

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.042

液压互联馈能悬架特性分析与试验

汪若尘 蒋秋明 叶青 陈龙 孟祥鹏  
(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 针对互联悬架能耗过大却不能回收悬架振动能量的问题,提出了一种液压互联馈能悬架系统。阐述了液压互联馈能悬架的结构及工作原理,建立了 AMESim 动力学模型,并设计了恒流馈能电路,研究了在正弦路面与随机路面输入激励下的动态性能,并在此基础上进行了台架试验,试验与仿真结果基本吻合。结果表明:与未加入恒流电路控制的液压互联悬架相比,采用恒流电路控制的液压互联馈能悬架具有更佳的整体动态性能,其侧倾角加速度、车身垂直加速度均有所下降,并在此基础上实现了对车身振动能量的回收,为液压互联馈能悬架的模式切换控制提供了理论基础。

**关键词:** 液压互联悬架; 半主动悬架; 能量回收; 恒流电路

**中图分类号:** U463.33      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)08-0350-08

Characteristics Analysis and Experiment of Hydraulic Interconnected Energy-regenerative Suspension

WANG Ruochen JIANG Qiuming YE Qing CHEN Long MENG Xiangpeng  
(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In view of the problem that the energy consumption of interconnected suspension is too large and the vibration energy of the suspension cannot be recovered, a new type of hydraulic interconnected power system was presented, which can improve the dynamic performance of the whole vehicle and recover the vibration energy of the suspension. Compared with the passive interconnected suspension, the hydraulic interconnected energy regeneration suspension structure adopted the hydraulic motor to replace the damping valve. The hydraulic rectification bridge was used to rectify the pipeline. On this basis, a constant current control feed circuit was designed. On the one hand, it can be used to recover and store the suspension vibration energy. On the other hand, the constant current value also can be changed to improve the dynamic performance of the whole vehicle. The structure and working principle were introduced, the AMESim dynamic model was established, and the constant current feed energy circuit of the hydraulic interconnected power supply system was designed. A preliminary study on the dynamic performance of the input excitation in sinusoidal and random pavement was studied. On the basis of this, the bench test was carried out, and the experiment and simulation results were basically consistent. Results showed that compared with the hydraulic interconnected energy-regenerative suspension without the control of constant current circuit, the hydraulic interconnected energy-regenerative suspension with the control of constant current circuit had a better overall dynamic performance, the angle acceleration and the vertical acceleration of the vehicle body were decreased, and the recovery of the vibration energy of the vehicle body was realized, which provided a theoretical basis for the mode switching control of the hydraulic interconnected energy-regenerative suspension.

**Key words:** hydraulic interconnected suspension; semi-active suspension; energy recovery; constant current circuit

# 引言

互联悬架能够很好地提高车辆的整车操稳性<sup>[1-2]</sup>,防止车身侧翻,在复杂工况下保持车身的稳定。但同时互联悬架<sup>[3-5]</sup>多使用于崎岖路面与复杂转向工况,车身振动能耗过大,振动能量多以热能耗散,造成极大的浪费。

近年来,许多学者<sup>[6-9]</sup>开始研究馈能型悬架,在实现车身振动衰减的同时回收悬架耗散的能量,将其转换为电能并加以储存利用。文献[10-14]对液压互联悬架进行了建模以及模态分析,提出了一种主动互联悬架,有效地提高了车身性能,但并未对互联悬架振动能量回收进行研究。而在悬架能耗较大的问题上,国内外学者提出了馈能型主动悬架的概念,能够回收由路面激励产生的悬架振动能量。KAWAMOTO 等<sup>[15]</sup>提出混合式悬架系统,在被动悬架的基础上加上电机式能量再生阻尼器,将振动能量转换为电能。喻凡等<sup>[16-17]</sup>研制了滚珠丝杠式主动悬架,并分析了能量回馈的可行性。文献[18-20]提出液电馈能式减振器,研究其阻尼特性与馈能性,并进行了样机的试验仿真。然而,目前悬架馈能研究主要针对 1/4 车馈能减振器以及直线电机式馈能主动悬架,并未涉及馈能式液压互联悬架相关方面的研究。

