

基于磁流变阻尼器的制动踏板感觉模拟器研究

朱奕 宋晖 陈奇 王良健 黄德 方博一

(合肥工业大学 机械工程学院, 合肥 230009)

摘要:【目的】为了解决电子机械制动系统中制动执行器与制动踏板之间无直接机械或液压连接导致无法反馈路感的问题,提出一种基于磁流变阻尼器的制动踏板感觉模拟器。【方法】以Ansys/Maxwell和Matlab/Simulink为平台,分别进行下沉式制动踏板感觉模拟器的结构设计、磁流变阻尼器的结构设计、磁路分析及电磁仿真,并在不同工况下进行了整个系统的传统比例积分微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)及模糊自适应PID控制的仿真分析对比。【结果】仿真结果表明,该制动踏板感觉模拟器能较好地跟踪不同工况下的传统踏板特性曲线,适用性广;相较于传统PID的控制效果,模糊自适应PID控制的控制精度更高、控制误差更小,具有良好的应用前景。

关键词:线控制动;磁流变阻尼器;模糊自适应PID;踏板感觉模拟器

中图分类号:U463.55 **DOI:**10.16578/j.issn.1004.2539.2026.01.004

0 引言

线控制动系统凭借其高效、节能、响应快、布局灵活等特点正逐步成为电动汽车制动技术的主流发展方向。电子机械制动系统通过电子控制制动执行器来实现车辆制动,其制动执行器与制动踏板之间无直接机械或液压连接,驾驶员无法感知传统的制动踏板感觉。因此,有必要研发一种应用于电子机械制动系统的新型制动踏板感觉模拟器。该模拟器需精确模拟传统踏板的力与位移特性,为驾驶员营造熟悉且舒适的踏板制动体验,进而提升制动操作的安全性及乘坐的舒适性^[1]。

制动踏板感觉模拟器主要分为不可调控式和可调控式。其中,不可调控式感觉模拟器主要采用弹簧、连杆等元件,在设计参数确定后就表现出一种踏板特性。孙惠萍^[2]设计的多阶弹簧式制动踏板感觉模拟装置就是不可调控式的一种。可调控式感觉模拟器可以通过调控表现出多种踏板特性。德尔福公司的ZEHNDER等^[3]设计了液压元件与主缸一体化集成的制动踏板感觉模拟器。金智林等^[4]提出一种基于单神经元自适应传统比例积分微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)电磁阀控制策略的可调制动踏板感觉模拟器。CHEON^[5]从橡胶的材料性能出发,通

过替换不同种类的橡胶与弹簧组合来模拟多样化的踏板感觉。FLAD等^[6]设计了一种基于同步电动机驱动的主动制动踏板力反馈装置,通过调节电动机输出转矩实现可调的制动踏板感觉模拟。随着智能材料——磁流变液的兴起,磁流变阻尼器在变阻尼调控上的应用逐渐推广开来。美国的德尔福科技公司巧妙地利用磁流变阻尼器产生的可控阻尼力,把圆柱形磁流变阻尼器应用到制动踏板感觉模拟装置^[7]的研究上。王奎洋等^[8]提出一种活塞式的磁流变液制动踏板感觉模拟器。於亚文^{[9]18-20}设计了一种单盘式磁流变阻尼器,并将其用作踏板感觉模拟装置的反馈力执行元件,提高了踏板反馈力的控制精度,但其控制误差还有降低空间。

深入研究上述几种制动踏板感觉模拟器发现,大多数使用弹簧、连杆机构的制动踏板感觉模拟器结构复杂、计算烦琐且无法实现性能的可调节性;采用更换橡胶来调节制动特性的制动踏板感觉模拟器操作烦琐且模拟精度不高;应用液压元件的制动踏板感觉模拟器占地面积大且存在漏液风险。本研究聚焦于某轿车的电子机械制动系统,提出一种基于磁流变阻尼器的踏板感觉模拟器方案。通过设计下沉式制动踏板感觉模拟器来提高结构集成度,利

