

面向新能源汽车的悬架振动 能量回收在线控制方法

郜浩楠^{1,2,3}, 徐俊^{1,2,3}, 蒲晓晖^{1,2,3}, 李士盈^{1,2,3}, 梅雪松^{1,2,3}

(1. 西安交通大学陕西省智能机器人重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造与系统工程
国家重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对目前新能源汽车悬架中阻尼器阻尼调节复杂、能耗大的问题,提出了一种高效的电磁阻尼器阻尼系数在线控制方法,同时实现振动能量的回收。该方法使用由直流电机和滚珠丝杠机构组成的电磁阻尼器,首先设计了基于高频 DC-DC 变换器的阻尼调节电路,通过调节驱动功率场效应晶体管(MOSFET)的脉宽调制(PWM)信号占空比,其输出电压可基于输入电压进行调节;然后在阻尼器工作过程中计算目标电磁转矩,求出达到该参考转矩需要的电枢电流。另一方面,在工作过程中不断采集实际电枢电流,并将该实际电流送至 PI 控制器进行 PI 闭环调节,输出驱动 PWM 信号的占空比;最后由 PWM 控制器以 1 kHz 的调节频率驱动 DC-DC 变换器,实现目标转矩的跟随和能量回收。基于实车的相关参数搭建了 1/4 悬架系统实验台架,实验结果表明,该电磁悬架系统可回收约 184 W 的振动能量,响应速度可达 10 Hz,验证了阻尼系数调节和控制方法的有效性。

关键词: 新能源汽车;电磁悬架阻尼器;在线控制;振动能量回收

中图分类号: TH113.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202004003 **文章编号:** 0253-987X(2020)04-0019-08



OSID 码

An Online Control Method for Energy Recovery of Suspension Vibration of New Energy Vehicles

GAO Haonan^{1,2,3}, XU Jun^{1,2,3}, PU Xiaohui^{1,2,3}, LI Shiying^{1,2,3}, MEI Xuesong^{1,2,3}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Robots, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An efficient online control method of the electromagnetic damper damping coefficient is proposed to deal with the problem that the damping adjustment of damper in suspension of present new energy vehicle is complicated and energy consuming, and the vibration energy is recovered at the same time. The method uses an electromagnetic damper that consists of a DC motor and a ball screw mechanism. First, a damping adjustment circuit based on a high-frequency DC-DC converter is designed. Its output voltage is adjusted based on input voltage by adjusting the duty cycle of the PWM signal that drives the power MOSFET. Then the target electromagnetic torque is calculated during the working process of the damper, and the armature current required to reach the reference torque is calculated. On the other hand, the actual armature current is continuously collected during the working process, and the current is sent to a PI controller for PI closed-loop adjustment to output the duty cycle of the driving PWM signal.

Finally, the PWM controller drives the DC-DC converter at an adjustment frequency of 1 kHz to achieve target torque following and energy recovery. A 1/4 suspension system experimental bench is built based on the relevant parameters of a real vehicle, and the effectiveness of the proposed damping coefficient adjustment and control method is verified. Experimental results show that the electromagnetic suspension system recovers about 184 W of vibration energy, and the response speed is up to 10 Hz.

Keywords: new energy vehicle; electromagnetic suspension damper; online control; vibration energy recovery

近年来,能源和环境问题正变得日益严峻,新能源汽车及汽车节能技术在世界范围内成为研究的焦点^[1-3]。汽车悬架系统用于衰减由路面不平度引起的车身振动和轮胎形变,保证汽车操纵稳定性的同时提升乘坐舒适性。目前,油液式阻尼器在汽车悬架中应用较为广泛,该种阻尼器以结构简单、成本低廉、可靠性高的优点受到广大汽车厂商的青睐。但是,油液式阻尼器存在以下两个缺点:①阻尼系数不可调,难以适应复杂的道路状况;②车身振动能量通过阻尼器油液转化为热能散失,油液的温升会造成阻尼器可靠性降低,同时也造成了振动能量的浪费,这部分能量约占汽车驱动能量的 17.2%^[4]。如果将这部分能量回收,能够在一定程度上提高燃油经济性^[5]。

采用电磁阻尼器(EMD)的电磁馈能式悬架系统可以很好地解决传统油液式阻尼器的两个缺点。电磁馈能式悬架利用电磁感应原理,将悬架的拉伸和压缩运动转化为切割磁感线运动,从而产生感应电势,实现振动能量向电能的转化^[6],并且能够根据路面的实际状况,通过控制器调节电磁阻尼器负载实现阻尼系数的调节。近年来,众多学者对电磁馈能式悬架展开了深入的研究^[7],提出了多种阻尼器结构和控制方式。电磁阻尼器主要包括磁流变式和馈能电机式,使用较多的是磁流变式阻尼器,其控制方式虽然简单,但由于磁流变液的控制复杂以及成本问题而无法进行推广^[8-12]。使用电机作为阻尼作动器有利于能量回收,Maravandi 团队基于旋转电机设计的传动机构可减小阻尼器尺寸并提升传递效率^[13-14],然而其可靠性难以保证。基于旋转电机旋转式阻尼器的主动控制方法可调节电机输出扭矩,通过传动机构转化为抑制车身振动的作用力^[15-16],但其控制方法较为复杂,且能耗较高。西安交通大学许广灿等人基于滚珠丝杠式阻尼器,通过仿真和台架实验分析了随机路面激励下馈能悬架能量回收潜力和阻尼调节特性^[17],但对于阻尼控制方法没有

