商用车电子机械制动系统防抱死制动控制研究

张振兆[1] 高健[2] 阎阔[2] 万里恩[1] 许长贺[1] 李法兵[1]

（1.一汽解放汽车有限公司商用车开发院，长春 130011；2.沈阳军事代表局驻长春第二军事代表室，长春 130000）

【摘要】针对商用车电子机械制动（EMB）系统在防抱死制动控制中的响应滞后和鲁棒性不足问题，提出一种基于制动电机夹紧力-转速-电流三闭环的防抱死制动滑模控制算法，通过建立单轮车辆动力学模型与EMB执行器模型，设计滑模控制器以实时跟踪目标滑移率。在TruckSim/MATLAB联合仿真中，滑移率稳定控制在目标值附近，轮速波动小、制动一致性良好，进一步搭建硬件在环（HIL）台架，分别将防抱死制动滑模控制器和EMB系统制动电机控制器布置在快速原型和电机控制板中，实测结果表明：滑移率能够有效跟踪目标值，满足防抱死制动控制性能要求，验证了控制策略在仿真与HIL测试中的有效性与工程可行性。

关键词：电子机械制动系统 制动防抱死系统 矢量控制 滑模控制 硬件在环

中图分类号：U461.3 **文献标志码：**A **DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20250258

Research on Anti-Lock Braking Control of Electronic Mechanical Braking System for Commercial Vehicles

Zhang Zhenzhao[1], Gao Jian[2], Yan Kuo[2], Wan Lien[1], Xu Changhe[1], Li Fabing[1]

(1. Commercial Vehicle Development Institute, FAW Jiefang Truck Co., Ltd., Changchun 130011; 2. The 2nd Military Representative Office in Changchun, Shenyang Military Representative Bureau, Changchun 130000)

【Abstract】For the response delay and insufficient robustness of the anti-lock braking control in commercial vehicle Electromechanical Braking (EMB) systems, an anti-lock braking sliding mode control algorithm based on a triple closed-loop structure of braking motor clamping force, rotational speed, and current is proposed. A single-wheel vehicle dynamics model and an EMB actuator model are established, and a sliding mode controller is designed to track the target slip ratio in real time. In TruckSim/MATLAB co-simulation, the slip ratio is stably regulated around the target value, with small wheel-speed fluctuations and good braking consistency. Furthermore, a Hardware-in-the-Loop (HIL) test bench is developed, in which the ABS sliding mode controller and the EMB braking motor controller are implemented in a rapid prototyping unit and a motor control board, respectively. The experimental results show that the slip ratio can effectively track the target value and meet the ABS control performance requirements, thereby validating the effectiveness and engineering feasibility of the proposed control strategy in both simulation and HIL testing.

Key words: Electromechanical braking system, Anti-lock Braking System (ABS), Field oriented control, Sliding mode control, Hardware-in-the-loop (HIL)

【引用格式】张振兆, 高健, 阎阔, 等. 商用车电子机械制动系统防抱死制动控制研究[J]. 汽车工程师, 2026(6): 37-42.

ZHANG Z Z, GAO J, YAN K, et al. Research on Anti-Lock Braking Control of Electronic Mechanical Braking System for Commercial Vehicles[J]. Automotive Engineer, 2026(6): 37-42.

1 前言

传统商用车制动系统采用气压制动，存在响应滞后、控制管路布置复杂等缺点。随着底盘电控技术的发展，电子机械制动（Electromechanical Braking，EMB）系统以其响应高效稳定、结构布置紧凑以及支持高级别智能驾驶功能等优点，已成为车辆制动系统研究的热点[1-3]。

EMB系统的制动力来源于制动电机，现阶段EMB制动电机多采用永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor，PMSM），相较于直流电机，永磁同步电机可通过合适的控制算法实现高精度控制[4-5]。通常，永磁同步电机采用矢量控制（Field Oriented Control，FOC），同时结合系统制动需求，通过夹紧力-转速-电流三闭环控制方式，并结合空间矢量脉冲宽度调制（Space Vector Pulse Width Modulation，SVPWM）方法实现EMB系统制动力的精确控制[6-7]。

