

基于能量优化的混合馈能悬架阻尼优化设计

陈 龙 汪佳佳 汪若尘 丁仁凯 谢 健

(江苏大学汽车工程研究院, 镇江 212013)

摘要: 为了回收悬架的振动能量,提出了一种弹簧-减振器-直线电机并联的混合式悬架结构。针对直线电机馈能过程存在的死区现象,设计了 DC/DC 升压电路,以传统被动悬架耗散的能量为基准,得到了同一行驶工况下馈能效率的显式表达,同时,为兼顾系统动力学性能,研究了减振器阻尼对馈能性能和隔振性能的影响规律,并通过折中设计确定了减振器最优阻尼系数,建立了混合馈能悬架动力学模型,进行了其隔振性能和馈能性能的对比仿真分析。结果表明,混合馈能悬架可有效协调车辆馈能性和隔振性。最后,在仿真的基础上,进行了混合馈能悬架的试验研究,试验结果与仿真结果基本吻合,验证了仿真结果的正确性。

关键词: 混合悬架; 阻尼; 馈能性; 隔振性

中图分类号: U463.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0305-06

Damping Optimization Design of Hybrid Energy Regenerative Suspension System Based on Energy Optimization

Chen Long Wang Jiajia Wang Ruochen Ding Renkai Xie Jian

(Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to harvest the vibration energy of suspension and make it with fail-safe characteristics, a hybrid suspension structure with spring, damper and linear motor in parallel was proposed. According to the dead zone in the harvesting process of linear motor, a DC/DC boost circuit was designed so that the electromagnetic damping force can still be provided by the linear motor in the process of dead zone. Based on the energy dissipation of traditional passive suspension, an explicit expression of energy efficiency in the same driving cycle was obtained. And the energy efficiency of suspension was used as evaluation index of suspension. Meanwhile, to take into account of the performance of system dynamics, the influence of damping value on energy regeneration performance and vibration isolation performance was studied, and the optimal shock absorber damping value was determined by compromise design. A hybrid energy regenerative suspension dynamic model was established, the vibration isolation performance and energy regeneration performance of suspension based on optimal damping of vibration damper were compared and analyzed. The simulation results showed that the hybrid energy regenerative suspension can effectively coordinate the energy efficiency and vibration isolation of the vehicle. Finally, based on the simulation, the experimental study on hybrid energy regenerative suspension was carried out on the INSTRON 8800 numerical control hydraulic servo exciting test bench. The test results were in agreement with the simulation results, which verified the correctness of simulation results.

Key words: hybrid energy regenerative suspension; damping; energy regeneration; vibration isolation

收稿日期: 2016-02-23 修回日期: 2016-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575240)、江苏省教育厅自然科学基金重大项目(15KJA460005)和镇江市工业支撑项目(GY2015029)

作者简介: 陈龙(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事车辆动态性能研究,E-mail: chenlong@ujs.edu.cn

通信作者: 汪若尘(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事车辆动态性能模拟与控制研究,E-mail: wr@ujs.edu.cn

引言

传统被动悬架将悬架振动能量以热能的形式全部耗散,且因为其固定的结构参数无法适应多变的路况限制了在车辆上的应用。主动悬架^[1]通过提供合适的作动力来积极适应路况,改善汽车动力学性能,但它需要大量的外部能源来提供作动力,增加了车辆燃油消耗,因此也没有得到广泛运用。近年来,许多学者^[2-10]开始研究具有馈能潜力的电磁悬架,在实现悬架振动衰减的同时回收阻尼器耗散的能量,将其转换为电能并加以储存利用。