进行优化设计。Ning 等人使用可调电阻的阻尼调节方法能够以较低能耗和成本实现阻尼器阻尼系数的调节,一定程度上提高了悬架性能^[18-19],但其无法实现阻尼连续调节及振动能量的回收。基于 DC-DC 变换器的阻尼调节电路可实现阻尼连续调节,响应速度快且能耗低^[20],但未考虑电能储存及加入储能装置给系统带来的影响。

为了解决电磁阻尼器阻尼调节和能量回收的问题,本文基于直流电机和滚珠丝杠机构设计了电磁阻尼作动器,使用 DC-DC 变换器实现阻尼闭环调节,采用电池包完成能量存储。通过仿真和实验分析了电磁阻尼器的输出端特性,包括其能量回收性能及阻尼调节表现,最后在正弦激励的台架实验下验证了所设计的电磁阻尼器的减振及馈能效果。

1 电磁悬架系统模型

基于旋转电机的电磁阻尼器由直流电机和滚珠丝杠副组成,其动力学模型和结构如图 1 所示,电机电磁转矩为阻尼器输出力的来源,滚珠丝杠副实现阻尼器直线运动和电机轴旋转运动的转换,同时将电机转矩转化为阻尼器输出力。功率电路在控制器输出信号驱动下实现对电机输出端控制,完成阻尼调节。

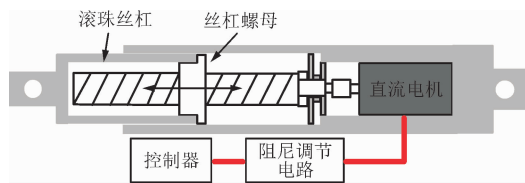


图 1 电磁阻尼器模型

该阻尼器应用在实车上如图 2 所示,汽车行驶过程中路面不平度会引起车身和底盘的相对运动,阻尼器输出力可抑制该相对运动,阻尼力 F_d 可表示为

$$F_d = \frac{2\pi T_{em}}{l} \quad (1)$$

式中: l 表示滚珠丝杠导程, m ; T_{em} 表示电磁阻尼器的电磁转矩输出, $N \cdot m$ 。

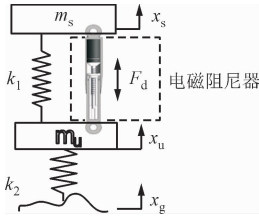


图2 电磁悬架系统示意图

悬架系统的微分方程可以表示为

$$\left. \begin{aligned} m_s \ddot{x}_s &= k_1(x_u - x_s) - F_d \\ m_u \ddot{x}_u &= -k_1(x_u - x_s) + F_d - k_2(x_u - x_g) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: m_s 和 m_u 为车身质量和底盘质量, kg ; k_1 和 k_2 分别为悬架弹簧刚度和车轮刚度, N/m ; x_s 和 x_u 分别为车身和底盘的位移, m ; x_g 为路面不平度激励, m 。结合式(1)可得

$$F_d = c_{eq} v = c_{eq} (\dot{x}_s - \dot{x}_u) = \frac{2\pi}{l} T_{em} \quad (3)$$

式中: c_{eq} 为阻尼器的直线阻尼系数, $N \cdot s/m$; v 为车身底盘之间的相对运动速度, m/s , v 与电机转速 ω 的关系可表示为

$$\omega = \frac{2\pi}{l} v \quad (4)$$

其中, ω 为电机转速, rad/s 。结合式(3)和(4),可得阻尼器直线阻尼系数为

$$c_{eq} = \frac{4\pi^2 T_{em}}{l^2 \omega} = \frac{4\pi^2}{l^2} c_{em} \quad (5)$$