防抱死制动系统（Anti-lock Braking System，ABS）不仅需具有高可靠性和高稳定性，同时需具备强抗干扰和快速响应能力，但其控制算法复杂度较高，限制了系统的响应速度，且传统的控制算法对工况的适应性较差。为此，针对防抱死制动控制这一非线性控制问题，滑模控制（Sliding Mode Control，SMC）以其对系统参数不确定性和外部扰动的强鲁棒性、有限时间内的快速响应收敛特性、较强的适应性和物理实现简单等优点，已在防抱死制动控制中得到应用[8-10]。但现阶段的研究主要集中于乘用车液压制动或线控制动，商用车EMB系统的防抱死制动滑模控制台架测试验证相关研究较少。

对于整车制动控制，由于EMB系统每个制动模块均可独立控制，本文采用单轮ABS模型建立车辆模型，通过建立ABS滑模控制器模型、EMB系统制动电机矢量控制模型及TruckSim车辆模型，在仿真环境下验证ABS控制器和EMB制动电机控制器的有效性，并通过台架测试其控制性能。

2 EMB系统模型的建立

2.1 车辆模型

本文对车辆制动过程进行受力分析，并忽略滚动阻力、空气阻力等对制动过程的影响，单轮模型受力情况如图1所示，整车动力学方程为：

$$m\dot{u}=-F_x \tag{1}$$

车轮动力学方程为：

$$I\cdot\dot{\omega}=F_x\cdot r_0-T_\mu \tag{2}$$

对于纵向制动力，有：

$$F_x=\mu\cdot F_Z \tag{3}$$

式中：m为单轮模型车体质量，u为纵向速度，F_x为纵向制动力，I为车轮转动惯量，ω为车轮角速度，T_μ为制动力矩，r_0为车轮半径，μ为路面附着系数，F_Z为地面对车轮的法向反作用力。

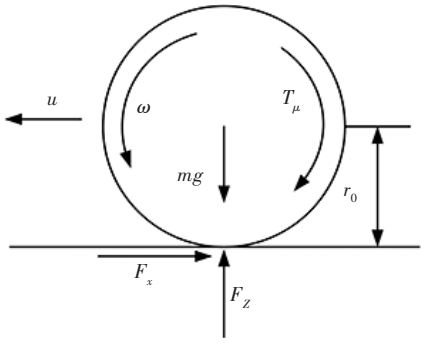


图1 单轮车辆模型

2.2 EMB轮端模块模型

EMB轮端模块选用浮动盘式制动器，电机通过减速增扭机构和运动转换机构实现制动，如图2所示。本文建立的EMB轮端模块包括驱动电机模型、传动机构模型及盘式制动器模型。

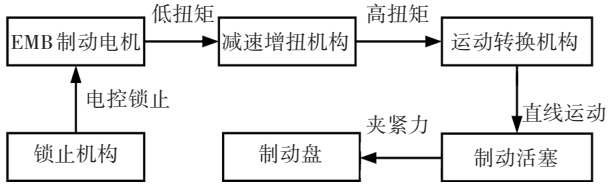


图2 EMB轮端模块原理

2.2.1 制动电机模型

选用永磁同步电机作为EMB轮端模块制动电机。在电机建模过程中作如下假设[11]：

a. 电机三相定子绕组A、B、C在空间对称分布，各相电流所产生的磁势及永磁磁势在气隙空间中正弦分布，忽略磁场的高次谐波分量；

b. 磁饱和及铁心损耗（磁滞、涡流）忽略不计；

c. 电机定子绕组的反电动势为正弦波，转子与定子绕组之间的互感是转子位置角的正弦函数；

d. 不考虑温度、频率等的变化对电机参数的影响。

在满足上述假设的条件下，永磁同步电机三相绕组的电压平衡方程为：

$$\begin{bmatrix}u_a\\u_b\\u_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r_s&&\\&r_s&\\&&r_s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{bmatrix}+\Delta\begin{bmatrix}L&M&M\\M&L&M\\M&M&L\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{bmatrix}+\Delta\begin{bmatrix}e_a\\e_b\\e_c\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：u_a、u_b、u_c分别为定子A、B、C相绕组电压，r_s为定子相电阻，i_a、i_b、i_c分别为定子A、B、C相绕组电流，e_a、e_b、e_c分别为定子A、B、C相绕组感应电动势，L为每相绕组的自感，M为各相绕组间的互感，$\Delta=\frac{d}{dt}$为微分算子。

