

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107483

一种附着系数实时可调的汽车制动模拟试验台 设计、分析与实验研究^{*}

王道明¹, 董 涛¹, 邵文彬¹, 訾 斌¹, 陈无畏²

(1. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009; 2. 合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230009)

摘 要: 为了实现车辆制动模拟试验中附着系数的准确模拟和实时可调, 设计了一种汽车制动模拟试验台, 通过控制磁粉离合器励磁电流, 实时模拟不同路面附着系数; 搭建了基于路面识别的单轮车辆制动系统仿真模型, 进行了单一路面和跃变路面下的制动仿真; 研制了车辆制动模拟实验系统, 开展了单一路面下汽车制动模拟实验和跃变路面下附着系数跟踪控制实验。研究表明, 在湿沥青路面上以 120 km/h 初速度制动时, 相比于基于固定目标滑移率, 基于路面识别的最佳滑移率下的制动距离缩短了 3.1%, 且在低附着路面下更为明显; 单一路面下制动时车速和轮速的实验值与仿真值基本吻合; 跃变路面下附着系数最大跟踪误差仅为 6.2%, 跟踪控制效果良好。

关键词: 汽车制动模拟试验台; 路面附着系数; 实时模拟; 路面识别

中图分类号: U463.5 TH113 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.15

Design, analysis and experiment of an automobile braking simulation test-bench with real-time adjustable adhesion coefficient

Wang Daoming¹, Dong Tao¹, Shao Wenbin¹, Zi Bin¹, Chen Wuwei²

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to realize accurate simulation and real-time adjustment of the road surface adhesion coefficient (RSAC) during vehicle braking simulation test, an automobile braking simulation test-bench (ABSTB) was designed which is capable of simulating different RSACs in real time by controlling the excitation current of an magnetic powder clutch. Then, a simulation model of a single-wheel automobile braking system based on road surface recognition (RSR) was built, and braking simulations were performed under the single road surface and the jumping road surface, respectively. An experimental system for the automobile braking simulation was developed to carry out the automobile braking simulation experiment on a single road surface and the tracking control experiment of the RSAC under the jumping road surface, respectively. Research results show that the braking distance reduces by 3.1% under the RSR-based optimal slip ratio condition compared with that under the fixed target slip ratio condition for braking on the wet asphalt road surface at an initial speed of 120 km/h. The phenomenon becomes more obvious under the road surface with a low RSAC. Moreover, experimental values of vehicle speed and wheel speed basically consist with simulation values under the single road surface. The maximum tracking error of the RSAC is only 6.2%, which proves that the tracking control effect is satisfactory under the jumping road surface condition.

Keywords: automobile braking simulation test-bench; road surface adhesion coefficient; real-time simulation; road surface recognition

0 引 言

随着车辆朝低碳化、电气化和智能化方向发展^[1-2],

其子系统的功能和性能亟待提升。制动系统对于车辆安全驾驶起着至关重要的作用。目前, 在全世界备受关注的智能汽车中, 线控制动系统已成为其最重要的子系统之一^[3-6]。道路试验是评价制动系统性能最直接、最有效

收稿日期: 2021-02-05 Received Date: 2021-02-05

^{*} 基金项目: 安徽省自然科学基金(2008085ME140)、国家自然科学基金(51505114)项目资助

的方法,但由于路试法存在对环境敏感度较高、试验数据可比性较差、成本高等不足,而且当制动出现问题时,难以快速找出问题的根源^[4]。因此,路试法一般用于目标车辆的制动性能试验,而不适合用于新产品的开发阶段。相比于路试法,制动模拟试验不仅可以解决路试法成本高、安全性差、重复性差等问题,而且可以精准测量车速、轮速、制动力矩、制动器温度等一系列参数,目前已成为检测车辆制动系统性能的主要方法。

车辆制动模拟试验台包含平板式、反力滚筒式和惯性式等^[7-9]。美国、德国、意大利等发达国家的技术水平较高,其产品已形成规范化、标准化。如德国 Schenck 公司研制的惯性式制动模拟试验台,通过调整惯性飞轮组的组合方式来实现汽车不同平动动能的模拟^[10],可同时检测两个制动器的制动性能;美国 Link 公司推出的 NVH3900 型电惯量式制动模拟试验台,由飞轮组转动惯量模拟部分汽车平动惯量,其余平动惯量由变频器控制电机来模拟^[11]。我国车辆制动模拟研究起步较晚,但也取得了一定的成果。如文献[12]研制了一种平板式制动台架,可对制动力和制动激励等参数进行实时检测;文献[13]研制了一种滚筒式汽车防抱死制动系统(anti-lock braking system, ABS)试验台,可以检测各轮的制动力矩以及轮胎与整车的阻滞力等参数,但没有考虑路面附着系数实时变化的问题;文献[14]研究了一种 1/4 车辆制动模拟试验台,通过改变扭矩控制器的电流模拟不同轮胎-路面附着系数。

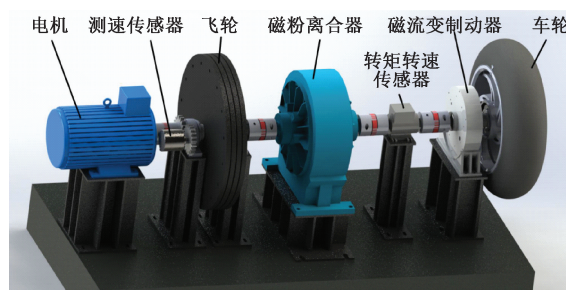
路面附着系数作为汽车制动控制过程中的重要参数,其准确性极大地影响制动控制的效果^[15]。因此,为了模拟汽车制动过程中复杂的路面情况,需要实现路面附着系数的准确模拟和实时可调。本文首先设计了一种附着系数实时可调的汽车制动模拟试验台,通过控制磁粉离合器的励磁电流,实现不同路面附着系数的实时模拟;其次基于 Simulink 软件搭建了基于路面识别的单轮车辆制动仿真模型,分别进行了单一路面条件下和跃变路面条件下的制动仿真,分析对比了基于固定目标滑移率下和基于路面识别的最佳滑移率下的制动效果;最后搭建了车辆制动模拟实验系统,分别开展了磁粉离合器的标定实验、单一路面下汽车制动模拟实验和跃变路面下附着系数的跟踪控制实验。研究成果可为复杂路面条件下汽车制动器性能评估及最优制动力精确控制等研究提供基础。