式中: c_{em} 为直流电机的旋转阻尼系数, $N \cdot s/m$ 。根据式(5)可知,在已知转速时,直线阻尼系数与电机转矩输出成正比。

2 电磁阻尼器特性及控制方法

2.1 阻尼器直线阻尼系数

为分析阻尼器的直线阻尼,建立直流电机的等效电路模型如图3所示,将等效电路负载视为一个

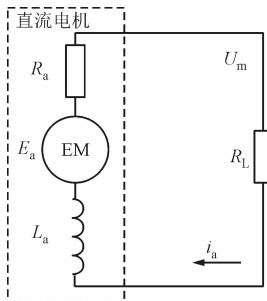


图3 直流电机等效电路图

等效电阻。

根据直流电机特性,其电磁转矩可表示为

$$T_{em} = \frac{K_t K_e}{R_L + R_a} \omega = c_{em} \omega \quad (6)$$

式中: K_t 为电机的转矩常数, $N \cdot m/A$; K_e 为电机的反电动势常数, $V/(rad \cdot s^{-1})$; ω 为电机转速, rad/s ; R_L 和 R_a 为负载电阻和电枢等效电阻, Ω 。

由式(6)易得电机转矩输出正比于其转速,经过滚珠丝杠副传动后阻尼器输出力可表示为

$$F_d = \frac{2\pi}{l} T_{em} = \frac{4\pi^2 K_t K_e}{l^2 (R_L + R_a)} v \quad (7)$$

故阻尼器的直线阻尼系数可表示为

$$c_{eq} = \frac{4\pi^2 K_t K_e}{l^2 (R_L + R_a)} \quad (8)$$

由式(8)可以得出:在基于直流电机的电磁阻尼器中,通过调节负载电阻值 R_L 可以实现其阻尼系数的调节。

2.2 DC-DC 电路原理

升降压式直流斩波电路是一种可调节输出电压的电路拓扑结构,如图4所示。当功率场效应晶体管 MOSFET 导通时,输入电压 V_{in} 经过功率开关管向电感线圈 L_f 供电使其储能,此时电流为 i_{in} 。同时电容 C_f 维持输出电压恒定并向负载 R 供电。当功率场效应晶体管 MOSFET 断开时,电感线圈 L_f 的能量向负载 R 释放,电流为 i_{out} 。负载电压 V_{out} 与电源电压极性相反,该电路也称作反极性斩波电路。在功率开关管开关的每个周期内,其电源电流和负载电流的关系如图5所示。在实际应用中,通过调节驱动 MOSFET 的 PWM 信号占空比 α ,其输出电压可基于输入电压进行调节。当 $0 < \alpha < 1/2$ 时为降

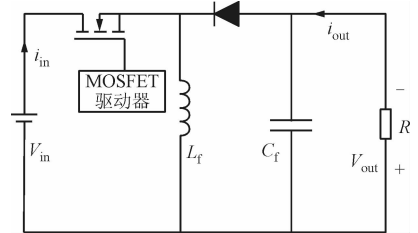


图4 DC-DC 变换器示意图

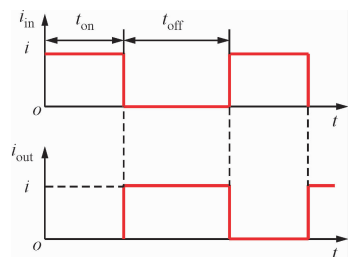


图5 电流波形图

压,当 $1/2 < \alpha < 1$ 时为升压,故称作升降压斩波电路,也有称之为 buck-boost 变换器。

DC-DC 变换器存在连续导通 (CCM) 和间断导通 (DCM) 两种工作模式。在间断工作模式下,其输出电压可表示为

$$V_{out} = \frac{P_{in}}{i_{out}} \eta = - \frac{V_{in}^2 T \alpha^2}{2 L_f i_{out}} \eta \tag{9}$$

式中: T 为 PWM 信号的周期, s ; α 为 PWM 信号的占空比; L_f 为电路电感, H ; η 为电路功率传递效率。

在连续导通模式下,DC-DC 变换器的输出电压可表示为

$$V_{out} = - \frac{V_{in} \alpha}{1 - \alpha} \tag{10}$$

由式(9)、式(10)可见,无论在何种工作模式下 DC-DC 电路输出电压都可通过驱动 PWM 的占空比来调节,这就为设计基于 DC-DC 变换器的阻尼调节电路提供了依据。

2.3 电磁阻尼器阻尼调节方法

本文基于 DC-DC 变换器原理,在直流电机输出端接入整流桥,将电机反电动势作为 DC-DC 变换器的输入电压,将可变电阻负载替换为电池,实现电能的存储。调节电路拓扑结构如图 6 所示,调节 MOSFET 驱动信号的占空比可调节输入输出电压比。阻尼调节的过程如图 7 所示,在获取目标阻尼系数 c_{eq_ref} 和当前转速 ω 时,易得出此时的目标电磁转矩 T_{ref} ,进而可求得为达到该参考转矩需要的电枢电流 i_{a_ref} 。另一方面,在电机转动过程中不断采集其实际电枢电流 i_{a_act} ,并将该实际电流送至 PI 控制器,基于二者的差值进行 PI 调节,输出驱动