于长森等^[11]运用 CARSIM 软件对传统被动悬架进行能耗分析,分析表明当汽车以城市工况车速行驶时,阻尼器耗散的能量大于发动机输出能量的 4%,明确提出馈能悬架的应用潜力巨大;张晗等^[12]在 Matlab 中搭建了 1/4 传统被动悬架仿真模型,仿真表明在 C 级路面上,当车速达到 30 km/h 时,将有 33.34 W 的能量可以回收,若以整车具有 4 个减振器为例,可回收能量达到百瓦级别;裴金顺等^[13]基于 LQR 控制设计了一种能量回收控制器,通过系统仿真分析,指出车辆以 36 km/h 行驶在 C 级路面上时可回收 40% 的系统消耗能量;ZHU 等^[14]分析了直线电机式电磁悬架振动能量的传递过程,并仿真计算了其能量回收效率;STRISKY 等^[15]在直线电机式主动悬架上引入一种 H_1 控制器,探讨了在保证悬架动态性能的同时,设计近似权重来回收更多能量,降低汽车整体能耗;ZUO 等^[16]研究了电磁悬架的动力性能以及馈能潜力,并从侧面论证了两者的矛盾性;RIBEIRO 等^[17]提出了一种新型混合式电磁减振装置,研究表明其减振效果和馈能特性均可随路面不同而适时调节;HUANG 等^[18]研究了滚珠丝杠式电磁悬架在路面随机振动时的馈能特性;KHOSHNOUD 等^[19]分析了一种自供能电磁悬架结构,探讨了其馈能性与动态性能的关系。

以上研究均表明,电磁悬架的馈能潜力巨大。考虑到悬架系统的 fail-safe 特性以及直线电机能量回收效率高、结构简单等优点,本文提出一种弹簧-减振器-直线电机并联的混合式电磁悬架,研究其被动馈能模式下的能量回馈情况,分析减振器阻尼对其馈能的影响,确定兼顾馈能性和乘坐舒适性的最佳阻尼。

1 混合馈能悬架模型

图 1 为 1/4 混合馈能悬架模型。其动力学微分方程为

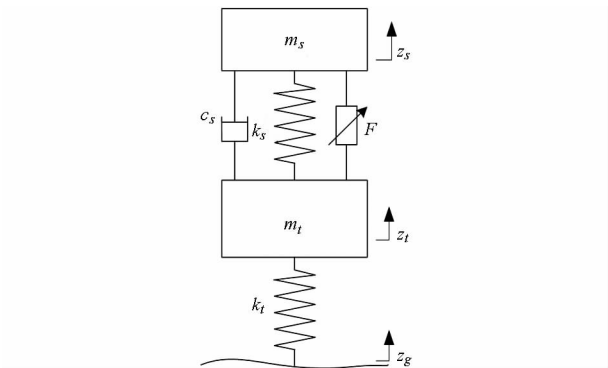


图 1 混合馈能悬架模型

Fig. 1 Hybrid energy regenerative suspension model

$$\begin{cases} m_s \ddot{z}_s = F - c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_t) - k_s(z_s - z_t) \\ m_t \ddot{z}_t = c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_t) + k_s(z_s - z_t) - k_t(z_t - z_g) - F \end{cases} \quad (1)$$

- 式中 F ——电磁阻尼力
 c_s ——减振器阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}$
 k_s ——车辆悬架弹簧刚度, N / m
 k_t ——轮胎刚度, N / m
 m_t ——非簧载质量, kg
 m_s ——簧载质量, kg
 z_s ——悬架质量位移, m
 z_t ——非悬架质量位移, m
 z_g ——路面激励, m

其中,直线电机工作于发电机模式,悬架处于被动馈能模式,路面输入采用滤波白噪声,模型可表示为

$$\dot{z}_g(t) = -2\pi f_0 z_g(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} v_0 w(t) \quad (2)$$

系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数
Tab. 1 Parameters of system

参数	数值
簧上质量 m_s / kg	250
簧下质量 m_t / kg	45
弹簧刚度 $k_s / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	16 000
轮胎刚度 $k_t / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	160 000
反电动势系数 $k_e / (\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	62.6
推力系数 $k_f / (\text{N} \cdot \text{A}^{-1})$	77.9
电机内阻 R / Ω	10.16
路面不平度系数 $G_q(n_0) / \text{m}^{-3}$	6.4×10^{-5}
车速 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	20
下截止频率 F_0 / Hz	0.1
空间频率 N_0 / m^{-1}	0.1