1 汽车制动模拟试验台设计

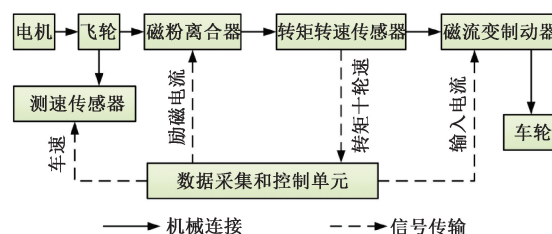
1.1 试验台结构和原理

图 1 是所设计车辆制动模拟试验台,主要由电机、飞轮、磁粉离合器、磁流变制动器、车轮、转矩转速传感器、

测速传感器、数据采集与控制单元等组成。其中,电机驱动飞轮转动,飞轮储存转动动能用于等效车辆平动动能,飞轮转速模拟车速,磁粉离合器传递力矩模拟地面制动力矩,磁流变制动器制动力矩模拟车轮制动力矩,转矩转速传感器用于测量磁粉离合器传递力矩和制动过程中轮速变化,测速传感器用于测量车速。



(a) 机械结构组成
(a) Mechanical structural composition



(b) 工作原理
(b) Operating principle

图 1 汽车制动模拟试验台

Fig. 1 Automobile braking simulation test-bench

试验台的工作过程是:向磁粉离合器施加适当电流,由电机提供一定初始速度,通过联轴器和传动轴带动飞轮和轮胎同步转动,转矩转速传感器和测速传感器分别实时检测车轮和飞轮的转速,当车轮线速度达到试验制动初速度时,向磁流变制动器发送制动信号,由数据采集和控制单元实时采集飞轮和车轮的转速信号,同时控制磁粉离合器器的励磁电流以调节其传递力矩。整个过程持续循环,直至飞轮停止转动。

1.2 主要参数计算

车辆行驶动能包括车辆平移和旋转部件转动产生的动能,由于旋转部件产生的动能相比于平移产生的动能非常小,只计入车轮旋转产生的动能。本试验台用于模拟 1/4 车辆的后轮制动试验,在制动开始瞬间,系统总动能 W 等于单个后轮制动器所对应车辆质量产生的平动动能和单个后轮的旋转动能之和,其表达式为:

$$W = \frac{1}{2} m_b v^2 + \frac{1}{2} J_t \omega_t^2 \quad (1)$$

式中: m_b 为单个后轮制动器所对应车辆质量; v 为车辆速度; J_t 为车轮转动惯量; ω_t 为车轮角速度。

根据 QC/T 564—2018《乘用车行车制动器性能要求

及台架试验方法》^[16],汽车满载情况下以 4.41 m/s^2 (0.45 g) 制动减速度进行制动时,单个后轮制动器所对应车辆质量 m_b 为:

$$m_b = \frac{m_a(a - 0.45h)}{2L} \quad (2)$$

式中: m_a 为汽车满载总质量; L 为汽车轴距; h 为汽车满载时重心高度; a 为重心至前轴距离。

在制动模拟试验台上,飞轮转动惯量是用于模拟车辆在道路上制动时的平动惯量,则飞轮和车轮储存的总动能 W' 可表示为:

$$W' = \frac{1}{2}J_b\omega_b^2 + \frac{1}{2}J_t\omega_t^2 \quad (3)$$

式中: J_b 为飞轮转动惯量; ω_b 为飞轮角速度。

由于 $W = W'$, 则:

$$m_b v^2 = J_b \omega_b^2 \quad (4)$$

由于车速是通过飞轮转速来模拟的,则车速 $v = \omega_b r$ 。将其代入式(4),可得所需飞轮转动惯量为:

$$J_b = m_b r^2 \quad (5)$$

式中: r 为车轮滚动半径。

以五菱之光某款微型卡车作为目标车辆,其主要参数如表1所示。

表1 目标车型主要参数

Table 1 Main parameters of the target vehicle types

车身参数	数值
汽车满载总质量 m_a/kg	1 850
汽车轴距 L/m	2.95
重心至前轴距离 a/m	1.79
汽车满载时重心高度 h/m	0.71
车轮滚动半径 r/m	0.29

本试验台按照实物 1:2 比例缩小,根据式(5),计算得该车型的试验转动惯量为 $19.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。在设计惯性飞轮时,设定其半径 $r_b = 0.34 \text{ m}$,选取材料 HT200,则飞轮质量 m_f 和厚度 B_f 可由下式得到:

$$\begin{cases} m_f = \frac{2J_b}{r_b^2} \\ B_f = \frac{m_f}{\pi\rho_b r_b^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ρ_b 为飞轮材料密度。

考虑飞轮动平衡和安装要求,设计 4 个厚度为 0.03 m 的飞轮共同组成惯性飞轮组。

根据驱动飞轮及其它旋转部件所需功率选取电机型号。本文设定车速在 30 s 内达到最高值 80 km/h ,则试验台主轴转速 n 为:

$$n = 2.65V_s/r \quad (7)$$

式中: V_s 为试验车速, km/h 。

其最大角加速度 $\alpha_{\max}$ 为:

$$\alpha_{\max} = \omega_s/t = \pi n/30t \quad (8)$$

则试验台产生的最大扭矩 T_s 为:

$$T_s = J_b \alpha_{\max} \quad (9)$$

设试验台总传动效率为 0.8,则电机最大功率 P 为:

$$P = \frac{T_s n}{9\,550 \times 0.8} \quad (10)$$

根据电机最大功率,选定 Y132M1-4 型三相异步电机作为该试验台的动力源。

磁粉离合器的机械特性是指当励磁电流和主动转子转速不变时,传递力矩与从动转子转速间的关系。如图2所示,当励磁电流为 I_1 、负载扭矩小于 T_1 时,主、从动转子间的接合力足够大,两者同步转动,对应车轮纯滚动状态;当负载扭矩处于 T_1 和 T_2 之间时,虽然磁粉离合器可以传递力矩,但从动转子转速低于主动转子转速,离合器处于滑差状态,对应车轮边滚边滑状态;当负载扭矩大于 T_2 时,从动转子承受的负载力矩高于磁粉离合器传递力矩,当从动转子转速为 0 时,处于制动状态,对应车轮抱死滑移状态。