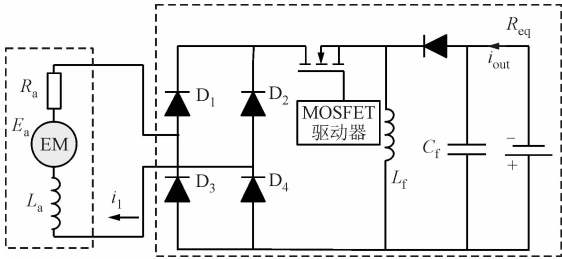


图 6 阻尼调节电路

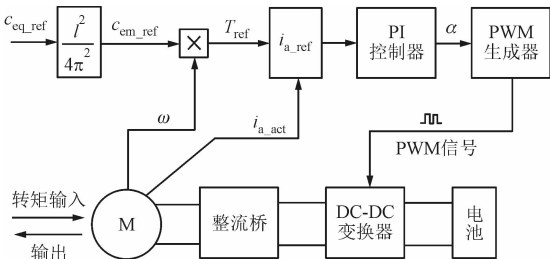


图 7 阻尼控制流程示意图

PWM 信号的占空比,最后由 PWM 生成器产生该信号驱动 DC-DC 变换器,使实际电枢电流向参考值趋近。由于电机电枢电流与负载电阻直接相关,该调节过程可视为对等效负载电阻值的调节。

3 电磁阻尼器系统仿真分析

3.1 电阻负载系统仿真

在如图 3 所示的电机等效模型中,电机旋转过程中输出端的反电动势与电机转速有关可表示为

$$E_a = K_e \omega = \frac{2 \pi K_e v}{l} v \tag{11}$$

电机电枢电流可以表示为

$$i_a = \frac{E_a}{R_L + R_a} \tag{12}$$

而电磁转矩可表示为

$$T_{em} = K_t i_a \tag{13}$$

式(6)和(13)均为直流电机电磁转矩特性,分别是机械特性(电机转速)和电气特性(电枢电流)实现电磁转矩控制。在实际使用中电机的机械特性调节速度远远低于电气特性的调节速度,在很短的调节时间内电机的转速可以视为常量,因此为了提高电磁转矩的调节速度,本文利用电气特性来调节电磁转矩。通过负载电阻的改变实现电机电枢电流的改变,从而实现电机转矩的调节,电磁转矩随着负载电阻的增大而减小,同时在负载电阻上能量消耗也相应变化。

在仿真实验中,基于大众-朗逸系列轿车的实际参数和车上乘坐两名乘客的实验条件如表 1 所示。按照平均分配的原则将整车质量和乘客质量均匀分配给 4 个悬架。为了方便后续搭建仿真实验台,基于单个悬架的 1/4 模型进行了仿真。

表 1 实验整车参数

参数	数值
车身质量/kg	1 060
底盘质量/kg	137.6
悬架弹簧刚度/(N · m ⁻¹)	17 556
轮胎刚度/(N · m ⁻¹)	149 500
成年人质量/kg	70

在正弦路面激励下对该阻尼调节系统进行仿真,系统参数如表 2 所示,电机反电动势随负载电阻变化情况的仿真结果如图 8 所示。由图 8 可见,在正弦激励下,电机反电动势随着负载电阻的增大而增大,在负载电阻为 10 Ω 时,电阻上消耗能量的峰值功率即可回收能量功率最大,达 47.9 W。

表 2 仿真模型参数

参数	数值
车身质量 m_s/kg	75
底盘质量 m_u/kg	8.6
悬架弹簧刚度 $k_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	4 389
轮胎刚度 $k_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	37 375
反电势常数 $K_e/(\text{V}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	0.349 3
转矩常数 $K_t/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1})$	0.349 3
丝杠导程 l/mm	16

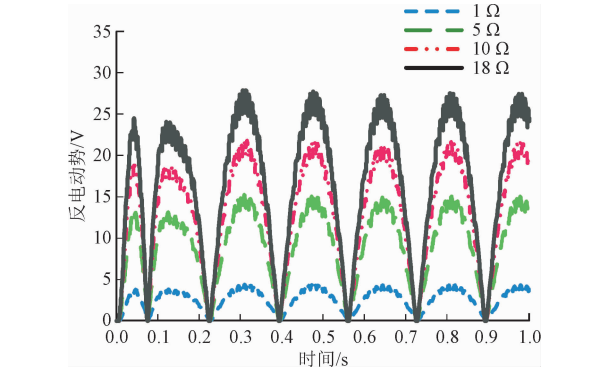


图 8 不同负载电阻下电机的反电势

3.2 阻尼控制方法系统仿真

为了验证所设计的阻尼控制电路的阻尼调节方法的效果,搭建了基于实车的仿真模型,模型基于实车 1/4 悬架模型等比例缩小,其参数如表 2 所示。阻尼控制方法的目标是使电机输出转矩尽可能的接近目标转矩,即控制电机电枢电流尽可能等于参考目标值。