将三相静止坐标系下PMSM的数学模型经过克

拉克（Clark）变换和帕克（Park）变换后，即得到d-q坐标系下的PMSM数学模型，电压与磁链的关系为：

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \dfrac{\mathrm{d}\psi_d}{\mathrm{d}t} - \psi_q\omega_\mathrm{e} \\ u_q = Ri_q + \dfrac{\mathrm{d}\psi_q}{\mathrm{d}t} + \psi_d\omega_\mathrm{e} \end{cases} \tag{5}$$

式中：u_d、u_q分别为d轴、q轴的电压，i_d、i_q分别为d轴、q轴的电流，ψ_d、ψ_q分别为d轴、q轴的磁链，L_d、L_q分别为d轴、q轴的电感，R为定子电阻，ω_e为电机的电角速度。

基于d-q坐标系的电磁转矩为：

$$T_\mathrm{e} = \frac{3}{2}P\left[\psi_\mathrm{f}i_q + \left(L_d - L_q\right)i_d i_q\right] \tag{6}$$

式中：P为极对数，ψ_f为转子磁链。

2.2.2　传动机构模型

EMB系统的传动机构主要包括行星齿轮减速器、直齿轮减速器和增扭机构。为了简化模型，将传动机构表达为：

$$i_0 = i_1 i_2 \eta \tag{7}$$

式中：i_0为传动机构的总传动比，i_1、i_2分别为行星齿轮组、直齿轮组的传动比，η为机械效率。

2.2.3　制动器模型

制动时，制动片夹紧制动盘，通过摩擦产生制动力矩。制动器输出的制动力矩为：

$$T_\mathrm{b} = FDC\eta_1/2 \tag{8}$$

式中：F为制动电机在制动活塞处产生的推力，D为制动盘直径，C为摩擦因数，η_1为制动器效率。

3　EMB系统防抱死制动控制器设计

防抱死制动控制器基于车辆滑移率实时计算目标制动力矩，并发送至EMB制动电机控制器，通过传动比、机械效率等参数换算为目标夹紧力，采用夹紧力-转速-电流三闭环的矢量控制实现防抱死制动控制功能。

3.1　EMB制动电机控制器设计

基于夹紧力-转速-电流三闭环控制的需求，设计PI控制器分别对三环进行控制[12-13]，如图3所示。图中，F_Target为目标夹紧力，F_Real为夹紧力传感器采集的实际夹紧力，R_Target为目标转速，R_Real为编码器采集到的实际转速，I_Target为目标电流，I_Real为实际电流，U_Target为目标电压。

电流PI控制器输出电枢电压，经Park反变换后通过SVPWM调整输出制动电机三相控制电压，实现对EMB制动电机的控制，并通过编码器和夹紧力传感器将电机转速、制动器夹紧力实时反馈至电机控制器，实现系统闭环控制。

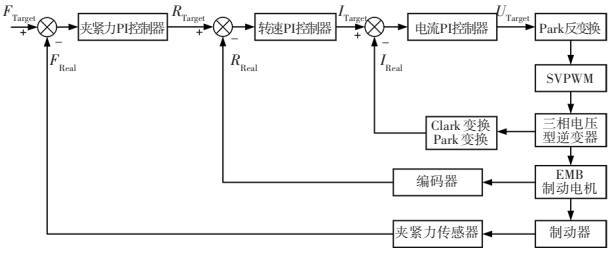


图3　EMB制动电机三闭环控制

对于夹紧力PI控制器、转速PI控制器和电流PI控制器，有：

$$\begin{cases} R_\mathrm{Target} = k_\mathrm{pF}e_\mathrm{F}(t) + k_\mathrm{iF}\displaystyle\int_0^t e_\mathrm{F}(t)\mathrm{d}t \\ I_\mathrm{Target} = k_\mathrm{pR}e_\mathrm{R}(t) + k_\mathrm{iR}\displaystyle\int_0^t e_\mathrm{R}(t)\mathrm{d}t \\ U_\mathrm{Target} = k_\mathrm{pI}e_\mathrm{I}(t) + k_\mathrm{iI}\displaystyle\int_0^t e_\mathrm{I}(t)\mathrm{d}t \end{cases} \tag{9}$$