2 直线电机阻尼特性及馈能电路设计

2.1 直线电机馈能原理

直线电机是一种比较常见的能量转换装置,可以工作于两种模式:既可以作为电动机,把电能转换

成机械能;也可以工作于发电机模式,把机械能转换成电能。本文只研究悬架被动馈能模式,此时直线电机处于发电机模式。

如图 2 所示,直线电机是由旋转感应电机沿径向剖开,然后将其展开,水平放置而来。其中初级(定子)是绕有三相线圈的硅钢片组成,次级(动子)由永磁体组成。

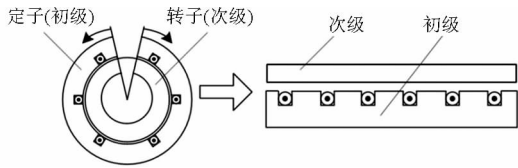


图 2 电机的演变过程
Fig. 2 Evolution process of motor

当汽车行驶在不平路面上时,车身发生随机振动,于是处在随动状态下的直线电机的次级也将相对初级发生相对运动,次级的磁场被线圈切割,基于法拉第电磁感应理论,线圈中会产生感应电动势和感应电流,将这部分能量回收到储能装置,提供给车辆上其他电子设备,降低了车辆整体燃油消耗。

2.2 直线电机阻尼特性

当直线电机只处于发电机状态时,它在悬架中就相当于一个电磁阻尼器,除了能将振动机械能转换为电能外,与传统的减振器的阻尼效果是类似的,会产生电磁阻尼力。直线电机感应电动势和感应电流可表示为

$$U_m = k_e (\dot{z}_s - \dot{z}_t) \quad (3)$$

$$I = \frac{U_m}{R_m} \quad (4)$$

而电机感应力可表示为

$$F = k_f I \quad (5)$$

联立式(3)~(5)即得电机等效阻尼和阻尼力

$$F = c_{eq} (\dot{z}_s - \dot{z}_t) \quad (6)$$

$$c_{eq} = \frac{k_e k_f}{R_m} \quad (7)$$

直线电机的阻尼特性可以由阻尼力 F 和振动速度 $\dot{z}_s - \dot{z}_t$ 来表示,其关系如式(6)所示,为了方便分析直线电机的阻尼特性,现设置充电电容的初始端电压为 10 V,电容容量为 5 F,无外接电阻的情况下,可得到关系曲线如图 3 所示。

从图 3 可以看出,当悬架振动速度在 $-0.1 \sim 0.1$ m/s 之间时,电磁阻尼力为 0,称这种现象为死区现象。这是因为在运用直线电机回收振动能量到充电电容时,电容有一定的电压阈值,只有电机输出端电压高于电压阈值时,才可将电能储存在充电电容中,相对应的也就是说只有当悬架振动速度达到

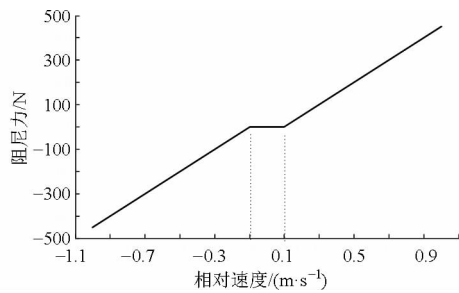


图 3 电容初始电压为 10 V 时的阻尼特性
Fig. 3 Damping characteristics of capacitor at initial voltage of 10 V

一定值时,电机才会产生阻尼力。死区现象的产生将对车辆的动力学性能产生不良影响。

2.3 馈能电路设计

为解决直线电机死区现象,引入 DC-DC 变换器,对直线电机输出电压升压。馈能电路如图 4 所示。

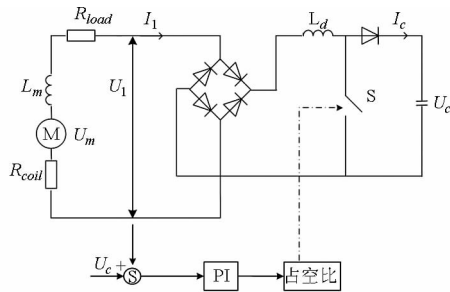


图 4 馈能电路
Fig. 4 Energy regenerative circuit

由于开关管特性较复杂,在此,对其做以下两点假设:

(1) 电容 C 和电感 L_d 均为理想的元器件,电容 C 等效串联的电阻为零,电感 L_d 的工作区间是未饱和的、线性的,其寄生的电阻为零。

(2) 二极管和开关管 S 均为理想的元器件,其截止或导通的时间都很短暂,可视为瞬间变化,且导通时的压降和截止时的漏电流均为零。

以 U_1 和 U_c 的差值作为 PI 控制器的输入,当 U_1 大于 U_c 时,直线电机产生的能量可直接向电容充电;当 U_1 小于 U_c 时,通过 PI 控制器适时调节开关管的导通时间。此时,当开关管 S 闭合时,直线电机产生的电能经过整流后会暂时存储在电感 L_d 中;当 S 断开时,直线电机和电感 L_d 会同时向电容充电,达到升压的目的。