仿真结果如图 9 所示,在振幅为 10 mm,频率为 3 Hz 的正弦激励下,设计的阻尼控制电路中实际电枢电流可以较好地跟随参考电流。

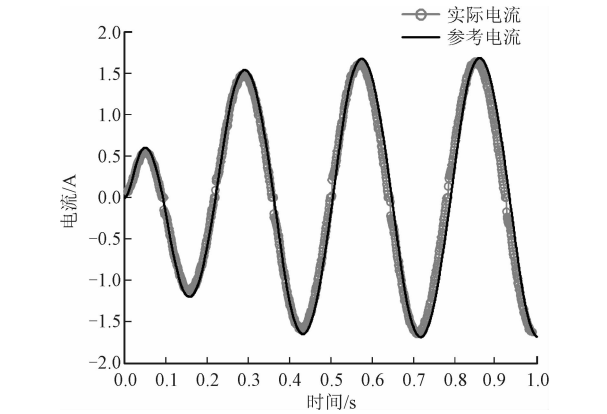


图 9 阻尼调节电路实际与参考电流仿真结果

电磁阻尼器的阻尼系数调节仿真中给定的目标阻尼系数为 1 820 N·m/s 左右,结果如图 10 所示。

因此本文设计的可调式阻尼器及其调节方法可使其阻尼系数在目标值附近进行调节,实现基本等效的阻尼系数。

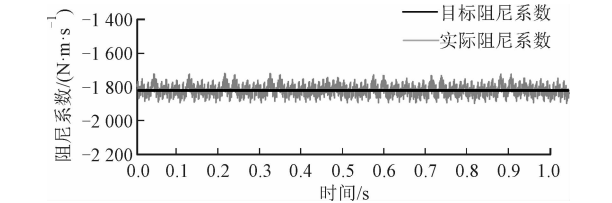


图 10 阻尼系数调节效果仿真

4 实验设计及结果

4.1 实验台架设计

为了验证本文所设计的可调阻尼器在实际工况下的能量回收和减振性能,基于实车 1/4 模型的相关参数,设计了 1/4 悬架系统实验台架,如图 11 所示。实验台架包括簧载质量,悬架弹簧,非簧载质量,车轮刚度弹簧等,各个部分参数如表 2 所示,使用滚珠丝杠和直流电机构成的电磁式阻尼器;采用伺服电动缸(FDR095S200BT)模拟路面高程激励。根据实验所要模拟的路面高程激励信号,用 STM32 单片机控制伺服电机(MS-M07725)做旋转运动,伺服电动缸可以将伺服电机的旋转运动通过内置的运动转换装置转化为推杆的直线运动,最终推杆带动与之相连的铝板模拟路面高程输入。电动缸及其控制电路如图 12 所示。

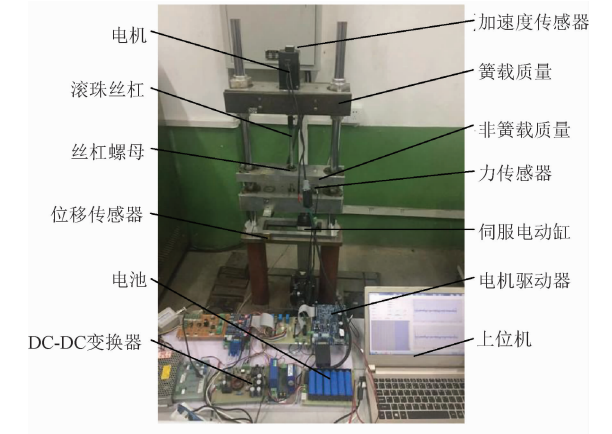


图 11 1/4 悬架实验台

实验台架上布置有相应的位移传感器,加速度传感器和电流传感器等,用于实时采集台架各部分状态数据。为排除随机因素可能带来的影响,实验中采用幅值和频率均可变的正弦激励,通过电压电流传感器采集 DC-DC 输出以及电机电枢电流,分析了设计的可调阻尼器相关性能。

