶人通过加速踏板所输出的实际扭矩值小于或等于ASR控制器的输出扭矩时,即 $T_{driver} \leq T_{ASR}$ 时,说明当前驱动状态不会再引发滑转风险。

若该状态持续5个采样间隔,ASR功能退出^[9]。

(3)当分布式电驱动客车的方向盘转角小于或等于转向阈值,即 $|\delta_{sw}| \leq \delta_{th}$ 时,认为客车直线起步。此时,若识别到左右侧路面状态相同,电机扭矩输出为相同值;当左右附着系数不同时,为了防止车辆跑偏或脱离正常车道线范围,使扭矩遵循“低选原则”,即根据低附着系数路面的最佳滑转率计算出来的驱动扭矩,用以作为2个驱动轮的扭矩 $T_i = \min\{T_{rl,ASR}, T_{rr,ASR}\}$ ^[32]。

(4)当分布式电驱动客车的方向盘转角大于转向阈值,即 $|\delta_{sw}| > \delta_{th}$ 时,认为客车转弯起步。当客车转弯时,电子差速功能是电机扭矩主控制器,以实现左右电机的差扭控制;若客车转弯的同时触发ASR功能,ASR功能用以辅助电子差速控制器,限制电机扭矩输出值。

3.3 基于自适应滑模控制的驱动防滑控制器

由于所研究车型为分布式电驱动客车,具有较大的空载与满载质量差异(空载质量为 $m = 10\,000\text{ kg}$,满载质量为 $m_{full} = 15\,000\text{ kg}$),因此在扭矩控制策略中选用了具有较强鲁棒性的SMC方法,以适应不同载荷工况下的控制需求。

车辆加速过程中,驱动轮转动速度大于车辆实际速度,此时驱动轮的滑转率 λ_i 为

$$\lambda_i = \frac{\omega_i R_w - v_x}{\omega_i R_w} \quad (32)$$

由于SMC需要用到控制状态量的导数,首先对滑转率进行求导运算,得到滑转率的变化率为

$$\dot{\lambda}_i = \frac{d}{dt} \left(1 - \frac{v_x}{\omega_i R_w} \right) = -\frac{\dot{v}_x}{\omega_i R_w} + \frac{v_x \dot{\omega}_i}{\omega_i^2 R_w} \quad (33)$$

随后,基于滑转率定义的变形 $[\omega_i R_w = v_x / (1 - \lambda_i)]$,将其代入到式(33)中,可建立滑转率变化率与当前滑转率之间的关系式,整理可得

$$\dot{\lambda}_i = -\frac{(1 - \lambda_i) \dot{v}_x}{v_x} + \frac{(1 - \lambda_i)^2 \dot{\omega}_i R_w}{v_x} \quad (34)$$

考虑到客车加速过程中制动扭矩 $T_i^b = 0$,则 $\dot{\omega}_i$ 的计算公式为

$$\dot{\omega}_i = \frac{T_i^d - F_i^r R_w}{I_w} \quad (35)$$

\dot{v}_x 可由车辆的纵向受力分析得到

$$\dot{v}_x = \frac{\sum F_i^r - F_{roll} - F_{air}}{m} \quad (36)$$

为了使驱动轮的实际滑转率 λ_i 跟踪最佳滑转率 λ_{opt} ,定义滑转率误差为

$$e_\lambda = \lambda_i - \lambda_{opt} \quad (37)$$

式中: e_λ 为驱动轮当前滑转率与最佳滑转率之间的偏差。

为了设计SMC控制器,本文选择常用的积分滑模面形式^[33]

$$s = e_\lambda + c \int_0^t e_\lambda dt \quad (38)$$

式中: s 为滑模面变量; c 为正的积分权重系数,用于调整误差的衰减速度。

对滑模面 s 求导,可得

$$\dot{s} = \dot{e}_\lambda + c e_\lambda = \dot{\lambda}_i - \dot{\lambda}_{opt} + c(\lambda_i - \lambda_{opt}) \quad (39)$$

传统的指数趋近律为

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (40)$$

式中: ϵ 和 k 为正的趋近律参数。

为了防止控制振荡和超调,本文对传统的指数趋近律进行改进,设计了一种基于误差动态自适应调整的ASMC。首先,采用双曲正切函数替代传统的 sgn 符号函数,可以保证输出平滑的扭矩,防止驱动扭矩振荡或突变。其次,在趋近律中引入指数自适应增益,可以根据误差大小自适应调整控制力度,在误差大时增大控制增益以加快控制响应,在误差小时减轻控制增益以防控制结果超调。改进的自适应趋近律可以表示为

$$\dot{s} = -\epsilon \tanh\left(\frac{s}{\sigma}\right) - ks - k_w \exp\left(-\frac{\beta}{|e_\lambda|}\right) s \quad (41)$$

$$\tanh\left(\frac{s}{\sigma}\right) = \frac{e^{\frac{s}{\sigma}} - e^{-\frac{s}{\sigma}}}{e^{\frac{s}{\sigma}} + e^{-\frac{s}{\sigma}}} \quad (42)$$