收稿日期:2024-09-09 修回日期:2024-10-28

基金项目:安徽省重点研究与开发计划项目(JZ2022AKKG0093);校地合作产业创新引导资金项目(JZ2023YDZJ0011)

作者简介:朱奕,女,1997年生,安徽怀宁人,硕士研究生;主要研究方向为机械设计及控制;zy01091231@163.com。

陈奇(通信作者),男,1979年生,安徽合肥人,博士,教授,博士研究生导师;主要研究方向为机械传动及控制,尤其涉及齿轮传动理论及汽车变速器开发;seucq@163.com。

引用格式:朱奕,宋晖,陈奇,等.基于磁流变阻尼器的制动踏板感觉模拟器研究[J].机械传动,2026,50(1):27-31.

ZHU Yi, SONG Hui, CHEN Qi, et al. Research on brake pedal feeling simulator based on magnetorheological dampers[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2026, 50(1): 27-31.

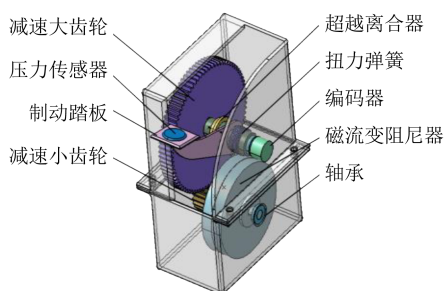


免费获取

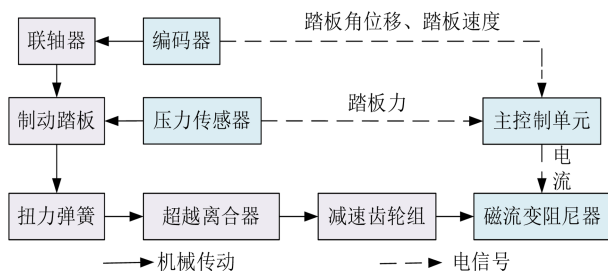
用磁流变阻尼器产生的连续可控阻尼力作为主要的反馈力来确保非线性的踏板感觉模拟,采用模糊自适应PID控制来解决任意踏板感觉可调控的问题。为验证该方案的有效性,依托Ansys/Maxwell与Matlab/Simulink两大仿真平台,构建了仿真模型,进行了相关计算工作,并对该方案进行了分析和验证。

1 制动踏板感觉模拟器的设计

图1(a)所示为该制动踏板感觉模拟器的三维模型。其中,编码器通过弹性联轴器与踏板轴连接;扭力弹簧一端压在踏板下方,另一端固定在外壳上;压力传感器固定在踏板上;踏板轴通过超越离合器与大齿轮轴连接,可以实现动力的接合与分离;小齿轮与磁流变阻尼器同轴。该制动踏板感觉模拟器可下沉式放置,踏板下的外壳挡板起限位的作用。



(a) 三维模型



(b) 制动踏板感觉模拟器信号传递示意图

图1 制动踏板感觉模拟器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the brake pedal feeling simulator structure

如图1(b)所示,在车辆制动过程中,压力传感器监测踏板施加力,同时,编码器捕捉踏板的角位移变化与速度信息;所采集的信号随后被输送至主控制单元,该模块处理完所收到的信息后为磁流变阻尼器提供合适的电流,以调节其产生的阻尼力矩;通过齿轮组的减速增矩作用增强该阻尼力矩并传递至制动踏板。当驾驶员松开踏板时,超越离合器将踏板轴与大齿轮轴分离,制动踏板在扭力弹簧的作用下自动复位。

1.1 踏板感觉模拟器的动力学模型

图2为制动踏板受力图。图2中, P_1 为踏板的初始位置; P_2 为踏板旋转 φ 角度后的位置。在制动踏

板从 P_1 到 P_2 的过程中,忽略摩擦,假设制动踏板匀速转动,则其运动微分方程为

$$T_{MR} = \frac{1}{i} [F_p L \cos \beta + m_p g \frac{L}{2} \cos(\alpha + \varphi) - (C_T \varphi - m_p g \frac{L}{2} \cos \alpha)] \quad (1)$$