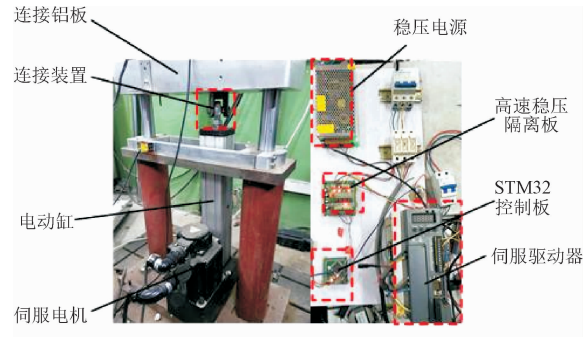


图 12 伺服电动缸及控制电路

4.2 实验结果分析

4.2.1 能量回收性能分析 为了分析设计的可调阻尼悬架系统的能量回收性能,采集该系统的 DC-DC 输出端电压和电流信号,作为电池的充电电流和电压。当电机负载为可变电阻,并且在相同正弦激励下,其两端输出电压随着阻值的增大而增大,结果如图 13 所示。该阻尼调节系统的馈能功率仿真和实验结果如表 3 所示。由表 3 可见:负载两端电压随着阻值的增大而增大;当阻值为 $1\ \Omega$ 时获得最低平均馈能功率约为 $5.9\ \text{W}$;阻值为 $10\ \Omega$ 时电阻上消耗的峰值功率可达约 $46\ \text{W}$,平均功率约为 $16.8\ \text{W}$;相应全悬架系统馈能峰值功率可达 $184\ \text{W}$ 左右,与仿真结果吻合。实验结果表明,该电磁阻尼器具有较好的能量回收潜力。

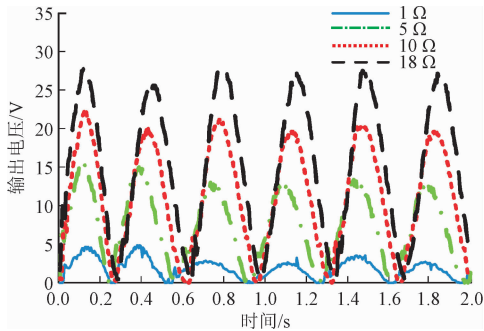


图 13 可变电阻负载实验结果

表 3 电阻负载馈能功率仿真及实验结果

电阻/ Ω	峰值功率/ W		平均功率/ W	
	仿真	实验	仿真	实验
1	19.307	18.814	7.065	5.917
5	46.450	45.928	16.094	14.755
10	47.961	46.076	18.199	16.837
18	43.152	42.809	15.727	13.301

4.2.2 阻尼调节及减振性能实验 根据前述阻尼调节电路模型,搭建了基于 DC-DC 变换器的阻尼调

节电路,使用 DSP 完成电流的采集,PWM 信号占空比的计算和输出,使用 6N136 高速光耦的 MOS-FET 驱动大幅提高了阻尼调节电路的响应速度,储能装置为 6 节 18650 电池。在实验中分别改变正弦激励的幅值和频率,根据实时采集的电机转速和目标阻尼系数计算得到参考电流,并实时采集经过阻尼调节后的实际电机电枢电流。设计的阻尼调节电路根据参考电流和实际电流之间的差值,通过 PI 控制器可实时得出合适的 PWM 信号占空比,如图 14 所示。

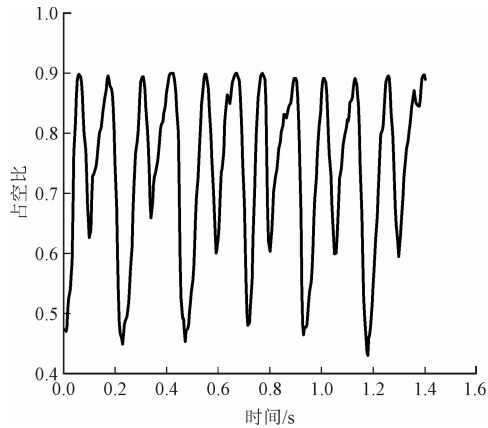


图 14 PWM 信号占空比

在实验中所采用的 PWM 的频率为 $20\ \text{kHz}$,同时 PWM 波信号的调节频率为 $1\ \text{kHz}$,即 PI 控制器以 $1\ \text{ms}$ 的间隔输出合适的 PWM 信号占空比。图 14 反映了 PWM 信号占空比的整体变化趋势,因此是宏观上的 PWM 占空比。在该占空比的 PWM 信号驱动下的 DC-DC 变换器较好地完成了对参考电流的跟随,如图 15 所示。图 15 结果表明,所设计的电磁阻尼器及阻尼调节电路可完成对目标电磁转矩的输出,实现阻尼系数实时闭环调节。在相同频率振幅的正弦激励实验中,本文设计的阻尼调节阻尼器时悬架系统的加速度响应与使用被动阻尼器基