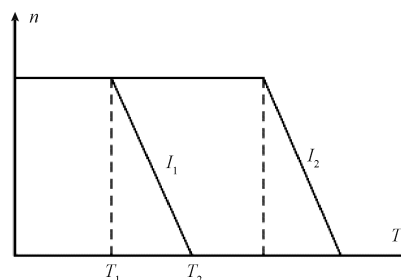


图2 磁粉离合器的机械特性

Fig. 2 Mechanical characteristics of the magnetic powder clutch

2 仿真研究

2.1 单轮车辆制动模型

汽车制动时轮胎的受力状况对制动性能有着直接影响。忽略轮胎滚动阻力和空气阻力,并作如下假设:1)各轮胎半径和所受载荷相等;2)轮胎不发生形变;3)路面平整;4)车辆只有纵向运动而无侧向运动。图3为单轮车辆制动受力示意图。图3中, F_x 为地面制动力, F_z 为轮胎垂直方向上地面的反作用力, T_b 为制动器制动力矩, v_t 为车轮线速度, ω_t 为车轮角速度。

车轮只受到制动器制动力矩 T_b 和地面制动力矩 $F_x r$ 的作用,地面制动力矩是导致汽车停止的最主要阻力,故

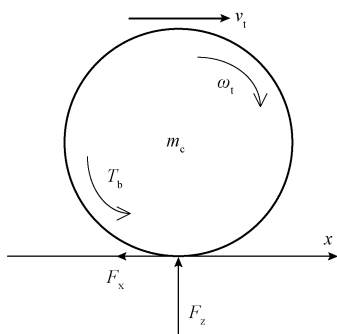


图 3 单轮车辆制动受力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of braking force for a single-wheel vehicle

单轮车辆制动动力学方程为:

$$\begin{cases} J_t \dot{\omega}_t = F_x r - T_b \\ m_c \dot{v}_t = -F_x \\ F_x = \mu F_z \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\dot{v}_t$ 为车轮加速度; $\dot{\omega}_t$ 为车轮角加速度; m_c 为单轮车辆总质量, 即 $m_c = m_b + m_t$ (m_t 为轮胎质量); μ 为路面附着系数。

如图 4 所示, 磁粉离合器的主动转子连接飞轮, 其传递力矩 T 使飞轮产生制动, 则:

$$T = J_b \dot{\omega}_b \quad (12)$$

式中: $\dot{\omega}_b$ 为飞轮角加速度。

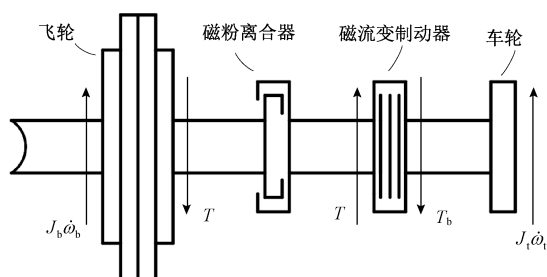


图 4 汽车制动模拟试验台受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the force for the automobile braking simulation test-bench

磁粉离合器的从动转子连接磁流变制动器和车轮, 车轮在磁粉离合器传递力矩 T 和磁流变制动器制动力矩 T_b 共同作用下转动, 则:

$$T = J_t \dot{\omega}_t + T_b \quad (13)$$

结合式 (11) 和 (13), 可得:

$$\mu = \frac{T}{F_z r} = \frac{T}{(m_b + m_t) g r} \quad (14)$$

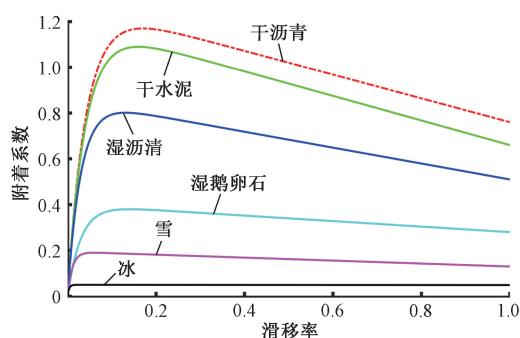
因此, 在汽车载重量一定的情况下, 通过控制磁粉离合器的传递力矩 T 即可改变路面附着系数 μ , 从而模拟不同附着条件的路面。

2.2 轮胎模型

轮胎是连接车辆与路面的重要部件, 其与路面间的作用力直接影响车辆运动状态, 因此建立合适轮胎模型对车辆制动动力学研究非常重要。常用 Burckhardt 模型是通过大量实验拟合出各种典型路面附着系数 μ 和轮胎滑移率 s 之间的关系 (即 $\mu(s)$ 曲线), 其表达式为:

$$\begin{cases} \mu(s) = c_1 (1 - e^{-c_2 s}) - c_3 s \\ s_0 = \frac{1}{c_2} \ln \frac{c_1 c_2}{c_3} \\ \mu_0 = c_1 - \frac{c_3}{c_2} \left(1 + \ln \frac{c_1 c_2}{c_3} \right) \end{cases} \quad (15)$$

式中: c_1, c_2, c_3 为各种典型路面的参数值; s_0, μ_0 分别为各种典型路面的最佳滑移率和峰值附着系数。6 种典型路面的 $\mu(s)$ 曲线如图 5 所示。

图 5 6 种典型路面的 $\mu(s)$ 曲线Fig. 5 $\mu(s)$ curves of six typical road surfaces

2.3 磁流变制动器模型

磁流变制动器以磁流变液为制动介质, 通过调节输入电流即可实现运动机械的可控制动^[17], 具有响应快、控制能耗低、工作部件磨损小等优点^[18-21]。本文测得磁流变制动器不同输入电流下的制动力矩如图 6 所示, 并以此作为辨识数据, 利用 MATLAB 系统辨识工具箱求得磁流变制动器输入电流-制动力矩的传递函数 $G(s)$ 为:

$$G(s) = \frac{34.3571(1 + 36.6788s)}{(1 + 3.4814s)(1 + 1.1708s)(1 + 2.4936s)} \quad (16)$$