式中: σ 、 k_w 和 β 均为正的趋近律参数($\sigma > 0, 0 < k_w < 1, \beta > 0$)。

自适应趋近律第3项中的 $k_w \exp\left(-\frac{\beta}{|e_\lambda|}\right)$ 属于指数自适应增益, β 用于调整指数衰减的速度。当误差很小 $|e_\lambda| \rightarrow 0$ 时, $\exp\left(-\frac{\beta}{|e_\lambda|}\right) \approx 0$,第3项可以忽略;当误差很大时, $\exp\left(-\frac{\beta}{|e_\lambda|}\right) \approx 1$,第3项约为 $k_w s$ 。改进后的自适应趋近律在误差大的时候增大控制增益,有助于快速减小误差;在误差小的时候减小控制增益,避免过调节,实现了控制增益的自适应调整。

令滑模面求导式(39)等于自适应趋近律(41),可得到驱动轮所需的扭矩为

$$T_{ASR,i} = \frac{I_w v_x}{(1 - \lambda_i)^2 R_w} \left[-c(\lambda_i - \lambda_{opt}) - \epsilon \tanh\left(\frac{s}{\sigma}\right) - ks - k_w \exp\left(-\frac{\beta}{|e_\lambda|}\right) s \right] + \frac{I_w \dot{v}_x}{(1 - \lambda_i) R_w} + F_i^r R_w \quad (43)$$

式中: $T_{ASR,i}$ 为 ASR 控制器计算出来的驱动轮所需扭矩, 而 ASR 控制对象为轮边电机, 所以轮边电机的输出扭矩值应为 $T_{m,i} = T_{ASR,i}/16.838$ (16.838 为电机扭矩到驱动轮扭矩的传动比)。

为了证明控制系统的稳定性, 定义 Lyapunov 函数为^[34]

$$V = \frac{s^2}{2} \quad (44)$$

对 V 求导, 并将趋近律公式(41)代入, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = s\dot{s} = & s \left[-\epsilon \tanh\left(\frac{s}{\sigma}\right) - ks - k_{\omega} \exp\left(-\frac{\beta}{|e_1|}s\right) \right] = \\ & -se \tanh\left(\frac{s}{\sigma}\right) - ks^2 - k_{\omega} \exp\left(-\frac{\beta}{|e_1|}s\right) s^2 \end{aligned} \quad (45)$$

分析式(45)可知: 当 $s=0$ 时, $\dot{V}=0$, 原点是控制系统的唯一平衡点; 当 $s>0$ 时, $\tanh\left(\frac{s}{\sigma}\right)>0$, 且 ϵ 、 k 和 k_{ω} 都为正值控制参数, 则 $\dot{V}\leq 0$; 当 $s<0$ 时, $\tanh\left(\frac{s}{\sigma}\right)<0$, 则 $\dot{V}<0$ 。由此可得, 根据 Lyapunov 第二法, $\dot{V}\leq 0$, 且 $\|s\|\rightarrow\infty$ 时, $V\rightarrow\infty$, 则控制系统为渐近稳定。

4 仿真验证与分析

分布式电驱动客车在低附着路面上进行急剧起步加速时, 存在较大的安全风险, 易导致客车纵向失稳。为验证所提出 ASR 控制策略的有效性, 本文结合 CANoe 软件采集到的实车起步数据, 基于 MATLAB/Simulink 与 TruckSim 的联合仿真平台, 设置不同路面条件的起步工况开展仿真测试。目标车型的基本参数见表 3。在 Simulink 中搭建 ASR 控制算法, 将所提出的 ASMC 算法与无控制、传统 MPC^[27]、传统一阶滑模控制(FOSMC)^[23] 和积分滑模控制(ISMC)^[35] 算法进行对比。控制器参数设置见表 4。其中, FOSMC 和 ISMC 均采用等速趋近律 [$\dot{s} = -\epsilon \text{sat}(s)$], MPC 算法中预测时域 $N_p=20$ 、控制时域 $N_c=15$ 。

结合实车起步工况数据(图 5), 本文将测试工况中的驾驶人扭矩输出设置为 1 s 到达电机峰值扭矩 (360 N·m), 随后保持最大扭矩输入。据此, 分别设置了 3 种客车空载时不同路面条件的直线起步工况, 进行控制算法对比验证, 包括冰雪路面 $\mu=0.2$ 、对接路面(前 10 m 时 $\mu=0.4$, 随后 $\mu=0.6$)、对接路面(左侧 $\mu=0.3$, 右侧 $\mu=0.4$)。此外, 为了验证控制算法对客车质量变化的适应性, 增加了一种客车满载时在积水路面的起步工况测试($\mu=0.3$)。

表 3 分布式电驱动客车参数

Table 3 Parameters of the distributed electric drive bus

参数	取值
m/kg	10 000
$m_{\text{full}}/\text{kg}$	15 000
l_f/m	2.8
l_r/m	2.2
w_f/m	2.12
w_r/m	2.09
$I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	40 365.6
$I_{\omega}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	14
R_{ω}/m	0.477
$T_{m,\text{max}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	360

表 4 控制器参数

Table 4 Controller parameters

参数	取值
c	4
ϵ	2
k	10
σ	2
k_{ω}	0.5
β	1

面(左侧 $\mu=0.3$, 右侧 $\mu=0.4$)。此外, 为了验证控制算法对客车质量变化的适应性, 增加了一种客车满载时在积水路面的起步工况测试($\mu=0.3$)。