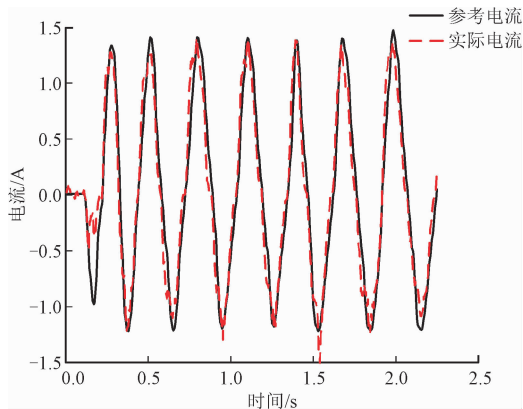


图 15 电流调节实验结果

本一致,如图16所示。由图16可见,使用阻尼调节后加速度均方根值为 1.449 m/s^2 ,而使用被动阻尼器时加速度均方根值为 1.237 m/s^2 ,相差较小。此外,该电磁阻尼器的响应速度能够达到 10 Hz ,根据广泛采用的评价汽车平顺性的标准 ISO 2631—1:1997(E),路面输入的频率范围一般为 $0.1 \sim 12 \text{ Hz}$,该电磁阻尼器的响应速度能够在较大范围内响应不同频率的路面输入,因此该阻尼器具有响应速度快,响应频带范围宽的优点,并且可在实现能量回收及阻尼调节的同时保证悬架系统的乘坐舒适性。

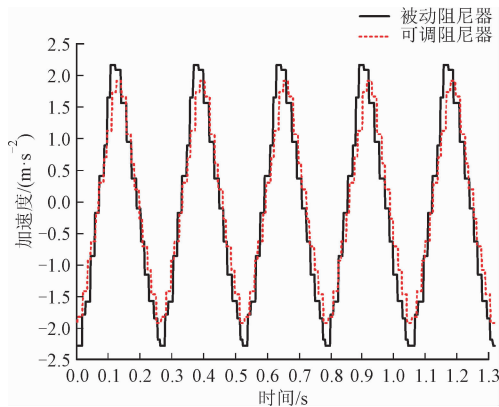


图16 可调式与被动式阻尼器加速度响应实验结果

5 结 论

本文设计的基于直流电机和DC-DC变换器的电磁可调阻尼器能够以极低的能耗高效地实现阻尼系数的调节,同时实现振动能量向电能的转化和回收,其创新点如下。

(1)使用直流电机和滚珠丝杠机构组成的电磁阻尼器,采用基于DC-DC变换器的电路拓扑实现高频电磁阻尼调节,最终能够实现理想的阻尼系数调节和振动衰减效果。该电磁阻尼器的响应速度能够达到 10 Hz ,能够在较大范围内响应不同频率的路面输入。

(2)使用电池作为储能设备,实现了振动能量转化为电能之后的存储。仿真结果和台架实验表明,本文设计的可调式电磁阻尼器不仅可实现阻尼实时调节,还能实现可观的电能回收,具有显著的优越性。

参考文献:

[1] 李玉,徐俊,彭程,等. 结合变压器正反激原理的动力电池主动均衡方法[J]. 西安交通大学学报,2019,53(8): 151-158.
LI Yu, XU Jun, PENG Chen, et al. An active equalization technology for power batteries based on for-

ward-flyback principle of transformers [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(8): 151-158.

- [2] 赵云飞,徐俊,王霄,等. 双自适应衰减卡尔曼滤波锂电池荷电状态估计[J]. 西安交通大学学报,2018,52(12): 99-105.
ZHAO Yunfei, XU Jun, WANG Xiao, et al. An estimation method for state of charge of lithium-ion batteries using dual adaptive fading extended Kalman filter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 99-105.
- [3] 赵云飞,徐俊,王海涛,等. 采用Morlet小波的锂电池相对健康状态估计[J]. 西安交通大学学报,2019,53(12): 97-103.
ZHAO Yunfei, XU Jun, WANG Haitao, et al. An estimation method for relative health of lithium-ion batteries using Morlet wavelet [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(12): 97-103.
- [4] ZHANG Yunxin, GUO Konghui, DAI Wang, et al. Energy conversion mechanism and regenerative potential of vehicle suspensions [J]. Energy, 2016, 119: 961-970.
- [5] ZUO Lei, ZHANG Peisheng. Energy harvesting, ride comfort, and road handling of regenerative vehicle suspensions [J]. Journal of Vibration and Acoustic, 2011, 135(1): 011002.
- [6] 蒲晓晖,徐俊,李士盈,等. 电磁阻尼器惯性质量对汽车馈能悬架减振性能的影响[J]. 西安交通大学学报,2019,53(6): 62-68.
PU Xiaohui, XU Jun, LI Shiyong, et al. Effects of inertial mass of electromagnetic damper on vibration insulation performance of vehicle regenerative suspension [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(6): 62-68.
- [7] 喻凡,张勇超,张国光. 车辆电磁悬架技术综述[J]. 汽车工程,2012,34: 569-574.
YU Fan, ZHANG Yongchao, ZHANG Guoguang. Review on vehicle electromagnetic suspension technology [J]. Automotive Engineering, 2012, 34: 569-574.
- [8] DONAHUE M, HEDRICK J K. Implementation of an active suspension, preview controller for improved ride comfort [EB/OL]. (2002-06-10)[2019-03-15]. https://pdfs.semanticscholar.org/6fb0/db509924ce033fdc0386b69c2b9fef7bbbf.pdf?_ga=2.237426182.749626143.1582594521-1618960359.1582594521.
- [9] SEO Y, HAN S, CHOI J. Searching for a stable high-performance magneto-rheological suspension [J]. Advanced Materials, 2018, 30(42): 1-13.