本文在液压互联悬架的基础上,引入馈能单元,提出一种液压互联馈能悬架,在此基础上构建液压互联馈能悬架的系统模型,设计恒流馈能电路,仿真分析设计悬架馈能性和车辆综合性能,并进行互联悬架台架试验。

## 1 液压互联馈能悬架工作原理

### 1.1 液压互联馈能悬架结构

液压互联馈能悬架结构如图 1 所示。它由液压缸、单向阀、蓄能器、液压马达、液压管路、发电机以及馈能回路部分组成。液压互联馈能悬架是用液压马达取代被动互联悬架结构内的阻尼阀,实现将液压管路中的液压能转换为机械能,再由发电机转换为电能储存在电池内。

### 1.2 液压互联馈能悬架工作原理

如图 1 所示,由于受到路面激励的作用,液压缸内的活塞上下运动。当液压互联馈能悬架左侧的液压缸处于拉伸行程时,油液推动液压缸内的活塞向上运动,油液行至节点 A 处,单向阀 b 闭合而单向阀 a 开启,油液通过单向阀 a 至节点 B,油液经过液压马达,驱动其旋转,并将转矩传递给发电机发电;从液压马达出口流出的油液经蓄能器稳压后,经过

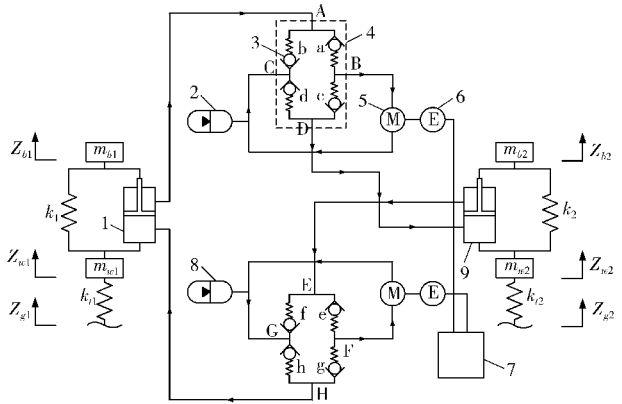


图 1 液压互联馈能悬架半车模型

Fig. 1 Half vehicle model of hydraulic interconnected feed

1、9. 液压缸 2、8. 蓄能器 3. 单向阀 4. 整流桥 5. 液压马达 6. 发电机 7. 馈能回路

节点 D 进入右侧液压缸的下腔,并推动右侧液压缸内的活塞向上运动。

同理,经右侧液压缸上腔流出的油液经过整流桥(4 个单向阀组成整流桥,主要用于稳定液压马达转速,提高工作效率)、液压马达、蓄能器流回左侧液压缸的下腔,从而形成半车的左右互联。

## 2 液压互联馈能模型的数学模型

### 2.1 动力学模型

基于 AMESim/Simulink 软件,建立了液压互联馈能悬架整车动力学模型如图 2 所示。

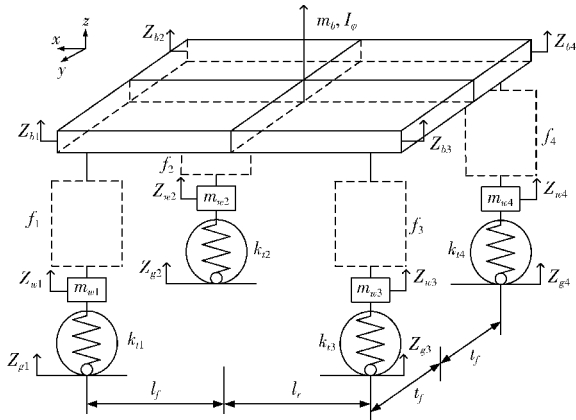


图 2 整车动力学模型

Fig. 2 Vehicle dynamic model

车身质心垂直运动方程为

$$m_b \ddot{Z}_b = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} f_1 = -k_{r1}(Z_{b1} - Z_{u1}) - F_{f1} \\ f_2 = -k_{r2}(Z_{b2} - Z_{u2}) - F_{f2} \\ f_3 = -k_{r3}(Z_{b3} - Z_{u3}) - F_{f3} \\ f_4 = -k_{r4}(Z_{b4} - Z_{u4}) - F_{f4} \end{cases}$$