2.4 ABS 控制器模型

ABS 控制器模型有逻辑门限控制、模糊控制、比例-积分-微分 (proportional-integral-derivative, PID) 控制、Bang-Bang 控制等。考虑到 PID 控制鲁棒性好、结构简单、可靠性高且调节方便, 本文选用 PID 作为 ABS 控制器, 其基本原理为: 以期望滑移率为控制目标, 根据传感器采集的车速和轮速信号, 计算得车轮实际滑移率, 并将

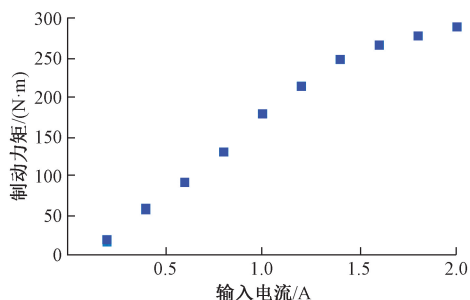


图6 磁流变制动器不同输入电流下的制动力矩

Fig. 6 Braking torques of the magnetorheological brake under different input currents

其与期望滑移率比较,得出滑移率偏差;利用PID控制器调节磁流变制动器的输入电流,从而改变制动力矩,滑移率偏差也相应变化,反复调节PID的控制参数,最终使实际滑移率始终处于最佳滑移率附近,保障制动效果达到最佳。

2.5 路面识别模型

由于不同路面条件对应不同最佳滑移率,以冰、雪、湿鹅卵石、湿沥青、干水泥、干沥青等6种典型路面为研究对象,设计一种如图7所示的路面识别算法。

2.6 基于路面识别的单轮车辆制动仿真模型

图8(a)和(b)分别是基于路面识别的车辆制动模拟试验台仿真模型的原理图和Simulink仿真模型,主要包括单轮车辆制动模型、轮胎模型、磁流变制动器模型、ABS控制器模型和路面识别模型等。车轮运动状态由磁流变制动器的制动力矩和磁粉离合器的传递力矩共同决定。将车速和轮速作为输入信号:一方面输入滑移率计算模型,得到实际滑移率后分别输入ABS控制器模型和

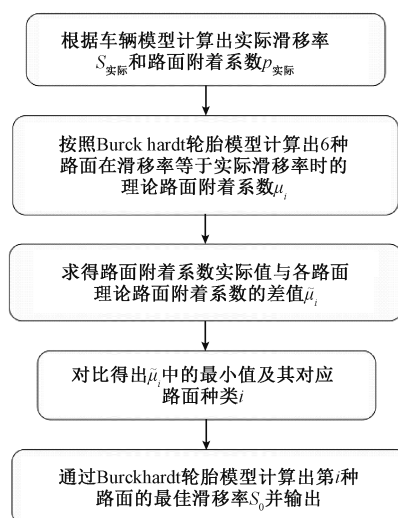


图7 路面识别算法流程

Fig. 7 Flow of the road surface recognition algorithm

轮胎模型,根据轮胎模型中滑移率与路面附着系数的关系计算得路面附着系数,再将其输入路面附着系数模拟模块,根据路面附着系数与传递力矩的关系计算得传递力矩,根据输出扭矩与励磁电流的关系计算得所需励磁电流输入控制单元;另一方面与轮胎模型中计算得的路面附着系数共同输入路面识别模块,估算出当前路面最佳滑移率,以此作为期望滑移率输入ABS控制器模型,与实际滑移率构成偏差,由ABS控制器计算得制动力矩调整值反馈至磁流变制动器模型,根据磁流变制动器模型中的输入电流与制动力矩关系,得到输入电流调整值输入控制单元,以达到ABS制动控制的目的。

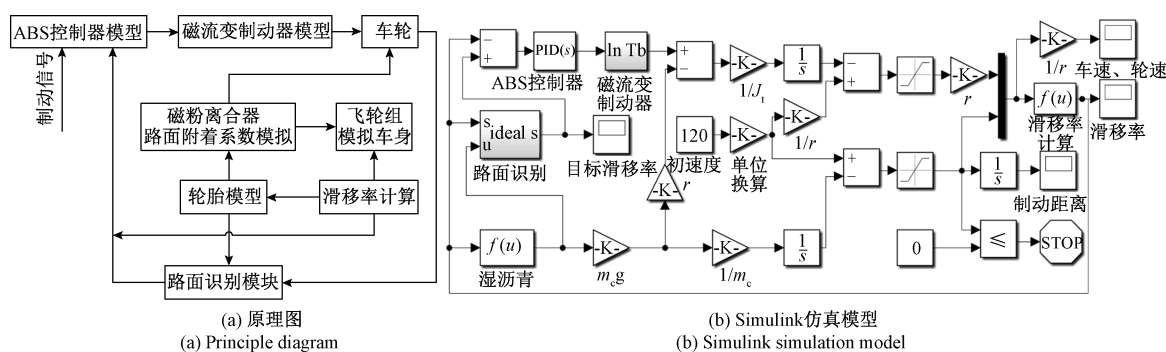


图8 基于路面识别的车辆制动模拟试验台仿真模型

Fig. 8 Simulation model of the road surface recognition-based automobile braking simulation test-bench

2.7 仿真结果分析与讨论

为了验证路面识别算法和ABS控制策略的有效性,在下述两种工况下进行制动仿真:1)单一路面条件下制

动仿真,分别选取湿沥青、湿鹅卵石和雪等3种路面;2)跃变路面条件下制动仿真,选取湿沥青→雪→湿鹅卵石的跃变路面。



1) 单一路面条件下制动仿真

在表 2 中的初始条件下进行制动仿真,为了更贴合实际工况,在湿沥青、湿鹅卵石和雪等 3 种路面上的制动初速度分别设定为 120、90 和 60 km/h。图 9 所示为单一

路面条件下基于固定目标滑移率($s_0 = 0.2$)下和基于路面识别的最佳滑移率下的车速、轮速、滑移率对比曲线和路面识别结果。

表 2 单一路面条件下的制动仿真初始条件及结果

Table 2 Initial conditions and results of the braking simulation under the single road surface condition