式中, T_{MR} 为磁流变阻尼器产生的阻尼力矩; i 为齿轮组的传动比; F_p 为作用在制动踏板上的踏板力; L 为踏板有效长度; β 为踏板面与踏板杆之间的夹角; m_p 为踏板质量; g 为重力加速度; α 为平衡位置时踏板杆与水平方向的夹角; C_T 为扭力弹簧的刚度。

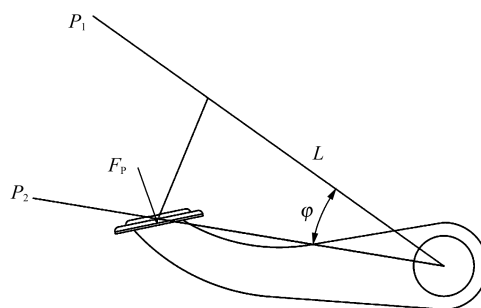


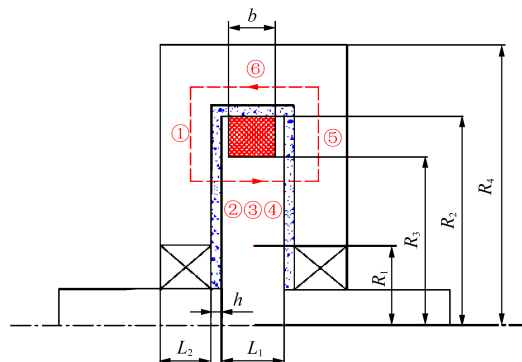
图2 制动踏板受力图

Fig. 2 Force diagram of the brake pedal

设计参数如下:最大制动踏板力为500 N,最大踏板行程为120 mm,踏板有效长度 $L=180$ mm,传动比 $i=4$ 。在图2中, P_1 到 P_2 的极限位置旋转的 $\varphi_{max}=38.94^\circ$,代入其他参数值,则所需磁流变阻尼器的最大阻尼力矩 $T_{MRmax}=17.58$ N·m。

1.2 磁流变阻尼器的设计及仿真

由第1.1节得到的最大阻尼力矩设计出图3所示的磁流变阻尼器。在线圈未通电流时,填充在转子盘与外壳之间的工作间隙中的磁流变液表现出牛顿流体特性,从而产生极小的阻尼力矩。线圈通电之后,工作间隙中会立即产生磁场。磁流变液体中的铁磁颗粒瞬间吸引形成垂直于圆盘的固体结构,并产生较大的阻尼力矩。本研究中磁流变阻尼器采用单盘旋转式。



根据文献[9]²⁷⁻²⁹, 总阻尼力矩 T_{MR} 可表示为

$$T_{MR} = \frac{4}{3} \pi \tau_y (R_2^3 - R_1^3) + \frac{\pi \eta \omega}{h} (R_2^4 - R_1^4) \quad (2)$$

式中, τ_y 为磁流变液的剪切屈服应力; R_2 、 R_1 分别为工作间隙的有效外半径和内半径; ω 为转盘角速度; η 为磁流变液的表现黏度; h 为工作间隙。表现黏度 η 引发的黏性力矩 T_η 受转盘角速度 ω 与工作间隙 h 的影响, 但其在常规操作条件下通常保持在极低的水平。因此, 在实际分析与设计中可以合理忽略 T_η 。

图3中, 红色虚线为磁流变阻尼器的磁路图, 并根据磁力线的走向分为6个部分来计算磁阻。其中, ①与⑤的磁阻相等; ②与④的磁阻相等。

总磁阻 R_m 为

$$R_m = \frac{\ln(R_2 + h) - \ln R_1}{\pi L_2 \mu_2} + \frac{2h}{\pi (R_2^2 - R_1^2) \mu_m} + \frac{L_1}{\pi (R_3^2 - R_1^2) \mu_1} + \frac{2L_2 + 2h + L_1}{\pi [R_4^2 - (R_2 + h)^2] \mu_2} \quad (4)$$