式中  $Z_b$ ——质心位移, m  
 $m_b$ ——悬挂质量, kg

$f_1、f_2、f_3、f_4$ ——悬架作用力,N  
 $k_{ti}$ ——悬架刚度,kN/m  
 $Z_{b1}、Z_{b2}、Z_{b3}、Z_{b4}$ ——车身位移,m  
 $F_{f1}、F_{f2}、F_{f3}、F_{f4}$ ——液压缸阻尼力,N  
 $Z_{w1}、Z_{w2}、Z_{w3}、Z_{w4}$ ——轮胎位移,m

车身侧倾运动方程为

$$I_{\varphi}\ddot{\varphi}=t_f(f_1-f_2)+t_f(f_3-f_4)$$
 (2)

式中  $I_{\varphi}$ ——侧倾转动惯量,kg·m<sup>2</sup>

$\varphi$ ——侧倾角,rad

$t_f$ ——前轴、后轴轮距的一半,m

非悬挂质量的垂直运动方程为

$$\begin{cases} m_{w1}(\ddot{Z}_{w1})=-k_{t1}(Z_{w1}-Z_{g1})-f_1 \\ m_{w2}(\ddot{Z}_{w2})=-k_{t2}(Z_{w2}-Z_{g2})-f_2 \\ m_{w3}(\ddot{Z}_{w3})=-k_{t3}(Z_{w3}-Z_{g3})-f_3 \\ m_{w4}(\ddot{Z}_{w4})=-k_{t4}(Z_{w4}-Z_{g4})-f_4 \end{cases}$$
 (3)

式中  $m_{w1}、m_{w2}$ ——前轴非悬挂质量,kg

$m_{w3}、m_{w4}$ ——后轴非悬挂质量,kg

$Z_{g1}、Z_{g2}、Z_{g3}、Z_{g4}$ ——路面位移,m

2.2 电路恒流控制原理方程

馈能回路部分采用恒流电路控制方式,相较于恒压控制模式,恒流控制模式具有系统稳定性强,改善动态特性,快速限制电流的优点,可将电路中电流控制在某区间范围内,以控制液压马达输出转矩,增加液压管路内的阻尼力,进而使液压互联馈能悬架的整体性能得到改善,图3为AMESim 馈能回路图。

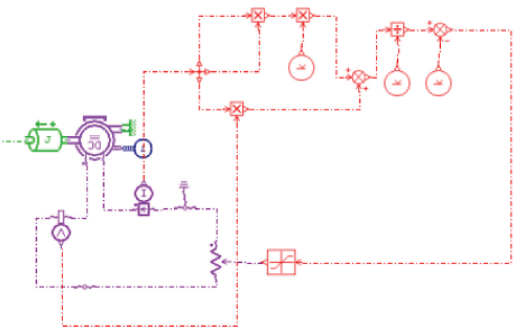


图3 AMESim 馈能回路图

Fig.3 Diagram of AMESim feed energy circuit

$$\begin{cases} P_{em}=EI_a=P_2+P_{cu} \\ P_{cu}=I_a^2R_0 \\ P_2=UI=UI_a \end{cases}$$
 (4)

式中  $P_{em}$ ——发电机功率

$P_2$ ——发电机输出电功率

$P_{cu}$ ——可变损耗(铜耗)

$R_0$ ——发电机内阻

$I_a$ ——馈能电路的电流

$U$ ——发电机两端电压

得 
$$\frac{P_{em}}{I_a^2}=\frac{P_2+P_{cu}}{I_a^2}=\frac{UI_a+I_a^2R_0}{I_a^2}$$
  
$$R_x=\frac{P_{em}}{I_a^2}-R_0$$
 (5)