		路面条件	湿沥青	湿鹅卵石	雪
初始 条件		最佳滑移率	0.13	0.14	0.06
		峰值附着系数	0.800 0	0.380 0	0.190 7
		制动初速度/(km·h ⁻¹)	120	90	60
仿真 结果	制动时间/s	基于固定目标滑移率(<i>s</i> ₀ = 0.2)	4.35	6.80	9.37
		基于路面识别的最佳滑移率	4.27	6.72	8.97
	制动距离/m	基于固定目标滑移率(<i>s</i> ₀ = 0.2)	72.83	88.40	80.19
		基于路面识别的最佳滑移率	70.66	84.19	75.04

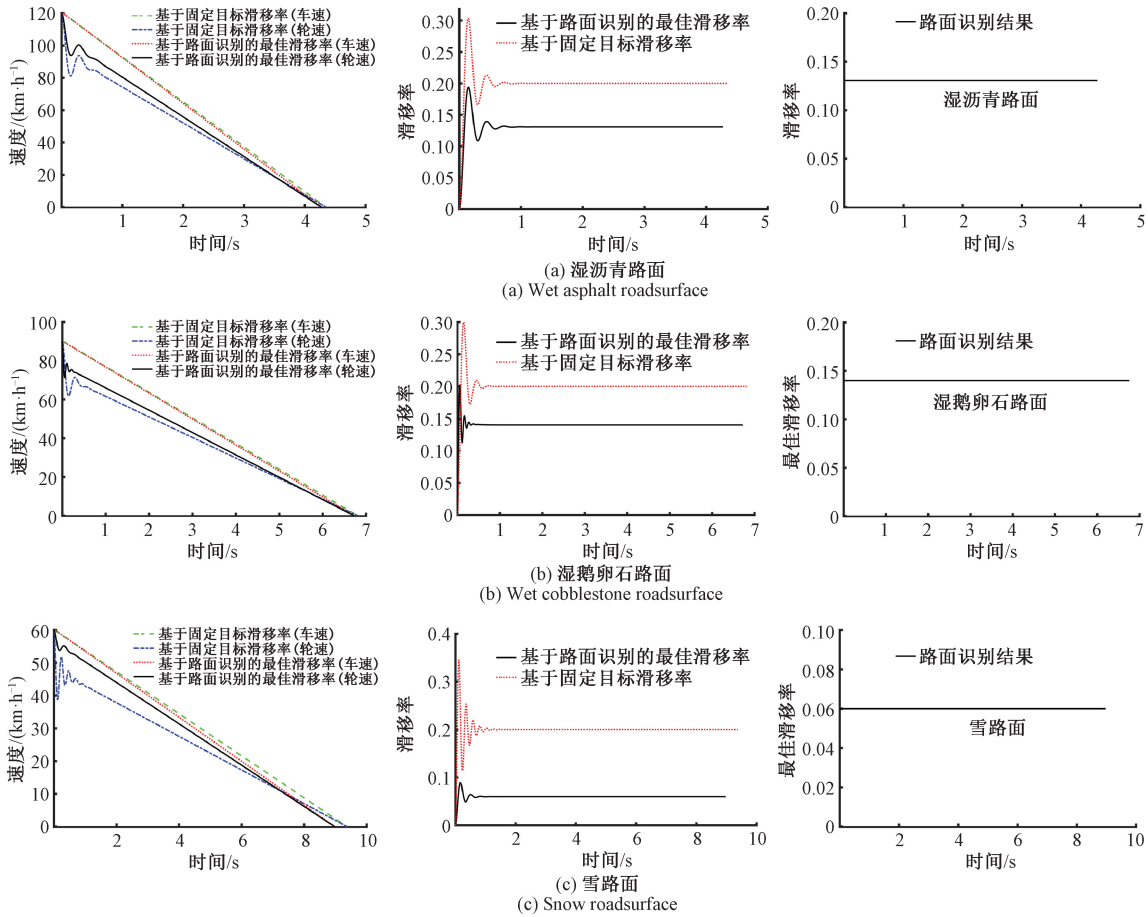


图 9 单一路面条件下的制动仿真结果

Fig. 9 Results of the braking simulation under the single road surface condition

结果表明:基于路面识别的最佳滑移率下的仿真系统以路面峰值附着系数为控制目标,能够保障实际滑移

率快速稳定在最佳值附近,从而充分利用极限路面附着条件。在相同制动初速度下,相比于基于固定目标滑移

率下的仿真结果,其制动时间和制动距离均明显降低。具体来说,在湿沥青、湿鹅卵石、雪3种路面条件下,制动时间分别缩短了1.9%、1.2%和4.5%,而制动距离则相应分别降低了3.1%、5.0%和6.9%。此外,随着路面附着系数的降低,尽管仿真时设定的制动初速度减小,但制动距离的下降比率却逐渐增加,表明了低附着路面条件下基于路面识别的最佳滑移率下仿真模型的优势更为明显。

2) 跃变路面条件下制动仿真

实际制动过程中,汽车所在路面的附着系数可能会发生变化,即为跃变路面制动工况。该工况下需首先进行路面识别,再根据识别结果实时调整最佳滑移率,从而提高跃变路面工况下的制动性能。

将轮胎模块更换为图10所示的模型,即可实现跃变路面下制动仿真。设置制动初速度为90 km/h,仿真前预设路面为湿沥青路面,2 s后跃变为雪路面,再过2 s后跃变为湿鹅卵石路面。图11所示为跃变路面条件下基于固定目标滑移率($s_0=0.2$)下和基于路面识别的最佳滑移率下车速、轮速、滑移率对比曲线和路面识别结果。