由于直线电机的电感相对较小,因此,忽略电感 L_m 对馈能电路的影响。于是当电机工作于发电机模式时,其充电电流和电机两端电压为

$$I_1 = \frac{U_m}{R_{coil} + R_{load}} \quad (8)$$

$$U_1 = U_m - I_1^2 (R_{coil} + R_{load}) \quad (9)$$

则电机产生的可回收的能量为

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T (U_1 I_1) dt$$

(10)

而电路最终回收的能量为

$$P_{out} = \frac{1}{T} \int_0^T (U_c I_c) dt$$

(11)

3 混合馈能悬架阻尼设计

3.1 馈能效率

传统被动悬架中减振器耗散的能量为

$$P_c = c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_t)^2$$

(12)

如图 5 所示,当改变传统被动悬架中减振器的阻尼系数时,其耗散的能量基本保持不变。这是因为当阻尼增加时,悬架变“硬”,在受到路面激励时,车身与轮胎间的相对运动速度减小,故耗散的总能量基本保持不变^[20]。于是,本文提出一个衡量混合悬架馈能性的指标:馈能效率 η ,其表达式为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_c}$$

(13)

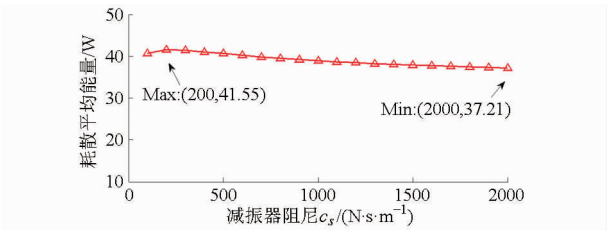


图 5 传统被动悬架阻尼系数与能量耗散的关系
Fig.5 Relationship between damping value and energy dissipation of traditional passive suspension

于是在同一路面,同一车速下以传统被动悬架耗散能量为基准的混合悬架馈能效率随减振器阻尼系数的变化规律如图 6 所示。当减振器的阻尼系数不断增大时,悬架的馈能效率逐渐降低。这是由于直线电机处于被动馈能模式时相当于一个阻尼恒定的阻尼器,当与其并联的减振器阻尼系数不断增大时,悬架整体阻尼系数增大,即导致车身与轮胎间的相对速度减小,则直线电机回收的能量自然减少,馈能效率也随之降低。

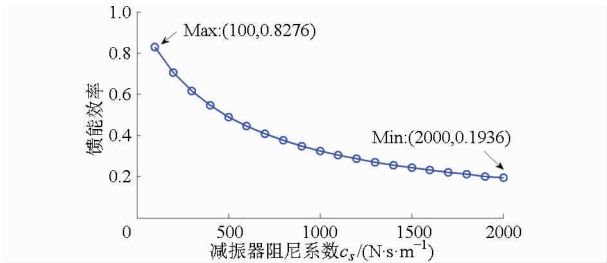


图 6 馈能效率与阻尼系数的关系
Fig.6 Relationship between energy efficiency and damping value

3.2 最优阻尼

减振器阻尼的选取要兼顾汽车乘坐舒适性与馈能性两方面考虑,如图 7 所示,随着阻尼系数的增加,悬架的馈能效率不断降低,而车身加速度的均方根则呈增长趋势,当阻尼系数 $c_s = 500 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 时,两者达到折中要求。

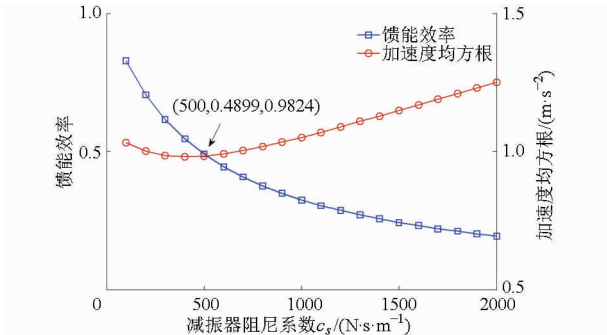


图 7 阻尼系数与馈能性及动力学性能之间的关系
Fig.7 Relationship between damping value and energy regeneration and dynamic performance