4.1 冰雪路面起步工况

工况 1 为冰雪路面测试, 将路面附着系数设置为 $\mu=0.2$, 此时最佳滑转率为 0.05。客车初始车速设置为 0, 起步加速时间为 16 s。结果如图 8 所示。

图 8(a) 为无控制时驱动轮的滑转率, 可以看到 0.1 s 内驱动轮滑转率在 0.7 左右波动, 随着电机扭矩的进一步增大, 驱动轮完全滑转, 客车纵向完全失稳。在此状态下, 若方向盘有轻微转动, 客车将难以维持方向稳定性, 发生侧滑或甩尾。

图 8(b) 为基于 MPC、FOSMC、ISMC 和 ASMC 这 4 种 ASR 控制器的电机扭矩。由于客车在直线行驶时左后轮和右后轮的电机扭矩基本一致, 故使用一张图展示。由放大图可知, 驱动轮滑转率在 0.01 s 触发 ASR 后, 控制器均首先进行降扭控制, 随后逐步增加电机扭矩, 以跟踪最佳滑转率, 最终扭矩稳定在约 158 N·m。4 种 ASR 控制器到达最佳扭矩的时间分别为 7.84、2.32、2.10、1.46 s。其中, 本文所提出的 ASMC 控制器响应速度最快, 能够更迅速地调整电机扭矩以跟踪最佳滑转率; 而 MPC 由于采用固定控制参数且受控制增量约束的限制, 扭矩上升速率相对较慢。此外, MPC 的电机扭矩呈现出

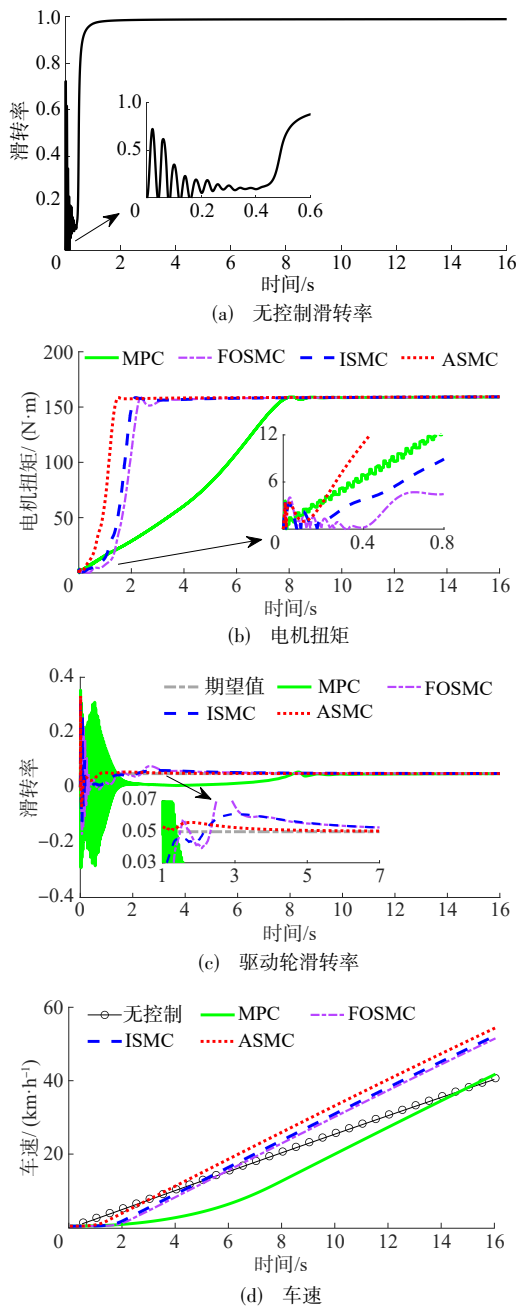


图 8 冰雪路面下不同控制方法的结果

Fig. 8 Results of different control methods under ice and snow road
极其轻微的振荡,一个时间间隔内的波动扭矩约 0.5 N·m,这可能与预测模型精度或参数设置等局限性有关。

图 8(c)为 4 种控制器下的驱动轮滑转率,左右驱动轮滑转率用一张图展示,可以看到在客车起步初始阶段,滑转率在 0.01 s 内瞬间升高至约 0.25。随后,ASR 控制器触发,并通过降扭控制有效抑制滑转率增长,所提出的 ASMC 控制策略的滑转率下降较快。然而,由于 MPC 降扭幅度较小,且输出扭矩存在轻微振荡,虽然不会影响驾驶体验,但导致驱动轮滑转率

在 2 s 内存在较明显的振荡。相比之下,ASMC 的滑转率跟踪响应最快,超调量最小,其滑转率误差超调量比传统 FOSMC 和 ISMC 分别降低了 0.021 2 和 0.005 4。此外,从跟踪精度来看,MPC、FOSMC、ISMC 和 ASMC 的滑转率跟踪平均绝对误差分别为 0.026、0.008、0.006 和 0.002,其中 ASMC 表现最佳。

图 8(d)为车速,基于 ASMC 的防滑控制器在 16 s 时使客车加速至 54.05 km·h⁻¹,相较于无控制、MPC、FOSMC 和 ISMC,驱动性能分别提升了 34.03%、30.45%、5.62% 和 4.09%。