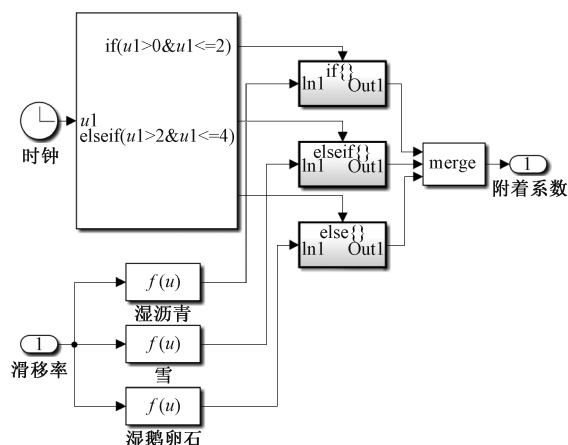
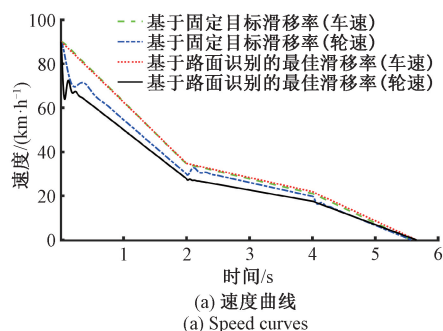
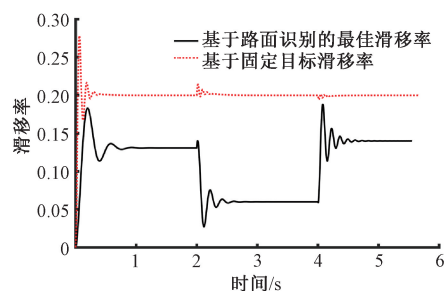


图10 跃变路面条件下轮胎模型模块

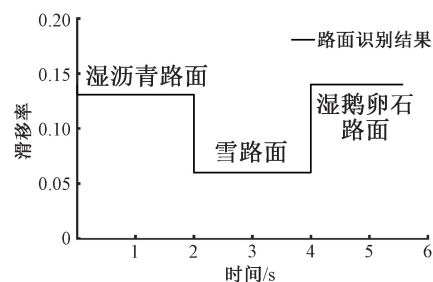
Fig. 10 Tire model module under the jumping road surface condition



(a) 速度曲线
(a) Speed curves



(b) 滑移率曲线
(b) Slip ratio curves



(c) 路面识别结果
(c) Road surface recognition results

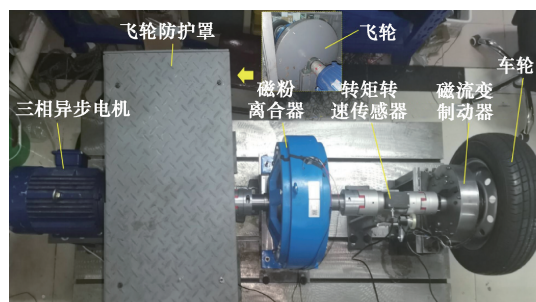
图11 跃变路面条件下的制动仿真结果

Fig. 11 Results of the braking simulation under the jumping road surface condition

由图可见:路面识别算法的实时性较好,当汽车由湿沥青路面行驶到雪路面,再到湿鹅卵石路面后,能够快速准确地识别出跃变后的路面状态,并且迅速跟踪相应路面的最佳滑移率,使得汽车在不同路面制动时始终保持在当前路面的峰值附着系数附近,提高了制动性能,缩短了制动距离。当驾驶员发出制动信号后车速减小直至完全停止,基于路面识别的最佳滑移率下的制动时间为5.5 s、制动距离为54.92 m,相比于基于固定目标滑移率下分别减少了1.8%和6.6%。

3 实验研究

图12所示为搭建的车辆制动模拟实验系统,采用单端惯性飞轮模拟方式。其中,图12(a)为机械传动装置实物图,主要由三相异步电机、飞轮、磁粉离合器、转矩转速传感器、磁流变制动器、车轮、测速传感器以及多个连接和支承装置组成;图12(b)为数据采集与控制系统实物图,主控制板选用74HC244板卡,其拥有8路模拟量/数字量(analog/digital, A/D)采集输入、4路计数功能和4路脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号输出。实际控制时通过改变PWM信号占空比来调节磁粉离合器的励磁电流。



(a) 机械传动装置
(a) Mechanical transmission devices



(b) 数据采集与控制系统
(b) Data acquisition and control system

图 12 车辆制动模拟实验系统

Fig. 12 Experimental system for the automobile braking simulation

3.1 磁粉离合器的标定实验

磁粉离合器主、从动转子间的传递力矩与励磁电流的关系是准确模拟路面附着系数的关键。为了保障测试精度,需要先对磁粉离合器的静态参数进行标定。标定实验中,电机作为动力源连接磁粉离合器的主动转子,磁粉离合器的从动转子通过扭矩传感器连接磁流变制动器。实验测得励磁电流由 0→1 A(每隔 0.1 A 为一组),磁粉离合器的传递力矩与励磁电流的关系如图 13 所示。由图可见:传递力矩 T 与励磁电流 I 之间近似呈线性关系。经过拟合,得出两者的关系式为:

$$I = 0.003\,921\,T - 0.054\,59 \quad (17)$$

式中:拟合结果中有一个常数,这是由实验装置传动结构和磁粉离合器的自身摩擦所致。

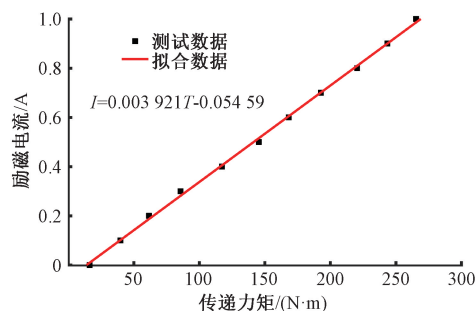


图 13 磁粉离合器标定实验结果

Fig. 13 Results of the calibration experiment for the magnetic powder clutch

3.2 单一路面下汽车制动模拟实验

选取雪路面条件下进行汽车制动模拟实验,具体实验步骤为:1)实验前,将磁粉离合器空转 3 min 使磁粉充分搅匀;2)将电机转速调至 40 km/h,程控电源为磁流变制动器输入 5 A 电流,以提供足够大的力矩使磁粉离合器从动转子端完全制动;3)待转速稳定后,运行上位机中的 Labview 程序,采集实验数据。

图 14 所示为汽车在雪路面上制动时车速、轮速的实验值与仿真值对比,实验中制动初速度设为 60 km/h 时。由图可见:实际制动过程中,车速和轮速的下降过程中均存在一定程度的波动,这主要是由 ABS 控制特性导致,总体上实验值与仿真值的下降趋势基本吻合,这也证明了 2.7 节中仿真的正确性。