式中, μ_m 、 μ_1 、 μ_2 分别为磁流变液、转子盘、外壳的磁导率; 其他参数如表1所示。

表1 磁流变阻尼器设计参数

Tab. 1 Design parameters of the magnetorheological damper
单位: mm

参数	值
工作间隙的有效内半径 R_1	21
工作间隙的有效外半径 R_2	52
线圈底槽半径 R_3	38
外壳半径 R_4	60
转子盘厚度 L_1	14
外壳厚度 L_2	6.2
线圈槽宽度 b	10
工作间隙 h	1.5

磁流变阻尼器的材料特性显著影响着磁流变阻尼器的工作性能。本研究选用的磁流变液类别为 MRF-J25T, 其剪切屈服应力 τ_y 与磁感应强度 B 之间的关系为

$$\tau_y = 0.113 - 11.76B + 981.6B^2 - 2030B^3 + 1414B^4 \quad (3)$$

式(3)表明, τ_y 完全由 B 决定。

图4所示为 MRF-J25T 型号磁流变液的磁化曲线。由此可得到该磁流变液的饱和磁感应强度的外加磁场值, 并进行磁路设计。

根据文献[10-12], 对磁流变阻尼器进行二维电磁仿真, 其中, 线圈工作电流选用 1.5 A。仿真结果如图5所示。图5(a)中的磁力线均形成闭合回路, 说明设计符合要求。

由图5(b)可知, 最大磁感应强度出现在线圈附

近的转子盘处, 约为 1.58 T, 低于所选材料的饱和磁感应强度 1.65 T。计算式(2)~式(4)得出, 总阻尼力矩 $T_{MR} = 20.14 \text{ N}\cdot\text{m} > T_{MR\max} = 17.58 \text{ N}\cdot\text{m}$, 即磁流变阻尼器的转矩输出达到了设计要求的阻尼力矩。

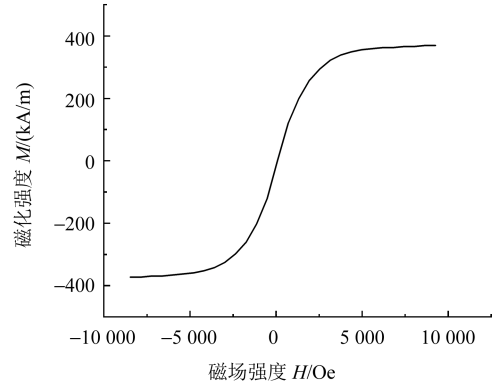
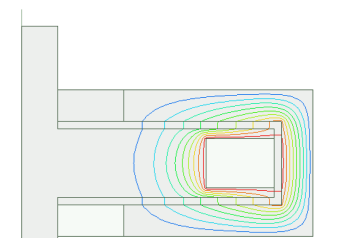
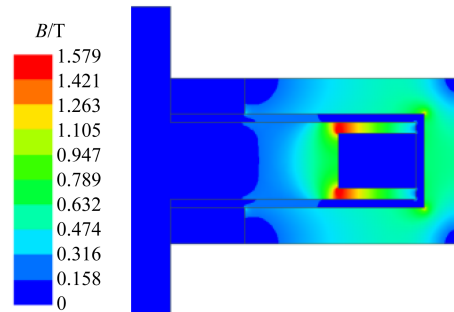


图4 MRF-J25T 型号磁流变液的磁化曲线

Fig. 4 Magnetization curve of the MRF-J25T type magnetorheological fluid



(a) 磁力线分布图



(b) 磁感应强度分布图

图5 磁流变阻尼器

Fig. 5 Magnetorheological damper

2 基于模糊自适应PID控制仿真

本研究的控制策略如图6所示。首先, 通过曲线拟合的方式得到某轿车传统液压踏板特性曲线的回归线方程; 随后, 综合式(1)~式(4)、文献[13-16], 在 Matlab/Simulink 软件中建立制动踏板感觉模拟器的仿真模型。其中, 在 Matlab 软件中的模糊控制器模块, 经过多次调试后确定论域为 $[-10, 10]$, 比例系数 k_p 、积分系数 k_i 、微分系数 k_d 分别为 60、10、0.05。为了验证该制动踏板感觉模拟器是否具