4.2 对接路面起步工况

工况 2 为对接路面测试,前 10 m 的路面附着系数设置为 $\mu=0.4$,随后设置为 $\mu=0.6$,此时的最佳滑转率分别为 0.1 和 0.15。客车初始车速设为 0,起步加速时间为 10 s。

图 9(a)为无控制滑转率,可以看出,在无控制时,驱动轮的滑转率在起步初期便迅速超过最佳滑转率,在 1 s 后完全滑转。随着驾驶人输出扭矩的进一步增大,驱动轮滑转率持续上升,在 4.73 s 驱动轮到 $\mu=0.6$ 路面后滑转率逐渐降低。

图 9(b)~(d)分别为 4 种控制器的电机扭矩输出、驱动轮滑转率和车速。由图 9(b)可知:4 种控制器均首先进行了一定程度的降扭控制,以降低驱动轮滑转率;随后,使电机输出扭矩增加,以跟踪最佳滑转率,在 $\mu=0.4$ 的路面上电机扭矩稳定在约 328 N·m,在 $\mu=0.6$ 的路面上电机扭矩为峰值 360 N·m。其中,ASMC 的控制响应速度最快;而 MPC 由于采用固定控制参数和控制增量约束,控制跟踪响应较慢。此外,由图 9(b)的局部放大图可知,MPC 的电机扭矩呈现出极其轻微的振荡,这导致 MPC 控制下的滑转率在 1 s 以内出现波动。如图 9(c)所示,在 $\mu=0.4$ 的路面上,ASMC 可以更准确地跟踪最佳滑转率 0.1;在 $\mu=0.6$ 的路面上,滑转率未到达最佳值 0.15,这是因为路面附着系数增大后,需要输出更大的电机扭矩以使驱动轮滑转率增大至最佳滑转率,但是受电机峰值扭矩的限制,即使输出峰值扭矩,也无法达到理想值。从滑转率跟踪精度来看,MPC、FOSMC、ISMC 和 ASMC 的滑转率跟踪平均绝对误差分别为 0.070、0.066、0.064 和 0.060。由图 9(d)可以看出,从驱动性能来看,MPC、FOSMC、ISMC 和 ASMC 在 10 s 时的车速分别为 69.19、72.43、74.08、76.11 km·h⁻¹。无论是滑转率控制精度还是驱动性能,基于 ASMC 的 ASR 控制器均表现最佳。