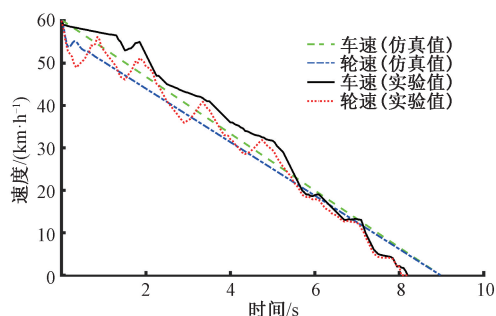


图 14 汽车在雪路面上制动时车速、轮速的实验值与仿真值

Fig. 14 Experiment values and simulation values of vehicle speed and wheel speed during automobile braking on snow road surface

3.3 跃变路面下附着系数的跟踪控制实验

选取湿沥青→雪→湿鹅卵的跃变路面条件下,进行附着系数的跟踪控制实验,以时间 t 为输入量、PWM 信号占空比 d 为输出量,其设计流程如图 15 所示。首先,根据路面附着系数随时间变化曲线,拟合得到路面附着系数 μ 与时间 t 的关系式;其次,加入式(14)中路面附着系数 μ 与传递力矩 T 的关系式;再次,根据磁粉离合器标定实验数据,拟合得到励磁电流 I 与传递力矩 T 的关系式;最后,考虑到实际控制时通过改变 PWM 信号占空比来调节励磁电流,拟合得到 PWM 信号占空比 d 与励磁电流 I 的关系式。

根据选取跃变路面条件下预期滑移率的变化曲线,通过轮胎模型计算得路面附着系数和磁粉离合器励磁电流的变化,将期望值和实验值进行对比,结果如图 16 所示。实验中,制动初速度为 40 km/h。由图可见:整个跟踪控制过程中,附着系数的实验值存在较小幅度的波动,其与理论值之间的最大误差发生在 2.19 s,最大误差值仅为 6.2%,而在路面附着系数突变的时间点上,实验值与期望值相比有很小的滞后,滞后时间在 60 ms 以内,

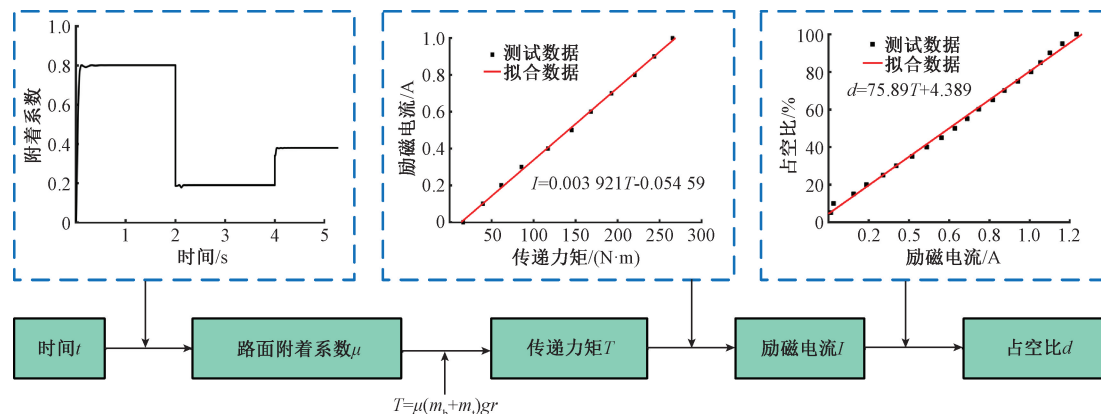


图15 路面附着系数跟踪控制算法流程

Fig. 15 Flow of the road surface adhesion coefficient tracking control algorithm

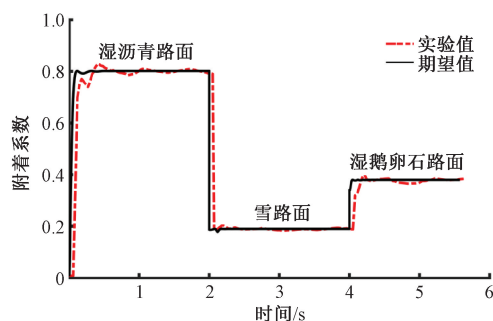


图16 跃变路面下附着系数实验值与期望值对比

Fig. 16 Comparison of experimental values and desired ones for the road surface adhesion coefficient under the jumping road surface condition

由此可见实验值总体上基本符合期望值的变化趋势,跟踪控制效果良好。分析上述现象主要是由于数据拟合误差、实验中使用传感器的测量误差以及控制算法运行时间等因素导致的。

4 结 论

本文设计了一种附着系数实时可调的汽车制动模拟试验台,通过控制磁粉离合器的传递力矩模拟变化的路面制动力矩,从而实现路面附着系数的精确模拟和实时可调。运用 Simulink 软件搭建了基于路面识别的单轮车辆制动仿真模型,分别进行了单一路面条件下和跃变路面条件下的制动仿真,仿真结果表明,相比于基于固定目标滑移率($s_0=0.2$)下的仿真结果,所建立的基于路面识别的最佳滑移率下仿真模型的制动距离明显降低,并且在低附着路面条件下优势更为明显。具体来说,在湿沥青、湿鹅卵石和雪等3种路面条件下,制动时间分别缩短了1.9%、1.2%和4.5%,制动距离则分别降低了3.1%、

5.0%和6.9%;而在跃变路面条件下,所提出的路面识别算法能够快速准确地识别出跃变后的路面状态。通过开展单一路面下汽车制动模拟实验和跃变路面下附着系数的跟踪控制实验。结果表明,在单一路面下制动时,车速和轮速的实验值与仿真值基本吻合,证明了仿真的正确性;在跃变路面下,附着系数的实验值存在较小幅度的波动,其与期望值的最大误差仅为6.2%,而在附着系数突变的时间点上,实验值存在很小的滞后,滞后时间在60 ms 以内,总体上实验值基本符合期望值的变化趋势,表明其跟踪控制效果良好。