式中  $R_x$ ——恒电流控制电路中可变电阻

恒电流控制主要是假设短时间内发电机功率不变,将控制目标  $I_a$  设为目标值,从而控制电路中电流恒定为  $I_a$ 。

3 悬架性能仿真分析

针对设计的液压互联馈能悬架,电路部分通过电路中电流预先值的设定来控制电路中电流。而电路中电流不仅决定了最终馈能功率,还对车身悬架的性能有着重要的影响。首先对不同电流下整车操稳性、整车平顺性以及馈能功率的关系做相关的仿真分析,再将整车性能与被动互联悬架以及未加入恒流电路控制的液压互联悬架进行不同路面激励频率下的仿真分析对比。未加入电路控制的液压互联悬架相比较于被动互联悬架,结构上用液压马达取代阻尼阀,但并未采用恒流电路控制。系统仿真参数如表1所示。

表1 悬架模型仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

| 参数                                                                 | 数值    |
|--------------------------------------------------------------------|-------|
| 悬挂质量 $m_b$ /kg                                                     | 1 380 |
| 前轴非悬挂质量 $m_{w1}、m_{w2}$ /kg                                        | 40.5  |
| 后轴非悬挂质量 $m_{w3}、m_{w4}$ /kg                                        | 45.4  |
| 侧倾转动惯量 $I_{\varphi}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$                    | 380   |
| 轮胎刚度 $k_{t1}、k_{t2}、k_{t3}、k_{t4}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$   | 192   |
| 前轴距车身质心距离 $l_f$ /m                                                 | 1.25  |
| 后轴距车身质心距离 $l_r$ /m                                                 | 1.51  |
| 前轴、后轴轮距的一半 $t_f$ /m                                                | 0.74  |
| 整车质心高度/m                                                           | 0.5   |
| 前悬架刚度 $k_{11}、k_{22}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$                | 17    |
| 后悬架刚度 $k_{21}、k_{22}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$                | 22    |
| 前悬架阻尼系数 $c_{11}、c_{12}/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$ | 15    |
| 后悬架阻尼系数 $c_{21}、c_{22}/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$ | 15    |
| 活塞直径/mm                                                            | 50    |
| 活塞杆直径/mm                                                           | 30    |
| 液压缸粘性系数/ $(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$               | 3 000 |

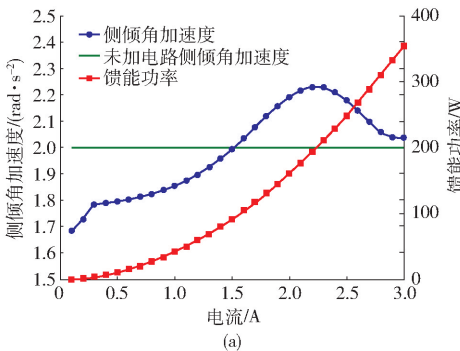
3.1 不同电流对性能的影响

此能量回收方案中,发电机直接与电路中负载连接,所以仿真中回收的能量则视为传递给负载的能量。而本模型采用恒电流控制电路的方式,在回收悬架中振动能量的同时,通过算法改变负载,实现电路中电流的恒定,并以此改善悬架的动力学性能。

仿真选择幅值0.05 m,左右轮输入相位差为180°的路面,因为当左右轮输入相位差为180°时,在各种不同的行驶工况下,整车操稳性与整车平顺性更易区分,

且差别较明显。在此工况下对侧倾角加速度, 车身加速度以及馈能功率进行时域仿真分析。

如图 4a 所示, 侧倾角加速度与馈能功率均为相应电流下 20 s 内的均方根。虽然在 2.6 A 左右时, 侧倾角加速度与馈能功率的曲线有交叉点, 但此时侧倾角加速度明显高于未加电路时的侧倾角加速



度, 且侧倾角加速度峰值点过高, 整车操稳性较差, 因此此点不予选取。而将电流设置为 1.2 A 时, 侧倾角加速度曲线与馈能功率曲线最接近, 所对应的电流即为综合性能最优电流。