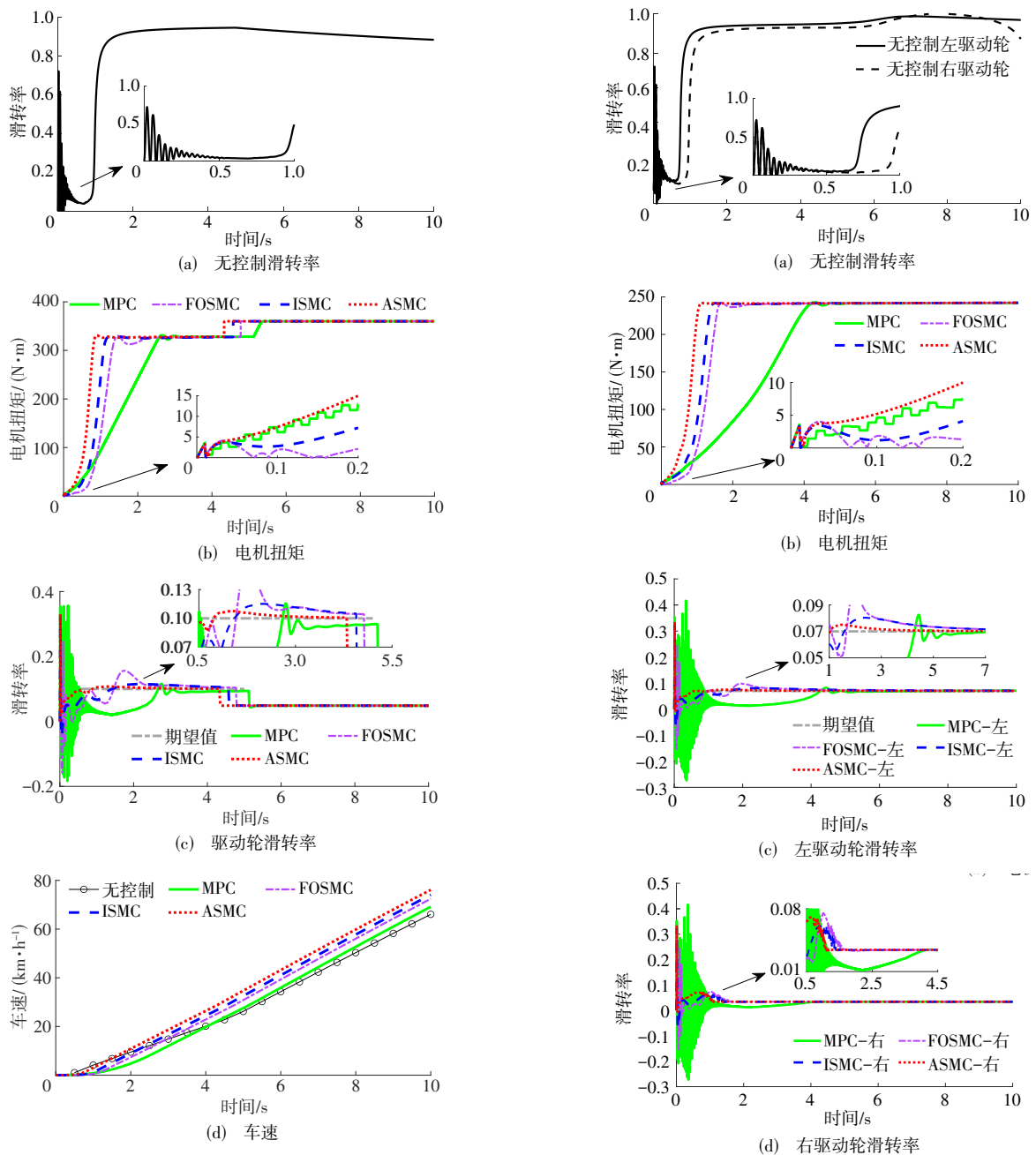


图9 对接路面下不同控制方法的结果

Fig. 9 Results of different control methods under docking road

4.3 对开路面起步工况

工况3为对开路面测试,左侧路面附着系数设置为 $\mu=0.3$,右侧设置为 $\mu=0.4$,此时的左、右驱动轮的最佳滑转率分别为0.07和0.1。客车初始车速设为0,起步加速时间为10 s。结果如图10所示。

图10(a)为无控制时驱动轮的滑转率,展示了在对开路面下6 s内驱动轮的滑转率。由图10(a)可以看出,在无控制的情况下,由于驱动扭矩相同但左右路面附着系数不同,左右轮速也会不同,左、右驱动轮的滑转率在0.69 s出现明显差别。此时,虽然方

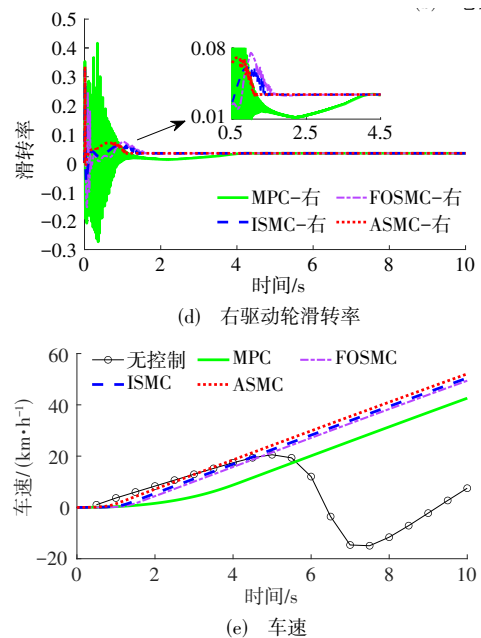


图10 对开路面下不同控制方法的结果

Fig. 10 Results of different control methods under split road

方向盘转角为0,但由于左驱动轮轮速小,客车车身会向左转,在5.8 s客车超出道路边界,左驱动轮滑转率甚至超过100,客车发生急剧甩尾。

图 10(b)~(e)为 4 种 ASR 控制器下的电机扭矩、左驱动轮滑转率、右驱动轮滑转率和车速。在对开路面下,为了防止客车跑偏甚至脱离正常车道范围,电机扭矩要遵循“低选原则”,左右两轮均输出低路面附着下计算的扭矩,即跟踪左侧路面下的最佳滑转率。由图 10(b)可知:ASMC 在 1.14 s 即可达到扭矩稳定值 241 N·m,且扭矩输出光滑无波动;而 MPC 的输出扭矩有轻微上下波动,一个时间间隔内的波动扭矩最大约 1 N·m,虽然不会影响驾驶体验,但是会使驱动轮滑转率在起步初期表现出波动,如图 10(c)和(d)所示。从滑转率的跟踪精度来看,左驱动轮的滑转率跟踪均方根误差分别为 0.051、0.024、0.016 和 0.009。由 10(e)可知,无控制时由于客车在 5.8 s 甩尾后掉头导致车速最低,而在 ASMC 控制下 10 s 时的客车车速最高,为 52.08 km·h⁻¹,相较于 MPC、FOSMC 和 ISMC,加速性能分别提升了 24.55%、5.38% 和 3.21%。

4.4 客车满载时积水路面起步工况

工况 4 为客车满载时积水路面起步测试,将客车载重设置为 5 000 kg,路面附着系数设置为 $\mu=0.3$,此时最佳滑转率为 0.07。客车初始车速设置为 0,起步加速时间为 10 s。