参考文献

- [1] 郑少武,李巍华,胡坚耀. 基于激光点云与图像信息融合的交通环境车辆检测[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 143-151.
ZHEN SH W, LI W H, HU J Y. Vehicle detection in the traffic environment based on the fusion of laser point cloud and image information [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 143-151.
- [2] 孙子杰,姜国凯,丁一夫,等. 偏心修正智能网联车辆天线性能测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 41-49.
SUN Z J, JIANG G K, DING Y F, et al. Research on measurement method of eccentricity correction intelligent communication vehicles antenna performance [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(12): 41-49.
- [3] 陈志成,吴坚,赵健,等. 混合线控系统制动力精确调节控制策略[J]. 汽车工程, 2018, 40(4): 457-464.
CHEN ZH CH, WU J, ZHAO J, et al. Control strategy for accurate adjustment of braking force in hybrid brake



- by wire system [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(4): 457-464.
- [4] LIAO Z CH, BAI X X, LI Y, et al. Design, modeling, and verification of a test bench for braking simulation of 1/4 vehicle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D- Journal of Automobile Engineering, 2020, 234(5): 1425-1441.
- [5] WANG X Y, WU X H, CHENG SH, et al. Design and experiment of control architecture and adaptive dual-loop controller for brake-by-wire system with an electric booster [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(3): 1236-1252.
- [6] PAUL D, VELENIS E, HUMBERT F, et al. Tyre-road friction μ -estimation based on braking force distribution[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D- Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(8): 2030-2047.
- [7] 王昕灿, 郑燕萍, 吕立亚. 基于 LabVIEW 的林业车辆制动试验台检测系统研发[J]. 林业工程学报, 2016, 1(3): 103-108.
- WANG X C, ZHEN Y P, LYU L Y. Research on braking performance test bench for forestry vehicle based on LabVIEW[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(3): 103-108.
- [8] GUAN H, WANG B, LU P P, et al. Identification of maximum road friction coefficient and optimal slip ratio based on road type recognition[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(5): 1018-1026.
- [9] 姚胜利, 韦泽富, 张康康, 等. 平板式汽车制动试验台设计[J]. 汽车实用技术, 2020(12): 41-46.
- YAO SH L, WEI Z F, ZHANG K K, et al. Design of braking test bench for automobile flat brake [J]. Automobile Applied Technology, 2020(12): 41-46.
- [10] 杨志伟. 汽车制动台架的设计、构建、试验、数据处理及分析[D]. 淄博: 山东理工大学, 2017.
- YANG ZH W. Design, construction, test, data processing and analysis of automobile braking bench[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2017.
- [11] ZHANG J H, SUN W CH, LIU ZH Y, et al. Comfort braking control for brake-by-wire vehicles [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 133: 106255.
- [12] 吴晓东, 唐先智. 基于制动轨迹的汽车制动性能检测技术研究[J]. 交通标准化, 2009(1): 130-133.
- WU X D, TANG X ZH. Automobile's brake performance test technology based on brake trajectory [J]. Communications Standardization, 2009(1): 130-133.
- [13] 刘少林, 许沧粟, 黄德中. 汽车 ABS 滚筒式惯性检测台架的设计[J]. 机电工程, 2004(6): 16-20.
- LIU SH L, XU C S, HUANG D ZH. Design of the vehicle's ABS rolling drum inert testing bench [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2004(6): 16-20.
- [14] 李洋. 一种 1/4 车辆制动模拟实验台架的原理设计与实验验证[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- LI Y. Principle design and experimental verification of a test bench for simulation of vehicle braking of 1/4 vehicle[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [15] 熊璐, 金达, 冷搏, 等. 考虑复杂激励条件的分布式驱动电动汽车路面附着系数自适应估计方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18): 123-133.
- XIONG L, JIN D, LEN B, et al. Adaptive tire-road friction estimation method for distributed drive electric vehicles considering multiple road excitations [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(18): 123-133.
- [16] 全国汽车标准化技术委员会. 乘用车行车制动器性能要求及台架试验方法: QC/T 564-2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- National Technical Committee of Auto Standardization. Performance requirements and test methods for passenger car service brake: QC/T 564-2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [17] 李军强, 赵蕾, 秦成功, 等. 用于坡路助行的主/被动转矩实现方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 84-91.
- LI J Q, ZHAO L, QIN CH G, et al. Study on the method of implementing active/passive torque for walking assistant on slopes [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 84-91.
- [18] 王道明, 姚兰, 邵文彬, 等. 汽车磁流变液制动器温度特性仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 100-107.
- WANG D M, YAO L, SHAO W B, et al. Simulation and experimental study on temperature characteristics of magnetorheological fluid brake for vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 100-107.
- [19] 高瞻, 宋爱国, 秦欢欢, 等. 蛇形磁路多片式磁流变



液阻尼器设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 821-828.

GAO ZH, SONG AI G, QIN H H, et al. Design of multi-disc MRF damper with serpentine flux path[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 821-828.

[20] WANG D M, WANG Y K, PANG J W, et al. Development and control of an MR brake-based passive force feedback data glove[J]. IEEE Access, 2019, 7: 172477-172488.

[21] WU J, HU H, LI Q T, et al. Simulation and experimental investigation of a multi-pole multi-layer magnetorheological brake with superimposed magnetic fields[J]. Mechatronics, 2020, 65: 102314.

作者简介



王道明 (通信作者), 2009年于中国矿业大学获得学士学位, 2014年于中国矿业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学副教授, 主要研究方向为车辆先进制动技术、磁流变技术及应用。

E-mail: denniswang@hfut.edu.cn

Wang Daoming (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2009 and Ph. D. degree in 2014 both from China University of Mining and Technology. Now, he is an associate professor in Hefei University of Technology. His main research

interests include advanced braking technology of vehicles, magnetorheological technology and application.



董涛, 2017年于安徽工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为车辆线控制动技术。

E-mail: 1099020268@qq.com

Dong Tao received his B. Sc. degree in 2017 from Anhui University of Technology. Now, he is a master student in Hefei University of Technology. His main research interest is brake-by-wire technology of vehicles.



陈无畏, 1978年于合肥工业大学获得学士学位, 1983年于武汉理工大学获得硕士学位, 1999年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获得博士学位, 现为合肥工业大学教授, 主要研究方向为车辆系统动力学与控制。

E-mail: hfgdcjs@126.com

Chen Wuwei received his B. Sc. degree in 1978 from Hefei University of Technology, received his M. Sc. degree in 1983 from Wuhan University of Technology, received his Ph. D. degree in 1999 from Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Now, he is a professor in Hefei University of Technology. His main research interest is vehicle dynamics and control.