由图 4b 得出, 在电流设为 1.2 A 时, 整车平顺性与馈能性综合效果最佳。

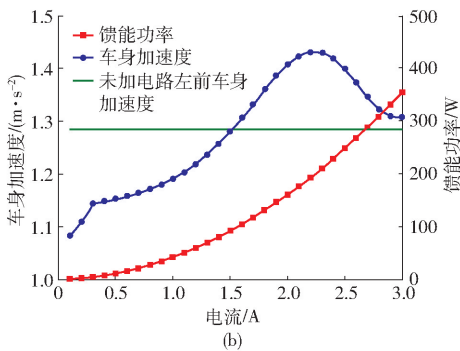


图 4 基于 AMESim 的车身性能随电流变化仿真曲线

Fig.4 Simulation curves of body performance with current change based on AMESim

综上, 在电流设置为 1.2 A 时车身性能与馈能性兼顾效果最理想。

3.2 正弦路面输入下车身性能仿真对比分析

考虑到路面激励频率对悬架动力学性能以及馈能功率的影响, 因此仿真工况分别对振幅 0.05 m, 频率 2.5、5 Hz 正弦路面谱输入下的被动互联悬架、液压互联馈能悬架以及未加入恒流电路控制的液压互联悬架进行仿真并作对比。

由图 5 与表 2 可知, 随着路面激励频率的增加,

未加入电路控制的液压互联悬架, 随着路面激励频率的增大, 液压马达的输出转矩增加, 侧倾角加速度相较于被动互联悬架明显变大, 而液压互联馈能悬架与被动互联悬架侧倾角加速度比较接近, 所以在回收能量的同时, 为保证整车操稳性, 加入电路控制与保护很重要。而在 2.5、5 Hz 时设置电流为 1.2 A 的液压互联馈能悬架相较于被动互联悬架, 其侧倾角加速度均方根增幅仅 3.51% 和 4.02%, 车身性能略有下降, 但对车辆行驶并不会造成明显影响。

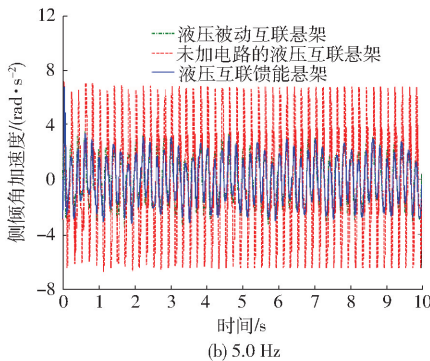
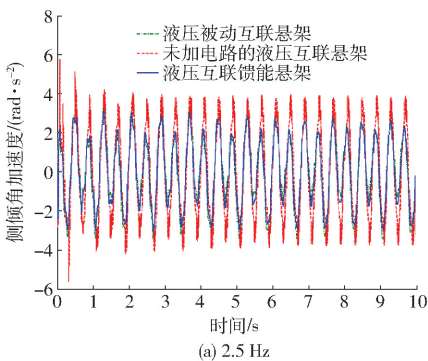


图 5 侧倾角加速度时域响应

Fig.5 Acceleration time domain response

表 2 侧倾角加速度均方根

Tab.2 Root mean square value of lateral acceleration

| 路面激励频率/Hz | rad/s <sup>2</sup> |             |          |
|-----------|--------------------|-------------|----------|
|           | 液压被动互联悬架           | 未加电路的互联馈能悬架 | 液压互联馈能悬架 |
| 2.5       | 1.797 4            | 2.280 1     | 1.860 5  |
| 5.0       | 1.612 0            | 3.703 0     | 1.676 8  |

由图 6 与表 3 同理可得, 在 2.5、5 Hz 时设置电流为 1.2 A 的液压互联馈能悬架相较于被动互联悬架, 其车身垂向加速度均方根值增幅仅 3.5% 和

4.02%, 车身性能略有下降, 但对车辆行驶影响不大, 而未加电路控制的液压互联悬架车身垂向加速度则明显增大。

3.3 随机路面输入下车身性能仿真对比分析

随机路面输入采用 AMESim 与 Simulink 联合仿真的方式, 在 Simulink 中建立路面不平度功率谱密度  $G_q(n)$  模型, 表达式为

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left( \frac{n}{n_0} \right)^{-w}$$