式中：k_pF、k_iF分别为夹紧力PI控制器的比例系数、积分系数，k_pR、k_iR分别为转速PI控制器的比例系数、积分系数，k_pI、k_iI分别为电流PI控制器的比例系数、积分系数，e_F=F_Target-F_Real为夹紧力误差，e_R=R_Target-R_Real为转速误差，e_I=I_Target-I_Real为电流误差。

3.2　防抱死制动滑模控制器设计

基于单轮车辆模型，以滑移率为控制目标设计防抱死制动滑模控制器，如图4所示。

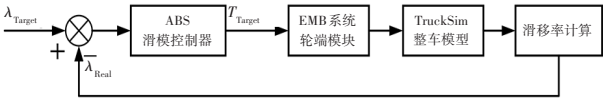


图4　EMB系统防抱死制动滑模控制框图

由图4可知，防抱死制动滑模控制器的输入为目标滑移率λ_Target与实际滑移率λ_Real的差值，通过控制器输出目标制动力矩T_Target至EMB系统，并计算目标制动力F_Target，输入至EMB系统制动电机控制器，以实现实际滑移率对目标滑移率的跟随控制。

本文设定车辆运行在干沥青路面，路面附着系数约为0.8，在ABS触发时，λ_Target=0.18，并通过ABS控制使车辆实际滑移率维持在0.18左右。滑移率的计算公式为：

$$\lambda_\mathrm{Real} = \frac{u - r_0\omega}{u} \times 100\% \tag{10}$$

对于滑模控制，选取切换函数为：

$$S(x,t) = ce = c\left(\lambda_\mathrm{Real} - \lambda_\mathrm{Target}\right) \tag{11}$$

式中：c为大于0的常数，e为跟踪误差。

滑模控制的本质是将位于任意位置的系统初

始状态导入滑模区域，并控制在滑模面上。但对于EMB系统，由于机械结构的摩擦滞回、控制信号的传输延迟等，系统状态滑模面存在抖振现象。为缩短到达滑模面的时间，同时降低系统抖振，本文采用双幂次趋近律为车轮制动力矩 T_{Target} 设计控制律[14-15]，其表达式为：

$$\dot{S}=-k_1|S|^{\alpha}\operatorname{sgn}(S)-k_2|S|^{\beta}\operatorname{sgn}(S) \tag{12}$$

式中：$\alpha>1$，$0<\beta<1$，$k_1>0$，$k_2>0$。

已知 $\lambda_{Target}=0.18$，对式(10)，可有：

$$\dot{\lambda}_{Real}=\frac{\dot{u}\cdot(1-\lambda_{Real})-r_0\cdot\dot{\omega}}{u} \tag{13}$$

将式(1)和式(2)带入式(13)中，有：

$$\dot{\lambda}_{Real}=-\frac{1}{u}\left[\frac{F_x}{m}\cdot(1-\lambda_{Real})+\frac{r_0^2\cdot F_x}{I}\right]+\frac{r_0\cdot T_\mu}{u\cdot I} \tag{14}$$

将式(14)代入式(12)，得到目标制动力矩 T_{Target}：

$$\begin{aligned}T_{Target}&=\frac{F_x}{m}\cdot\frac{I}{r_0}\cdot(1-\lambda_{Real})+r_0\cdot F_x-\frac{u\cdot I}{c\cdot r_0}\cdot\\&\left[k_1|S|^{\alpha}\operatorname{sgn}(S)+k_2|S|^{\beta}\operatorname{sgn}(S)\right]\\&=T_\mu-\frac{u\cdot I}{c\cdot r_0}\cdot\left[k_1|S|^{\alpha}\operatorname{sgn}(S)+k_2|S|^{\beta}\operatorname{sgn}(S)\right]\end{aligned} \tag{15}$$