图 8 为减振器阻尼系数为 300、500、1 000 $\text{N} \cdot \text{s/m}$ 时,车身加速度的时域响应。可看出阻尼系数 $c_s = 500 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 时车身加速度较低。图 9 给出了混合悬架减振器阻尼系数不同时车身加速度的频域响应图,在低频区时,三者具有相同的乘坐舒适性,在低频共振区,随着减振器阻尼系数增加,车辆乘坐舒适性变好,而在低频共振区以后,阻尼系数越大,舒适性越差。综上所述,减振器阻尼系数 $c_s = 500 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 时,车辆具有较好的馈能性以及乘坐舒适性。

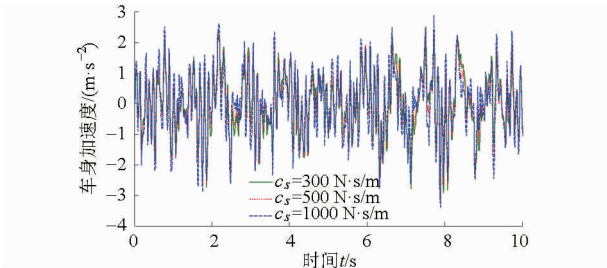


图 8 混合悬架减振器阻尼系数不同时车身加速度的时域响应
Fig.8 Time domain response of body acceleration with different damping values of hybrid suspension

如图 10、11 所示,选取最优阻尼系数后,相较于传统悬架,车身加速度较低,乘坐舒适性较好,同时可回收部分振动能量。

考虑到混合悬架比传统悬架多直线电机,而直线电机的增加也相对增加了悬架簧下质量,图 12 研究了簧下质量与车身加速度均方根的关系。从图中可以得知,为获得较好的乘坐舒适性,尽量使用质量较小的直线电机。

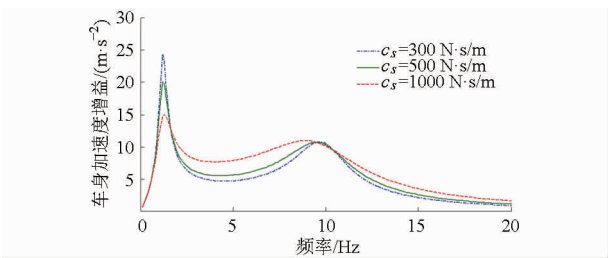


图 9 混合悬架减振器阻尼系数不同时车身加速度的频域响应

Fig. 9 Frequency domain response of body acceleration with different damping values of hybrid suspension

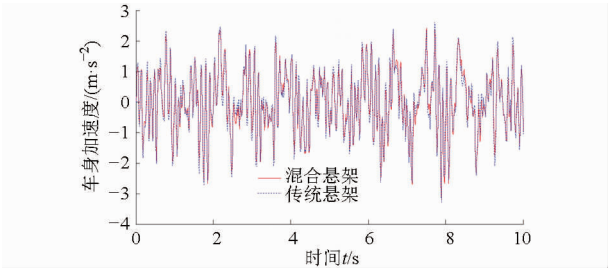


图 10 最佳阻尼时车身加速度时域响应图

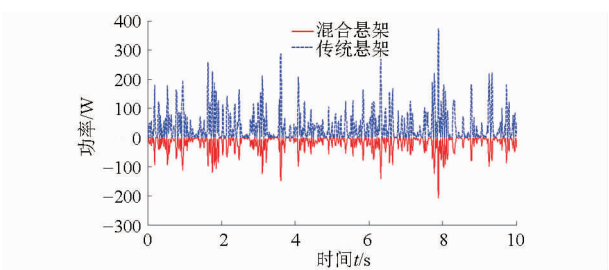


图 11 最佳阻尼时能量耗散时域响应图

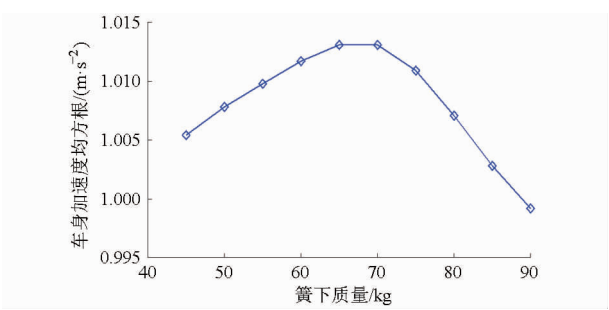


图 12 簧下质量与车身加速度的关系

4 试验

为了验证仿真结果的正确性,在 INSTRON 8800 型数控液压伺服激振试验台上进行台架试验,试验结构布置如图 13 所示。试验参数与仿真参数一致,位移传感器用于测量簧上质量与簧下质量的相对位移,加速度传感器用于测量簧上质量与簧下质量的