式中  $n$ ——空间频率



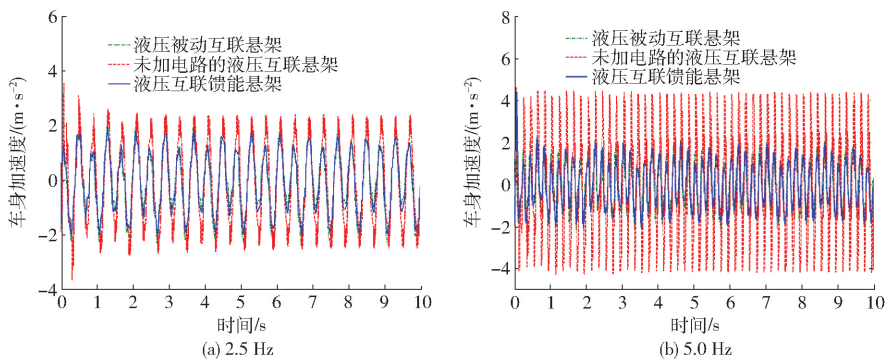


图 6 车身垂向加速度时域响应

Fig. 6 Vertical acceleration time domain response

表 3 车身垂向加速度均方根

| Tab. 3 Root mean square value of vertical acceleration of vehicle body |              |                 |              | m/s <sup>2</sup> |
|------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------|--------------|------------------|
| 路面激励频率/Hz                                                              | 液压被动<br>互联悬架 | 未加电路的互<br>联馈能悬架 | 液压互联<br>馈能悬架 |                  |
| 2.5                                                                    | 1.153 8      | 1.463 2         | 1.194 2      |                  |
| 5.0                                                                    | 1.034 8      | 2.375 4         | 1.076 4      |                  |

$n_0$ ——参考空间频率  
 $G_q(n_0)$ ——路面不平度系数  
 $W$ ——频率指数

选取路面等级为 B 级,车速 20 m/s,恒流电路中电流设置为 1.2 A,对车身性能进行时域、频域仿真,仿真结果如图 7、8 所示。

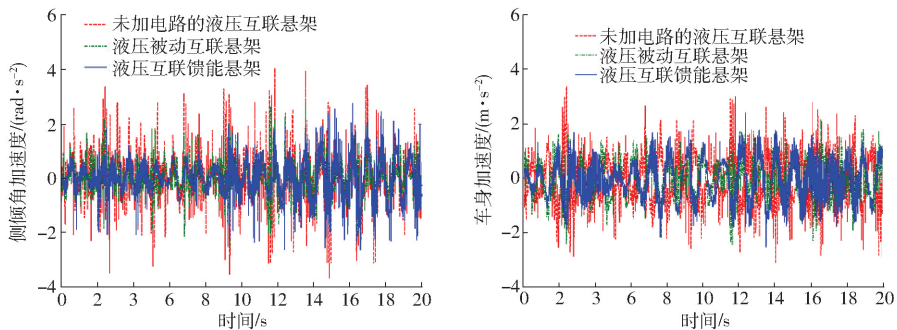


图 7 悬架系统仿真结果时域对比曲线

Fig. 7 Time domain comparison curves of simulation results of suspension system

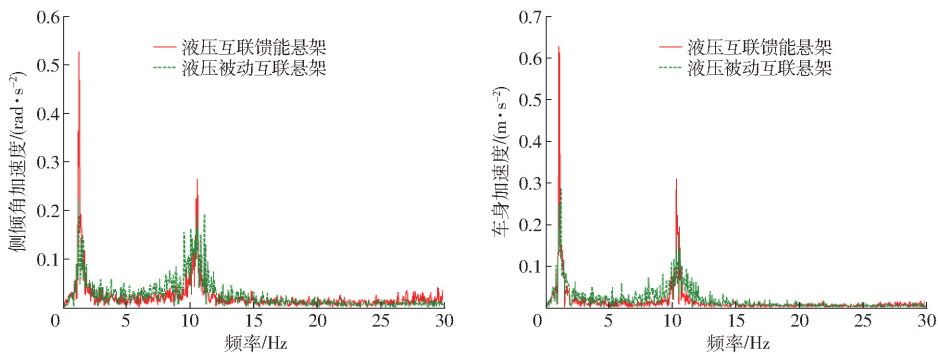


图 8 悬架系统仿真结果频域对比曲线

Fig. 8 Frequency domain comparison curves of simulation results of suspension system