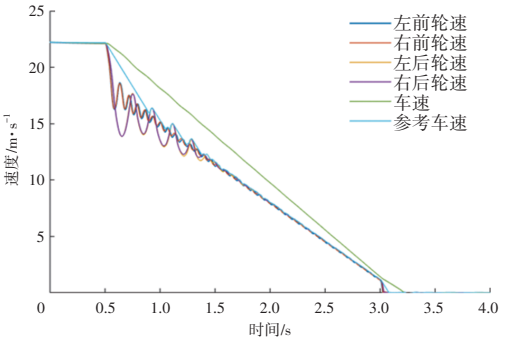
4 仿真测试分析

本文在TruckSim中建立整车模型，在MATLAB/Simulink中建立EMB制动电机控制器和防抱死制动滑模控制器。通过联合仿真对控制器相关参数进行迭代优化，验证算法的控制效果。TruckSim整车参数如表1所示，仿真工况为高附着系数路面(μ=0.8)和对接路面(0.8/0.4)，初始车速为80 km/h，ABS控制使能车速≥5 km/h。

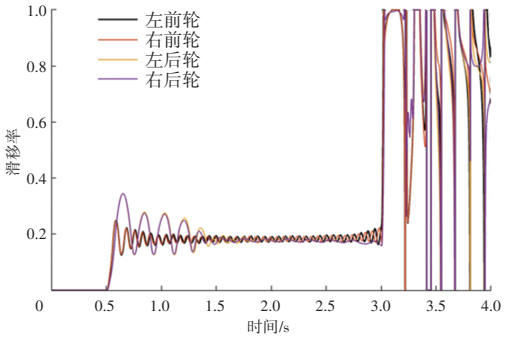
表1 TruckSim整车参数

参数	取值
簧载质量/kg	6 300
车轮转动惯量/J·kg·m^{-2}	15.6
车轮滚动半径/m	0.51

图5所示为配备EMB系统的整车在高附着系数路面触发防抱死制动功能后的轮速-TruckSim车速-参考车速曲线和滑移率曲线；图6所示为整车在对接路面(0.8/0.4)触发防抱死制动功能后的轮速-TruckSim车速-参考车速曲线和滑移率曲线。防抱死制动功能触发后，图5、图6中4个车轮的轮速波动小，制动一致性良好，同时滑移率能够控制在0.18左右，且在制动全过程中稳定性高，满足防抱死制动的控制需求。