加速度,电压传感器用于测量电机输出电压和充电电容端电压,两者的差值作为 PI 控制器的输入,以输出适当的占空比来提高充电电压,电流传感器用于测量电容的充电电流。



图 13 试验结构布置图

图 14 ~ 16 给出了混合悬架减振器阻尼系数分别为 300、500、1 000 N·s/m 时的车身加速度的仿真与试验结果的对比。根据试验数据,图 17、18 给出了车身加速度和电容端电压的均方根,并与仿真结果进行了对比,从图中可以看出,仿真结果与试验结果存在一定误差,其舒适性性能方面的误差主要是因为仿真过程忽略了减振器的非线性因素以及直线电机的摩擦阻力,使得实际阻尼力偏大,从而降低了汽车的乘坐舒适性,故试验所测的加速度大于仿真结果。馈能性能方面的误差主要是仿真过程忽略了回

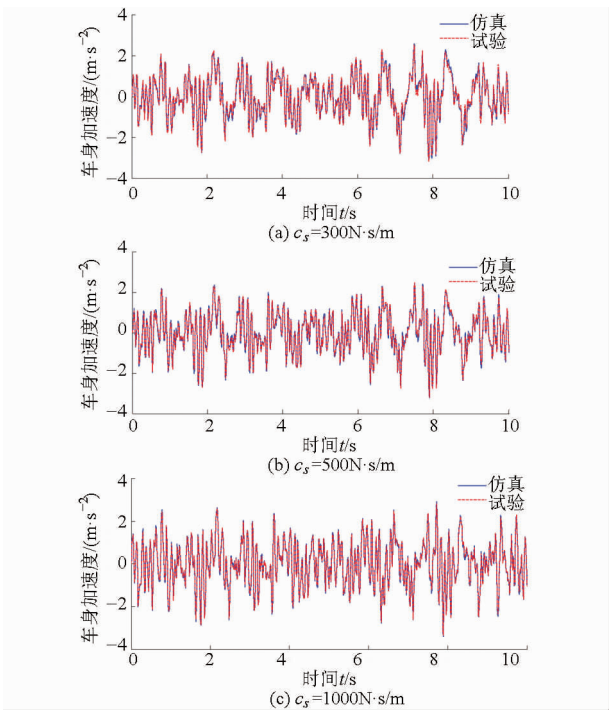


图 14 车身加速度对比

Fig. 14 Comparison of vehicle body acceleration

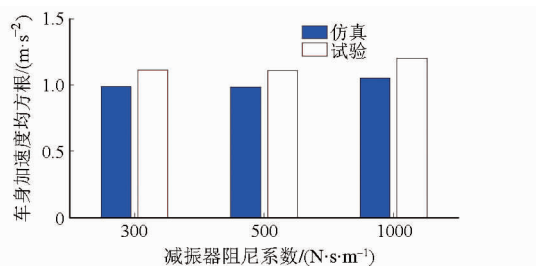


图 15 车身加速度仿真结果与试验结果对比

Fig. 15 Comparison of simulation and experimental results of vehicle body acceleration

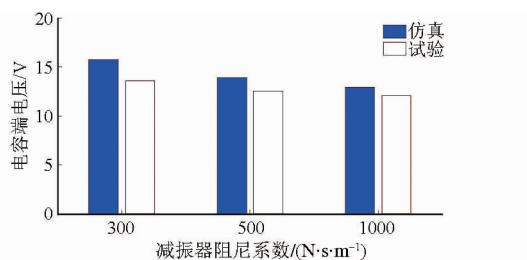


图 16 电容端电压仿真结果与试验结果对比

Fig. 16 Comparison of simulation results and test results of capacitor terminal voltage