由图 7、8 及表 4 可得,在随机路面激励下,相较于未加入电路控制的液压互联悬架,液压互联馈能悬架的侧倾角加速度改善 13%,车身垂向加速度改善 14.2%,车辆性能得到明显改善;而与被动互联悬架较为接近,效果理想。

3.4 转向行驶工况下整车动态响应仿真对比分析

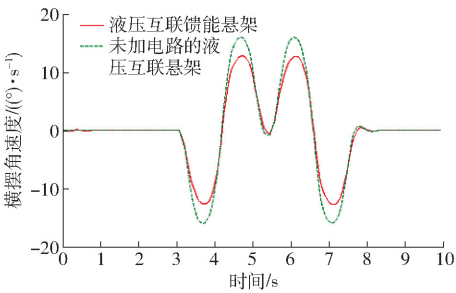
为了研究液压互联馈能悬架系统对于整车稳态

表 4 随机路面激励下车身性能均方根

| Tab. 4 Root mean square value of suspension system |              |                     |              |  |
|----------------------------------------------------|--------------|---------------------|--------------|--|
| 项目                                                 | 液压被动<br>互联悬架 | 未加电路的<br>互联馈能<br>悬架 | 液压互联<br>馈能悬架 |  |
| 侧倾角加速度/(rad·s <sup>-2</sup> )                      | 0.664 6      | 0.822 5             | 0.709 6      |  |
| 车身加速度/(m·s <sup>-2</sup> )                         | 0.684 8      | 0.856 6             | 0.733 9      |  |

转向特性的影响,采用标准双移线路面工况进行仿真试验,行驶速度为 70 km/h。

由图 9 可知,液压互联馈能悬架相较于未加



入恒流电路控制的液压互联悬架,其稳态转向特性有了明显的改善,整车操稳性有了较大的提升。

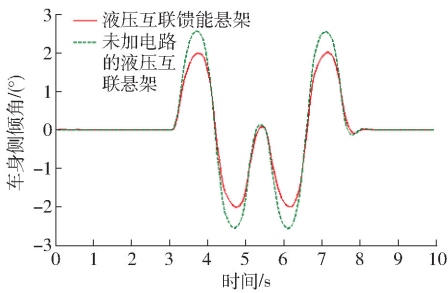


图 9 双移线路面时域响应

Fig. 9 Time domain responding to double moving line

4 台架试验

为了验证仿真的准确性和有效性,搭建了液压互联馈能悬架的半车台架,并在 MTS 四通道轮胎耦合道路模拟机上进行台架试验,前悬采用被动悬架,后悬采用液压互联馈能悬架,于随机路面谱下进行试验,并在双移线路况下进行了实车验证试验。

4.1 试验样机布置方案

液压互联馈能悬架样机布置如图 10 所示,在样车后轮装上液压互联馈能悬架;实际恒流电路使用

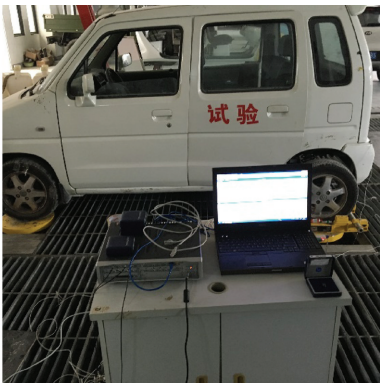
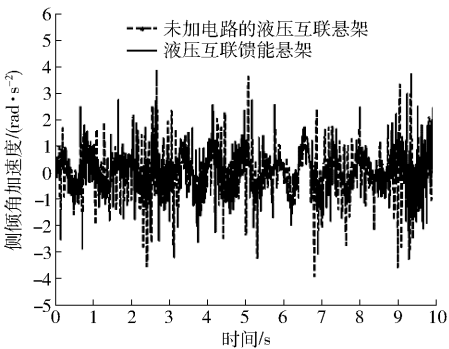