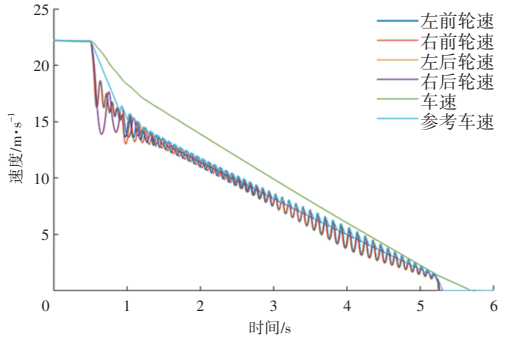


(a)车速-参考车速-轮速曲线

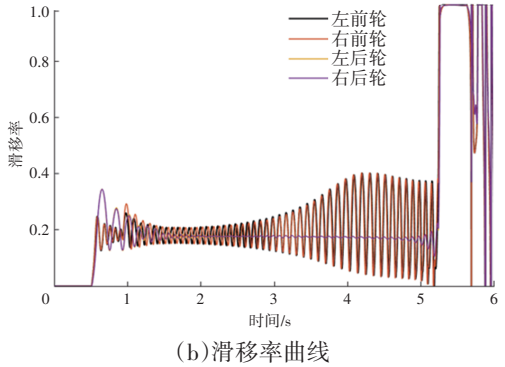


(b)滑移率曲线

图5 高附着系数路面防抱死制动控制曲线



(a)车速-参考车速-轮速曲线



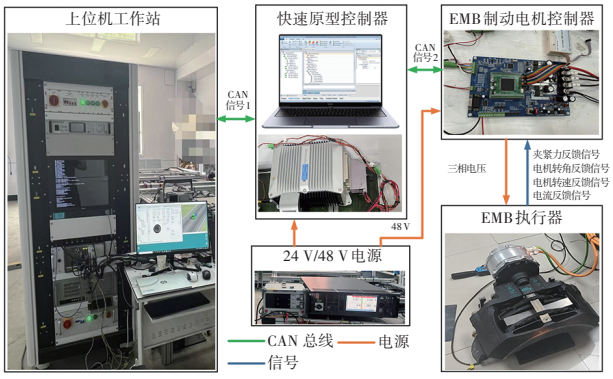
(b)滑移率曲线

图6 对接路面防抱死制动控制曲线

5 硬件在环测试

在联合仿真验证通过后，设计EMB系统硬件在环台架测试方案，如图7所示：在上位机中运行TruckSim车辆模型；将防抱死制动滑模控制器下载

至快速原型中；将EMB制动电机控制器下载至电机控制板中；上位机、快速原型和电机控制板通过CAN通信传输相关信号。硬件在环台架测试用例与联合仿真用例保持一致。

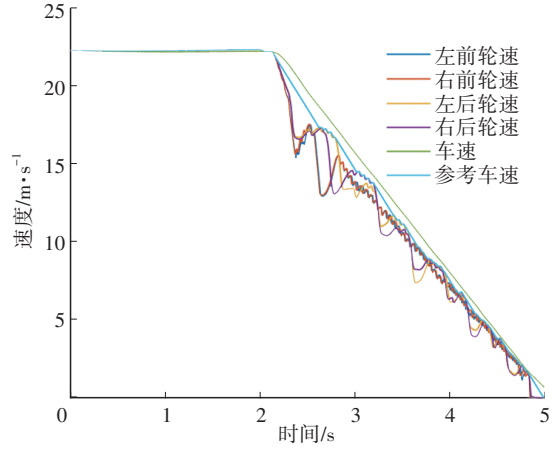


CAN信号1：车速信号、轮速信号（至快速原型控制器）；实时夹紧力（至上位机工作站）

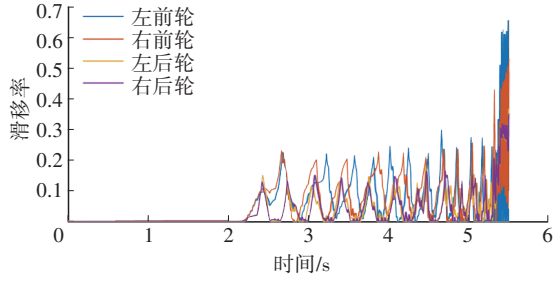
CAN信号2：夹紧力反馈信号（至快速原型控制器）；目标夹紧力（至EMB制动电机控制器）

图7　硬件在环测试台架架构

如图8和图9所示，在台架测试中，轮速和车速变化趋势与仿真结果基本一致，轮速波动较小；由于实际EMB系统轮端模块中机械结构与模型存在差异，在实际滑移率跟随目标滑移率过程中，其与仿真结果存在一定差异，但能够很好地将滑移率控制在目标值附近，能够满足防抱死制动控制需求。