路电阻,使得实际电阻比仿真偏大,从而导致实际充电电压低于仿真结果。

5 结论

(1)研究了直线电机的阻尼特性,通过馈能电路的设计有效地避免了其死区现象,提高了其能量

回收效率。

(2)通过研究传统被动悬架的能耗情况,设计了衡量悬架馈能性的指标:馈能效率 η ,兼顾馈能性以及乘坐舒适性来优化减振器阻尼,达到折中效果。

(3)基于台架试验,对悬架进行试验研究,验证了结果的正确性。

参 考 文 献

- 赵彩虹,陈士安,王骏骋. 刚度和阻尼系数对 LQG 控制主动悬架控制的影响分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 301–308.
ZHAO Caihong, CHEN Shian, WANG Juncheng. Influences of stiffness and damping parameters on control of active suspension based on LQG[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 301–308. (in Chinese)
- EFATPENAH K, BENO J H, NICHOLS S P. Energy requirements of a passive and an electromechanical active suspension systems[J]. Vehicle System Dynamics, 2000, 34(6): 437–458.
- PIRES L, SMITH M C, HOUGHTON N E, et al. Design trade-offs for energy regeneration and control in vehicle suspensions[J]. International Journal of Control, 2013, 86(11): 2022–2034.
- SHI D H, CHEN L, WANG R C, et al. Design and experiment study of a semi-active energy-regenerative suspension system[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(1): 1–12.
- 陈星, 罗虹, 邓兆祥. 直线电机馈能悬架控制系统设计与馈能分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(8): 124–129.
CHEN Xing, LUO Hong, DENG Zhaoxiang. Design of an energy-regenerative suspension control system using linear motor and energy recovery analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(8): 124–129. (in Chinese)
- LI Z J, ZUO L, LUHRS G, et al. Electromagnetic energy-harvesting shock absorbers: design, modeling, and road tests[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3): 1065–1074.
- OKADA Y, HARADA H. Regenerative control of active vibration damper and suspension systems[C]// Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control, 1996, 4: 4715–4720.
- 喻凡, 张勇超. 馈能型车辆主动悬架技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 1–6.
YU Fan, ZHANG Yongchao. Technology of regenerative vehicle active suspensions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 1–6. (in Chinese)
- 陈龙, 施德华, 汪若尘, 等. 馈能悬架自适应离线神经网络逆控制[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 281–287.
CHEN Long, SHI Dehua, WANG Ruochen, et al. Adaptive off-line neural network inverse control for energy-harvesting suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 281–287. (in Chinese)
- 汪若尘, 钱金刚, 施德华, 等. 直线电机馈能悬架半主动控制特性的仿真分析[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2015(5): 1102–1108.
WANG Ruochen, QIAN Jin'gang, SHI Dehua, et al. Simulation analysis of semi-active control characteristics of energy-regenerative suspension with linear motor[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2015(5): 1102–1108. (in Chinese)
- 于长森, 王伟华, 王庆年. 混合动力车辆馈能式悬架的节能潜力[J]. 吉林大学学报, 2009, 39(4): 841–845.
YU Changmiao, WANG Weihua, WANG Qingnian. Analysis of energy-saving potential of energy regenerative suspension system on hybrid vehicle[J]. Journal of Jilin University, 2009, 39(4): 841–845. (in Chinese)
- 张哈, 过学迅, 方志刚, 等. 馈能式悬架能量回收潜力试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(2): 225–230.
- 裴金顺, 李以农, 王艳阳, 等. 采用电磁直线电机的主动悬架控制系统的设计与能量分析[J]. 汽车工程, 2014(11): 1386–1391.
PEI Jinshun, LI Yinong, WANG Yanyang, et al. Design and energy analysis of an active suspension control system with electromagnetic linear motor[J]. Automotive Engineering, 2014(11): 1386–1391. (in Chinese)

alignment and joint kinematics[J]. Journal of Experimental Biology, 2007, 210(14): 2548 – 2562.

13 RUBENSON J, LLOYD D G, HELIAMS D B, et al. Adaptations for economical bipedal running: the effect of limb structure on three-dimensional joint mechanics[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2011, 8(58): 740 – 755.

14 JINDRICH D L, SMITH N C, JESPER K, et al. Mechanics of cutting maneuvers by ostriches (*Struthio camelus*) [J]. Journal of Experimental Biology, 2007, 210(8): 1378 – 1390.

15 SCHALLER N U, D'AOÛT K, AERTS P, et al. Phalangeal load and pressure distribution in walking and running ostriches (*Struthio camelus*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2007, 146(4): S122.