有可调性，对不同工况下的制动踏板特性曲线实施跟踪控制仿真。在确保模糊自适应PID的控制相关内容不变的情况下，输入紧急制动(BPCC 1)、常规

制动(BPCC 2)及低速制动(BPCC 3)的制动踏板特性曲线的拟合方程，得到图7、图8所示的控制效果。

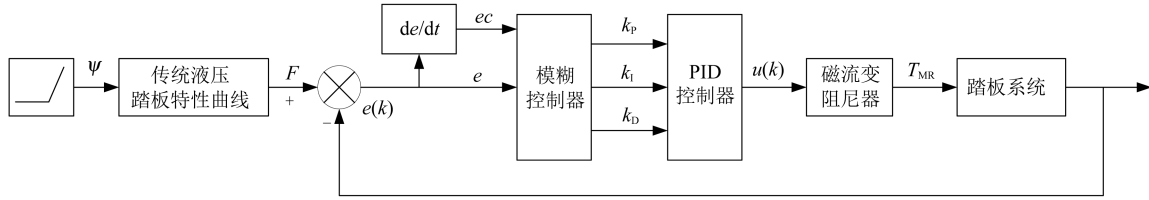


图6 制动踏板感觉模拟器的控制框图

Fig. 6 Control block diagram of the brake pedal feeling simulator

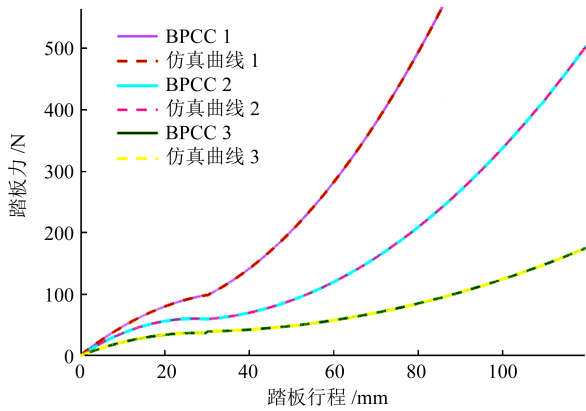


图7 模糊自适应PID的制动踏板感觉模拟

Fig. 7 Simulation of the brake pedal feeling with the fuzzy adaptive PID

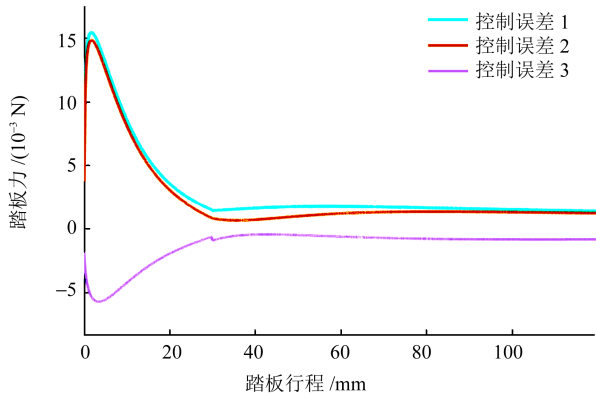


图8 不同工况下模糊自适应PID控制误差分析

Fig. 8 Error analysis of the fuzzy adaptive PID control under different working conditions

由图7可知，在模糊自适应PID的控制下，3种工况下的制动踏板特性曲线几乎都与仿真曲线重合。

图8清晰地展示出模糊自适应PID控制紧急制动、常规制动、低速制动的最大误差，分别为0.016、0.015、0.006 N，并且误差很快降到0左右，控制误差极小。

为进行对比分析，本研究将传统的PID控制方法应用于制动踏板感觉模拟器在3种工况下的踏板特性曲线跟踪控制中。通过多次调试，确定PID控制器的比例系数 $k_p=15$ 、积分系数 $k_i=0.5$ 、微分系数 $k_d=10$ 。