- [10] JEYASENTHIL R, CHOI B. A novel semi-active control strategy based on the quantitative feedback theory for a vehicle suspension system with magneto-rheological damper saturation [J]. *Mechatronics*, 2018, 54: 36-51.
- [11] CHENG Mingxing, JIAO Xiaohong. Modified active disturbance rejection control for non-linear semi-active vehicle suspension with magneto-rheological damper [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2018, 40(8): 2611-2621.
- [12] DONG Xiaomin, LIU Weiqi, AN Guopeng. A novel rotary magneto-rheological flexible joint with variable stiffness and damping [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(10): 1-25.
- [13] SABZEHGAR R, MARAVANDI A, MOALLEM M. Energy regenerative suspension using an algebraic screw linkage mechanism [J]. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(4): 1251-1259.
- [14] MARAVANDI A, MOALLEM M. Regenerative shock absorber using a two-leg motion conversion mechanism [J]. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(6): 2853-2861.
- [15] WANG Peng, MEI T, ZHANG Jiye, et al. Self-powered active lateral secondary suspension for railway vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65, 3: 1121-1129.
- [16] 张国光, 张永超, 喻凡. 车辆电动悬架的混合不确定建模与 μ 综合控制器设计 [J]. *汽车工程*, 2012, 12(34): 1100-1106.
- ZHANG Guoguang, ZHANG Yongchao, YU Fan. Mixed uncertainty modeling and μ synthesis controller design for vehicle active suspension with motor actuator [J]. *Automotive Engineering*, 2012, 12(34): 1100-1106.
- [17] 许广灿, 徐俊, 李士盈, 等. 电动汽车振动能量回收悬架及其特性优化 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(8): 90-95.
- XU Guangcan, XU Jun, LI Shiyong, et al. Energy regenerative suspension and its performance optimization for electric vehicle [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(8): 90-95.
- [18] NING Donghong, SUN Shuangshuai, DU Haiping, et al. Vibration control of an energy regenerative seat suspension with variable external resistance [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 106: 94-113.
- [19] XIE Longhan, LI Jiehong, LI Xiaodong, et al. Damping-tunable energy-harvesting vehicle damper with multiple controlled generators: design, modeling and experiments [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 99: 859-872.
- [20] NING Donghong, DU Haiping, SUN Shuaishuai. An energy saving variable damping seat suspension system with regeneration capability [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(10): 8080-8091.

[本刊相关文献链接]

- 张亮修, 王宇, 吴光强, 等. 汽车阻尼可调半主动悬架混杂模型预测控制. 2017, 51(11): 156-164. [doi: 10. 7652/xjtuxb201711022]
- 李超超, 向建华, 王慧敏. 汽车保险杠系统吸能盒结构参数对低速碰撞下吸能特性的影响. 2017, 51(10): 77-81. [doi: 10. 7652/xjtuxb201710013]
- 毛阳, 陈志勇, 史文库, 等. 磁流变液双质量飞轮扭振减振特性研究. 2014, 48(6): 127-133. [doi: 10. 7652/xjtuxb201406022]
- 黄康, 王强, 邱明明, 等. 考虑模式切换频率的多模式混合动力汽车参数优化. 2019, 53(7): 99-107. [doi: 10. 7652/xjtuxb201907015]
- 郭涛, 李国君. 内嵌晃荡液体减振的流固耦合分析. 2014, 48(9): 117-122. [doi: 10. 7652/xjtuxb201409020]
- 邓涛, 罗俊林, 韩海硕, 等. 混合动力汽车工况识别自适应能量管理策略. 2018, 52(1): 77-83. [doi: 10. 7652/xjtuxb201801012]
- 袁希文, 文桂林, 周兵. 考虑侧向稳定性的分布式电驱动汽车制动滑移率控制. 2015, 49(5): 43-48. [doi: 10. 7652/xjtuxb201505007]
- 许建, 张政, 李翔, 等. 独立驱动电动汽车横摆力矩的模糊控制算法. 2014, 48(7): 83-89. [doi: 10. 7652/xjtuxb201407015]
- 马世伦, 张学义, 耿慧慧, 等. 电动汽车新型永磁同步电机的非均匀气隙建模及性能分析. 2019, 53(1): 70-76. [doi: 10. 7652/xjtuxb201901009]
- 郭涛, 管志成, 孙光普, 等. 调频振子-液体联合水平减振的流固耦合机理研究. 2016, 50(1): 28-33. [doi: 10. 7652/xjtuxb201601005]

(编辑 刘杨)