16 EL-GENDY S A A, DERBALAH A, EL-MAGD M E R A. Histo-morphological study on the footpad of ostrich (*Struthio camelus*) in relation to locomotion[J]. Journal of Veterinary Anatomy, 2011, 4(2): 77 – 97.

17 SCHALLER N U, D'AOÛT K, VILLA R, et al. Toe function and dynamic pressure distribution in ostrich locomotion[J]. Journal of Experimental Biology, 2011, 214(7): 1123 – 1130.

18 张锐, 杨明明, 刘海宝, 等. 鸵鸟二趾足底曲面固沙限流特性数值模拟[J]. 吉林大学学报:工学版, 2015, 45(2): 508 – 515.
ZHANG R, YANG M M, LIU H B, et al. Numerical simulation of sand flow fixation characteristics of plantar surface of ostrich didactyl foot[J]. Journal of Jinlin University: Engineering and Technology Edition, 2015, 45(2): 508 – 515. (in Chinese)

19 张锐, 杨明明, 潘润铎, 等. 鸵鸟足底非规则曲面形貌数学模型构建[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 71 – 78.
ZHANG R, YANG M M, PAN R D, et al. Mathematical model establishment of irregular plantar surface of ostrich didactyl foot [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.1): 71 – 78. (in Chinese)

20 陈秉聪. 土壤-车辆系统力学[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981.

21 陈秉聪. 拖拉机刚性轮在松软土壤上滚动时的滚动阻力和附着力(一)[J]. 吉林大学学报:工学版, 1958(1): 115 – 129.
CHEN B C. The rolling friction and adhesion of the steel-rim tractor wheel when it rolls on the soft soil[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 1958(1): 115 – 129. (in Chinese)

22 WAWAN H, MINORU Y, AKIRA O. Design and traction performance of the movable lug wheel[J]. Journal of Terramechanics, 1998, 35(3): 159 – 177.

23 YANG Y, SUN Y, MA S G. Drawbar pull of a wheel with an actively actuated lug on sandy terrain [J]. Journal of Terramechanics, 2014, 56: 17 – 24.

24 DING L, GAO H B, DENG Z Q, et al. Experimental study and analysis on driving wheels' performance for planetary exploration rovers moving in deformable soil[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(1): 27 – 45.

25 李建桥, 黄晗, 党兆龙, 等. 轻载荷条件下的筛网轮沉陷[J]. 吉林大学学报:工学版, 2015, 45(1): 167 – 173.
LI J Q, HUANG H, DANG Z L, et al. Sinkage of wire mesh wheel under light load[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2015, 45(1): 167 – 173. (in Chinese)

26 岳宗玉, 邸凯昌. 好奇心号巡视器及其特点分析[J]. 航天器工程, 2012(5): 110 – 116.
YUE Z Y, DI K C. Mars curiosity rover and its characteristics[J]. Spacecraft Engineering, 2012(5): 110 – 116. (in Chinese)

(上接第 310 页)

14 ZHU Songye, SHEN Wenai, XU Youlin. Linear electromagnetic devices for vibration damping and energy harvesting: modeling and testing[J]. Engineering Structures, 2012, 34(34): 198 – 212.

15 STRISKY A, HYNIOVA K, HONCU J, et al. Energy recuperation in automotive active suspension systems with linear electric motor[C]//Mediterranean Conference on Control & Automation, MED'07. IEEE, 2007: 1 – 5.

16 ZUO L, ZHANG P S. Energy harvesting, ride comfort, and road handling of regenerative vehicle suspensions[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2013, 135(1): 1 – 8.

17 RIBEIRO R, ASADI E, KHAMESEE M B, et al. Hybrid variable damping control: design, simulation, and optimization[J]. Microsystem Technologies, 2014, 20(8 – 9): 1723 – 1732.

18 HUANG B, HSIEH C Y, GOLNARAGHI F, et al. Development and optimization of an energy-regenerative suspension system under stochastic road excitation[J]. Journal of Sound & Vibration, 2015, 357: 16 – 34.

19 KHOSHNOUD Farbod, LU Jianbo. Suspension energy regeneration for random excitations and self-powered actuation[C]//2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2014: 2519 – 2524.

20 ZUO L, ZHANG P S. Energy harvesting, ride comfort, and road handling of regenerative vehicle suspensions[J]. Journal of Vibration & Acoustics, 2011, 135(1): 48 – 65.