试验结果如图9、图10所示。由图9可知，在保

持这些控制参数恒定的条件下，传统PID控制对BPCC 1的追踪效果较好。而对于BPCC 2与BPCC 3，该控制方法未能实现有效的追踪控制。

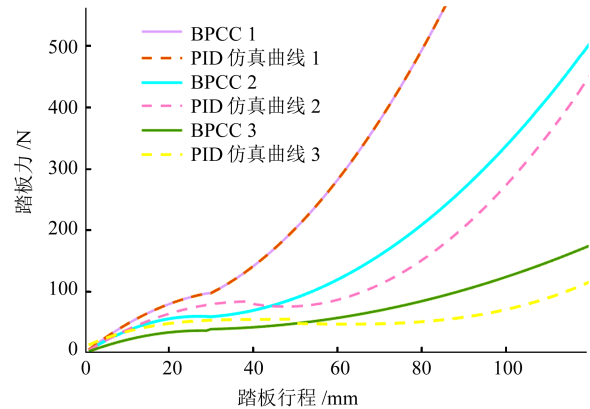


图9 传统PID控制的制动踏板感觉模拟

Fig. 9 Simulation of the brake pedal feeling with the traditional PID control

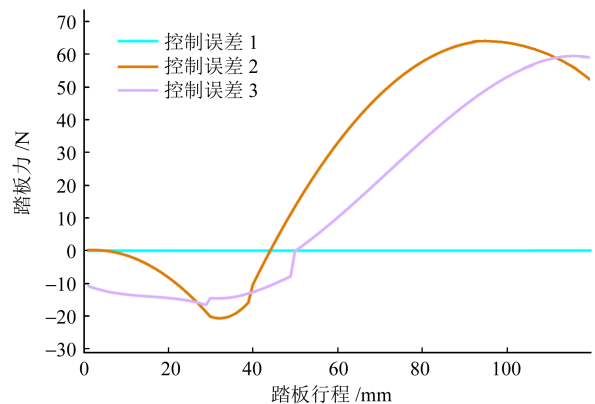


图10 不同工况下传统PID控制误差分析

Fig. 10 Error analysis of the traditional PID control under different working conditions

进一步分析图10可知，在追踪BPCC 2与BPCC 3时，传统PID控制的最大控制误差激增至60 N，显著影响了系统的整体性能。

综上所述可以看出，模糊自适应PID控制方法对不同制动踏板特性曲线的跟踪效果远远高于传统PID控制方法。这是因为模糊自适应PID控制方法能够控制参数的自适应调节，对于任意的目标曲线，模糊自适应PID控制方法都能取得很好的跟踪控制效果。

3 结论

1) 为电子机械制动系统模拟传统的非线性制动踏板感觉,设计了一款基于磁流变阻尼器的制动踏板感觉模拟器。该制动踏板感觉模拟器结构紧凑、制动踏板感觉可调、可靠性强且控制精度高,成功模拟了传统制动踏板的多种制动踏板感觉,并具有良好的通用性,可为线控制动汽车制动踏板感觉模拟器的研究提供一定的参考价值。

2) 单盘旋转式磁流变阻尼器在电流激励下能产生连续可调的阻尼力,这一特性使得所设计的制动踏板感觉模拟器能够成功模拟出非线性的制动踏板力反馈效果,从而提升了模拟的真实性与精确度。

3) 本研究采用可以控制参数自适应调节的模糊自适应PID控制方法,该控制方法比传统PID控制方法的控制精度更高、跟踪效果更好,且面对任意的不同工况下的非线性制动踏板特性曲线均具有广泛的适用性。

4) 与先前相关研究相比,本研究设计的下沉式制动踏板感觉模拟器考虑了其在驾驶舱的位置与安装,为后期实车试验做准备;采用的模糊自适应PID控制方法的控制误差较其他研究更小,具有一定的参考价值。