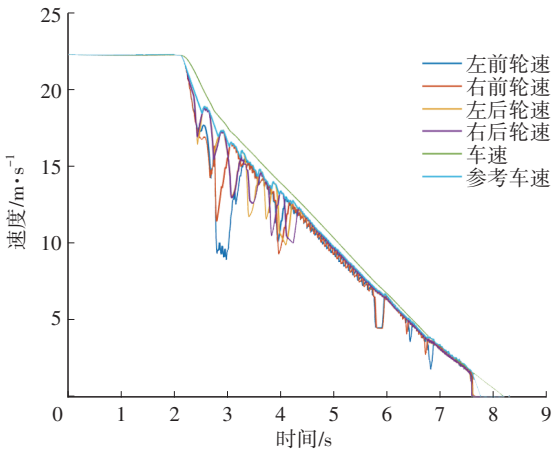


（a）车速-参考车速-轮速曲线

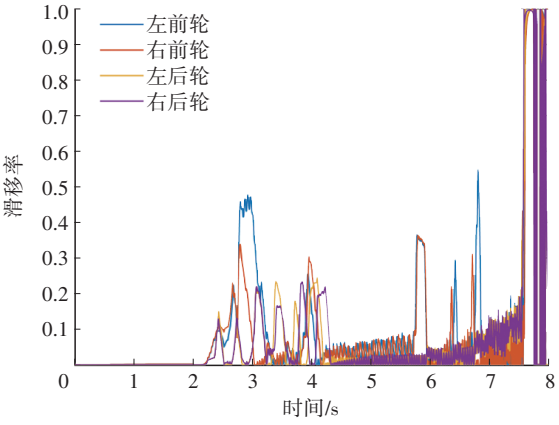


（b）滑移率曲线

图8　EMB系统硬件在环高附着系数路面测试曲线



（a）车速-参考车速-轮速曲线



（b）滑移率曲线

图9　EMB系统硬件在环对接路面测试曲线

6　结束语

本文对EMB系统防抱死制动控制展开研究，设计了EMB系统制动电机控制器和防抱死制动滑模控制器。对于EMB系统，在假设能获取制动盘夹紧力的前提下，设计了夹紧力-转速-电流三闭环电机矢量控制器；对于防抱死制动控制，建立了单轮车辆模型，并基于模型实时滑移率设计了滑模控制器。在TruckSim中建立车辆模型，通过联合仿真，验证了EMB系统制动电机控制器和防抱死制动滑模控制器的控制效果；同时，建立EMB系统硬件在环台架测试系统，验证了EMB系统制动电机控制器和防抱死制动滑模控制器的控制效果，滑移率能够很好地保持在目标值附近，控制曲线满足防抱死制动需求。

参　考　文　献

[1] LI C C, ZHUO G R, TANG C, et al. A Review of Electro-Mechanical Brake (EMB) System: Structure, Control and Application[J]. Sustainability, 2023, 15(5).

[2] MENG B M, YANG F F, LIU J G, et al. A Survey of Brake-by-Wire System for Intelligent Connected Electric Vehicles [J]. IEEE Access, 2020, 8: 225424-225436.

[3] 宋瑞琦. 商用车电子机械制动系统设计与控制策略研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
SONG R Q. Research on Design and Control Strategy of Electromechanical Braking System of Commercial Vehicle [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.

[4] BAEK S K, OH H K, KIM S W, et al. A Clamping Force Performance Evaluation of the Electro Mechanical Brake Using PMSM[J]. Energies, 2018, 11(11).

[5] 牟希东. 面向动力学控制的电子机械制动系统控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
MOU X D. Research on Control Strategy of Electromechanical Brake System for Dynamic Control[D]. Changchun: Jilin University, 2021.

[6] LI J, WANG M C, HE R, et al. A Design of Electromechanical Brake System Triple-Loop Controllers Using Frequency Domain Method Based on Bode Plote[C]// Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE). Changchun, China: IEEE, 2011: 795-798.

[7] 熊璐, 李聪聪, 卓桂荣, 等. 电子机械制动器构型及控制技术发展现状[J]. 汽车工程, 2023, 45(12): 2187-2199+2250.
XIONG L, LI C C, ZHUO G R, et al. Review on Electro-Mechanical Brake Structure and Control Technology[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(12): 2187-2199+2250.

[8] SABANOVIC A. Variable Structure Systems with Sliding Modes in Motion Control—A Survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(2): 212-223.

[9] HSU C F, KUO T C. Adaptive Exponential-Reaching Sliding-Mode Control for Antilock Braking Systems[J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 77(3): 993-1010.

[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).

[11] 袁雷, 胡冰新, 魏克银, 等. 现代永磁同步电机控制原理及MATLAB仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
YUAN L, HU B X, WEI K Y, et al. Control Principle and MATLAB Simulation of Modern Permanent Magnet Synchronous Motors[M]. Beijing: Beihang University Press, 2016.

[12] LI Y J, SHIM T, SHIN D H, et al. Effective Clamping Force Control for Electromechanical Brake System[C]// 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Boston, MA, USA: IEEE, 2020: 643-648.

[13] 王振. 电子机械制动系统控制策略设计与仿真研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
WANG Z. Design and Simulation of Control Strategy for Electro-Mechanical Braking System[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.

[14] 刘金琨. 滑模变结构控制MATLAB仿真: 基本理论与设计方法[M]. 4版. 北京: 清华大学出版社, 2019.
LIU J K. Sliding Mode Control Design and MATLAB Simulation: The Basic Theory and Design Method[M]. 4th Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.

[15] KANG Z J, YU H G, LI C C. Variable-Parameter Double-Power Reaching Law Sliding Mode Control Method[J]. Automatika, 2020, 61(3): 345-351.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2026年4月13日。