图 11(a)为无控制滑转率,图 11(b)~(d)分别为 4 种控制器的电机扭矩输出、驱动轮滑转率和车速。由图 11(a)可以看出,在无控制情况下,驱动轮的滑转率在起步初期便迅速超过最佳滑转率,且在约 1 s 超出 1,随着驾驶人输出扭矩的进一步增大,滑转率持续上升,最终导致客车纵向完全失稳。驱动轮滑转率触发 ASR 后,4 种控制器都首先进行了一定程度的降扭控制,以降低驱动轮滑转率;随后,控制电机使输出扭矩增加,以跟踪最佳滑转率,最终电机扭矩稳定在 340 N·m。由图 11(c)可知,ASMC 的最佳滑转率跟踪响应最快,超调量最小,而 MPC 由于采用估计控制参数和控制增量约束,控制跟踪响应较慢。此外,从图 11(b)的局部放大图可知,MPC 的电机扭矩呈现出极其轻微的振荡,这导致 MPC 控制下的滑转率在 1.3 s 以内出现波动。从滑转率跟踪精度来看,MPC、FOSMC、ISMC 和 ASMC 的滑转率跟踪均方根误差分别为 0.039、0.025、0.022 和 0.013;从驱动性能来看,MPC、FOSMC、ISMC 和 ASMC 在 10 s 时的车速分别为 43.30、46.19、46.94、49.12 km·h⁻¹。结果表明,基于 ASMC 的 ASR 控制器在大载荷、低附着工况下依然具备良好的滑转率

跟踪能力与车辆加速性能。

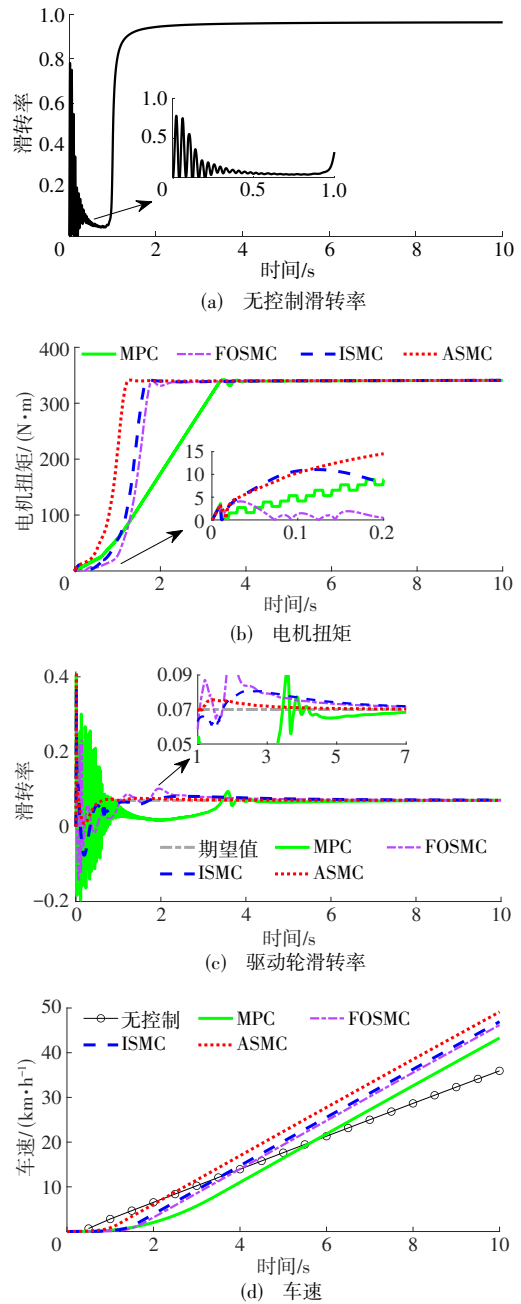


图 11 客车满载时积水路面下不同控制方法的结果
Fig. 11 Results of different control methods under waterlogged road when the bus is fully loaded

上述 4 个工况测试中,ASMC 采用如表 4 所示的固定控制参数,而 MPC 需要根据路面条件调整状态量权重矩阵 Q 和控制增量权重矩阵 R 。具体而言,在 4 种工况下, Q 分别设置为 $\text{diag}(800, 800)$ 、 $\text{diag}(1\ 200, 1\ 200)$ 、 $\text{diag}(1\ 000, 1\ 000)$ 和 $\text{diag}(1\ 500, 1\ 500)$; R 分别为 $\text{diag}(0.004, 0.004)$ 、 $\text{diag}(0.001, 0.001)$ 、 $\text{diag}(0.002, 0.002)$ 和 $\text{diag}(0.001, 0.001)$ 。尽管传统的 MPC 能够跟踪最佳滑转率,但由于 Q 和

R 为固定值,难以根据实际需求自适应调整控制速度。例如,在起步初期,本应增大跟踪速度,但固定权重限制了MPC的响应能力。综上,所提出的基于ASMC的防滑控制器在鲁棒性和泛化能力方面表现更优,更适用于分布式电驱动客车ASR功能的精确扭矩控制。

此外,本文采用平均绝对误差和均方根误差作为滑转率跟踪精度的性能指标,不同ASR控制方法的跟踪性能对比见表5。根据4种不同起步工况的测试结果可见,所提出的ASMC在最佳滑转率的跟踪方面表现更优,有助于提高分布式电驱动客车起步时的纵向稳定性和驱动性能。

表5 不同控制方法下滑转率跟踪精度的性能指标

Table 5 Performance indicators of slip ratio tracking accuracy for different control methods

工况	性能指标	控制算法			
		MPC	FOSMC	ISMC	ASMC
1	平均绝对误差	0.026	0.009	0.006	0.002
	均方根误差	0.049	0.020	0.016	0.009
2	平均绝对误差	0.070	0.066	0.064	0.060
	均方根误差	0.083	0.079	0.077	0.077
3	平均绝对误差	0.027	0.010	0.007	0.002
	均方根误差	0.051	0.024	0.016	0.009
4	平均绝对误差	0.020	0.011	0.009	0.003
	均方根误差	0.039	0.025	0.022	0.013