5) 本研究未考虑到温度对制动踏板感觉模拟器工作性能的影响,后期将加深对这方面的研究。

参 考 文 献

- [1] MENG D J, ZHANG L J, YU Z P. A dynamic model for brake pedal feel analysis in passenger cars[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2016, 230(7):955-968.
- [2] 孙惠萍. 线控制动踏板装置研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014: 18-30.
SUN Huiping. Research of brake-by-wire pedal device [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 18-30.
- [3] ZEHNDRER J W, KANETKAR S S, OSTERDAY C A. Variable rate pedal feel emulator designs for a brake-by-wire system [C]//SAE Technical Paper Series. SAE International, 1999: 881-884.
- [4] 金智林, 郭立书, 赵又群, 等. 踏板感觉可控的汽车制动踏板模拟器研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(12): 2795-2798.
JIN Zhilin, GUO Lishu, ZHAO Youqun, et al. Research on brake pedal emulator of vehicle with controllable pedal feeling [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(12): 2795-2798.
- [5] CHEON J S. Brake by wire system configuration and functions using front EWB (electric wedge brake) and rear EMB (electro-mechanical brake) actuators [C]//SAE Technical Paper Series. SAE International, 2010: 246-259.
- [6] FLAD M, ROTHFUSS S, DIEHM G, et al. Active brake pedal feedback simulator based on electric drive [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems, 2014, 7(1): 189-200.
- [7] SHAW S, BAUMGARTNER E. Magneto-rheological brake pedal feel emulator: 20020108463 [P]. 2002-08-15.
- [8] 王奎洋, 唐金花, 刘成晔, 等. 线控制动系统踏板感觉模拟器的分析与设计 [J]. 机床与液压, 2011, 39(21): 108-111.
WANG Kuiyang, TANG Jinhua, LIU Chengye, et al. Analysis and design on the pedal feeling simulator of brake-by-wire [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(21): 108-111.
- [9] 於亚文. 基于磁流变的制动踏板感觉模拟装置设计与研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2020: 17-59.
YU Yawen. Design and research of brake pedal feeling simulation device based on magneto-rheological [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020: 17-59.
- [10] 陈晓宁, 刘德, 赵玉亮, 等. 磁流变阻尼器结构设计及参数优化研究进展 [J]. 功能材料与器件学报, 2023, 29(2): 61-72.
CHEN Xiaoning, LIU De, ZHAO Yuliang, et al. Analysis of the current status of research on structural design and parameter optimization of magnetorheological dampers [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2023, 29(2): 61-72.
- [11] 徐明. 基于磁流变液阻尼器的力反馈装置设计与研究 [D]. 徐州:中国矿业大学, 2022: 13-52.
XU Ming. Design and research of force feedback device based on magnetorheological fluid damper [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022: 13-52.
- [12] 贾文建, 李阳. 某车型踏板感模拟器设计及验证 [J]. 机械研究与应用, 2021, 34(3): 131-133.
JIA Wenjian, LI Yang. Design and verification of a vehicle pedal sense simulator [J]. Mechanical Research & Application, 2021, 34(3): 131-133.
- [13] 赵剑桥, 严天一, 桂永建, 等. 基于模糊PID的半主动悬架控制策略研究 [J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2023, 38(3): 54-58.
ZHAO Jianqiao, YAN Tianyi, GUI Yongjian, et al. Research on semi-active suspension control strategy based on fuzzy PID [J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2023, 38(3): 54-58.
- [14] 王子含. 基于模糊PID水下航行器运动控制研究 [D]. 青岛:青岛科技大学, 2021: 42-72.
WANG Zihan. Research on motion control of an underwater vehicle based on fuzzy PID [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2021: 42-72.
- [15] 于琪, 张静. 参数在线调整的模糊自适应PID控制研究 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37(3): 119-121.
YU Qi, ZHANG Jing. Research on fuzzy adaptive PID control with online parameter adjustment [J]. Industrial Control Computer, 2024, 37(3): 119-121.
- [16] 李明鹏, 胡俊宏, 智鑫. 飞机起落架自适应模糊神经PID控制方法的研究 [J]. 机床与液压, 2024, 52(1): 51-58.
LI Mingpeng, HU Junhong, ZHI Xin. Research on adaptive fuzzy neural PID control method for aircraft landing gear [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(1): 51-58.

(下转第39页)