分析控制器计算速度,4种测试工况均在同一台笔记本电脑(AMD Ryzen 7 5800H 3.20 GHz,16.0 GB内存)上完成。表6对比了不同控制方法在相同工况下的计算耗时。结果表明,FOSMC、ISMC和ASMC的平均计算耗时远小于MPC,表现出更高的计算效率,更能满足实时控制的需求。综合考虑鲁棒性与实时性可知,本文提出的基于ASMC的ASR控制策略在分布式电驱动客车应用中具有更优的适应性。

表6 不同控制方法的耗时对比

Table 6 Time comparison of different control methods

工况	工况总仿真时间	不同控制方法的耗时			
		MPC	FOSMC	ISMC	ASMC
1	16	13.55	4.33	4.63	4.79
2	10	8.27	3.03	3.14	3.15
3	10	8.76	3.00	3.26	3.30
4	10	8.49	2.94	3.46	3.42

5 结 语

(1)本文提出了一种基于路面识别的分布式电驱动客车驱动防滑控制策略,构建了客车起步加速时的扭矩控制框架。针对不同路面条件和载重下的

ASR功能,均可以实现分布式电驱动客车的精确扭矩控制。

(2)设计了一种适用于分布式后驱客车的SVD-HCKF路面附着系数估计方法。相比于SVD-CKF,所使用的SVD-HCKF算法具有更高的估计精度和收敛速度,更适合复杂路面识别。

(3)考虑客车实际轮胎特性,以目标车型匹配的455/45R22.5客车轮胎参数为基础,通过TruckSim中的轮胎测试模块得到了路面附着系数-最佳滑转率的映射关系表格,并基于此设计ASR触发与退出机制,增强了ASR功能在客车应用中的适应性。

(4)在ASR控制器设计中,引入指数自适应增益滑模趋近律,提出了一种基于ASMC的防滑控制算法。ASMC能够依据误差大小自适应调整控制力度,加快滑转率跟踪速度并抑制超调。仿真结果表明,所提出方法在滑转率控制精度、整车加速性能和计算效率方面,均优于传统MPC与SMC控制策略。

(5)本文所提出的ASR控制策略主要适用于分布式电驱动客车在直线起步加速时的扭矩控制。在后续研究中,应针对转向工况的稳定性和驱动性能,进一步开展分布式电驱动客车扭矩协调控制系统的研究。

参 考 文 献:

References:

- [1] 王之中,余荣杰,邱 斌.国家自然科学基金委员会交通与运载工程学科2024年度管理工作综述与展望[J]. 交通运输工程学报,2025,25(1):1-7.
WANG Zhi-zhong, YU Rong-jie, QIU Bin. Review and prospect on management of transportation and vehicle engineering discipline under NSFC in 2024 [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(1): 1-7.
- [2] YUE M, SHANGGUAN J Y, GUO L, et al. All-in-one control framework for distributed drive electric buses path tracking subject to uncertain crosswind and varied passenger mass[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(7): 8342-8353.
- [3] MESQUITA H C, LAGANÁ A A M, ANGÉLICO B A. An algebraic estimation-based model-free control for acceleration slip regulation of electric vehicles [J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2024, 35(6): 1097-1107.
- [4] DEGEL W, LUPBERGER S, ODENTHAL D, et al. Scalable slip control with torque vectoring including input-to-state stability analysis [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2023, 31(3): 1250-1265.
- [5] HORI Y. Future vehicle driven by electricity and control-research on four-wheel-motored "UOT electric march II"[J].

- IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51 (5): 954-962.
- [6] YIN D, OH S, HORI Y. A novel traction control for EV based on maximum transmissible torque estimation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (6): 2086-2094.
- [7] NGUYEN B M, HARA S, FUJIMOTO H, et al. Slip control for IWM vehicles based on hierarchical LQR [J]. Control Engineering Practice, 2019, 93: 104179.
- [8] SHI K, YUAN X F, LIU L. Model predictive controller-based multi-model control system for longitudinal stability of distributed drive electric vehicle[J]. ISA Transactions, 2018, 72: 44-55.
- [9] DING X L, WANG Z P, ZHANG L. Hybrid control-based acceleration slip regulation for four-wheel-independent-actuated electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7 (3): 1976-1989.
- [10] ZHANG H Z, QI Y Y, SI W J, et al. An improved adaptive sliding mode control approach for anti-slip regulation of electric vehicles based on optimal slip ratio[J]. Machines, 2024, 12 (11): 769.
- [11] LI B, E W J, FENG T L, et al. Road adhesion coefficient estimation based on LiDAR reflectance intensity [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24 (18): 29135-29148.
- [12] CHEN L, QIN Z B, BIAN Y G, et al. Data-driven tire-road friction estimation for electric-wheel vehicle with data category selection and uncertainty evaluation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72 (3): 3048-3060.
- [13] ZHAO S Y, ZHANG J Z, JIANG Y H, et al. Tire-road friction coefficients adaptive estimation through image and vehicle dynamics integration [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 224: 112039.
- [14] WANG Y, HU J Y, WANG F A, et al. Tire road friction coefficient estimation: Review and research perspectives [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1): 6.
- [15] LENG B, TIAN C, HOU X C, et al. Tire-road peak adhesion coefficient estimation based on multisource information assessment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8 (7): 3854-3870.
- [16] KANG S, CHEN J J, QIU G Q, et al. Slip ratio adaptive control based on wheel angular velocity for distributed drive electric vehicles [J]. World Electric Vehicle Journal, 2023, 14(5): 119.
- [17] LIU Y H, LI T, YANG Y Y, et al. Estimation of tire-road friction coefficient based on combined APF-IEKF and iteration algorithm [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 88: 25-35.
- [18] WANG X D, RAN M P, ZHOU X L. Integration of in-wheel motor sensorless systems and hierarchical direct yaw moment control for distributed drive electric vehicles [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 139: 109600.
- [19] ZHANG R Y, FENG Y. L, SHI P C, et al. Tire-road friction coefficient estimation for distributed drive electric vehicles using PMSM sensorless control [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72 (7): 8672-8685.
- [20] SUN X M, XIAO Z H, WANG Z, et al. Acceleration slip regulation control method for distributed electric drive vehicles under icy and snowy road conditions [J]. Applied Sciences, 2024, 14 (15): 6803.
- [21] ATAEI M, KHAJEPOUR A, JEON S. Model predictive control for integrated lateral stability, traction/braking control, and rollover prevention of electric vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58 (1): 49-73.
- [22] LI Q X, LIU L J, YUAN X F. Model predictive controller-based optimal slip ratio control system for distributed driver electric vehicle [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020: 8086590.
- [23] SAVITSKI D, IVANOV V, AUGSBURG K, et al. Wheel slip control for the electric vehicle with in-wheel motors: Variable structure and sliding mode methods [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67 (10): 8535-8544.
- [24] 张利鹏,刘欣,刘帅帅,等. 双模耦合驱动智能电动汽车对开坡道行驶稳定性控制[J]. 中国公路学报, 2024, 37(3): 204-215.
ZHANG Li-peng, LIU Xin, LIU Shuai-shuai, et al. Driving stability control of a dual-mode coupling drive intelligent electric vehicle on bisectonal slopes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37 (3): 204-215.
- [25] LI Z X, PAN S J, MAO K, et al. Combined acceleration slip regulation for multi-wheel distributed electric drive vehicles considering torque loss factor [J]. Control Engineering Practice, 2024, 146: 105893.
- [26] YUAN S X, SHI Q, HE Z J, et al. Acceleration slip regulation by electric motor torque of battery electric vehicle with nonlinear model predictive control approach [J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61 (8): 1937-1953.
- [27] 吴勃夫,徐晓,陈自强,等. 基于非线性MPC的电动赛车驱动防滑控制[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2024, 47 (2): 182-188.
WU Bo-fu, XU Xiao, CHEN Zi-qiang, et al. Acceleration slip regulation of electric racing cars based on nonlinear MPC [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2024, 47 (2): 182-188.
- [28] 张荣芸,凤永乐,时培成,等. 分布式电动汽车路面附着系数估计[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(1): 187-198.
ZHANG Rong-yun, FENG Yong-le, SHI Pei-cheng, et al. Estimation on road adhesion coefficient of distributed drive electric vehicles [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025, 44 (1): 187-198.
- [29] 汪洪波,王春阳,高含,等. 基于FFUKF路面附着系数估计的汽车牵引力控制[J]. 力学学报, 2022, 54(7): 1866-1879.
WANG Hong-bo, WANG Chun-yang, GAO Han, et al.

- Vehicle traction force control based on the road adhesion coefficient estimation by FFUKF [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54 (7): 1866-1879.
- [30] CHEN T, CAI Y F, CHEN L, et al. Sideslip angle fusion estimation method of three-axis autonomous vehicle based on composite model and adaptive cubature Kalman filter [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 10 (1): 316-330.
- [31] JIA B, XIN M, CHENG Y. High-degree cubature Kalman filter[J]. *Automatica*, 2013, 49 (2): 510-518.
- [32] 吴建洋,王震坡,张雷,等. 四轮轮毂电机驱动电动汽车纵侧向稳定性协调控制策略研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59 (4):163-172.
- WU Jian-yang, WANG Zhen-po, ZHANG Lei, et al. Coordination stability control strategy for four-wheel-independent-actuated electric vehicles [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59 (04): 163-172.
- [33] FU R, YANG B, ZHANG H L, et al. Lateral stability control of buses: A framework considering the steering hysteresis response using interleaved predictive control[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73 (1): 216-231.
- [34] 胡海林,虞诗焱,黄伟毅,等. 基于改进SMO的轨道交通直线感应电机无速度传感器MPTC[J]. *交通运输工程学报*, 2025, 25(2):94-107.
- HU Hai-lin, YU Shi-yan, HUANG Wei-yi, et al. Speed sensorless MPTC of linear induction motors for rail transit based on improved SMO [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25 (2): 94-107.
- [35] 傅琪涛. 分布式电驱动客车稳定性控制系统设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- FU Qi-tao. Stability control system design for distributed drive electric bus[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.