图 10 台架试验布置图

Fig. 10 Physical layout of bench test



Buck – Boost 电路板配合 dSPACE 实现恒电流控制,如图 11 所示。

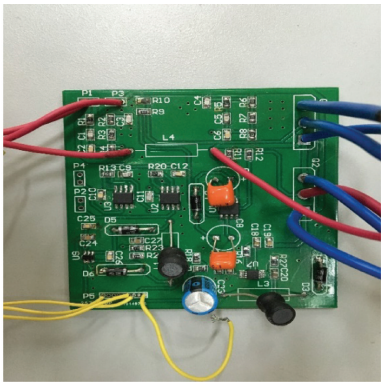


图 11 实际恒流电路板

Fig. 11 Actual constant current circuit board

4.2 试验结果

根据 GB/T 5902—1986,取  $v = 20 \text{ m/s}$ ,将设计产生的随机路面谱输入 MTS 试验台,进行随机输入试验,系统的时域响应如图 12 所示。

如图 12 所示,与未加入电路的互联悬架相比,液压互联馈能悬架车身加速度均方根降低了 9.8%,侧倾角加速度均方根降低了 16.75%。由图 13 可知,在双移线转向路况下,液压互联馈能悬架的稳态转向特性也有所改善,与仿真结果一致。

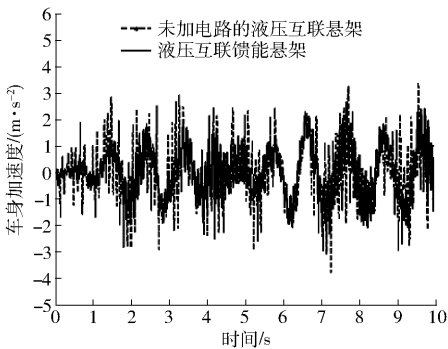


图 12 悬架系统试验结果时域对比曲线

Fig. 12 Time domain comparison curves of test results of suspension system

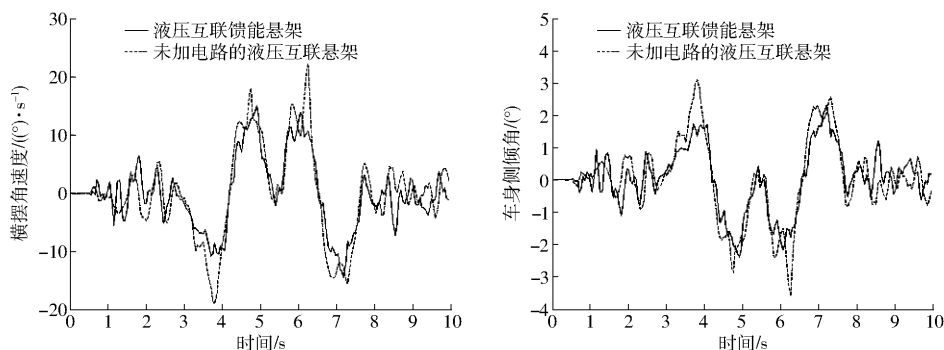


图13 双移线路面时域响应

Fig. 13 Time domain response of double-shifting line

另外,如图14所示,采样时间内单个车轮平均馈能功率达到30.5 W,验证此新型悬架具有良好的馈能特性。

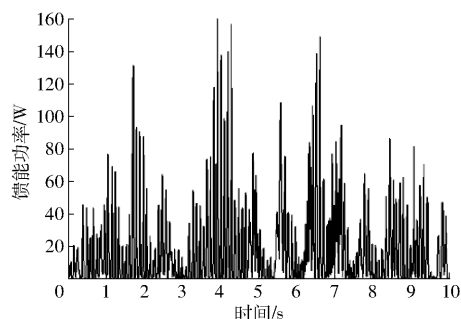


图14 随机激励试验馈能功率

Fig. 14 Energy feeding power of random excitation test

## 5 结论

(1)提出了一种由恒流电路控制的液压互联馈能悬架,在保证悬架动力学性能接近被动互联悬架的基础上,回收部分振动能量。

(2)建立了液压互联馈能悬架的AMESim与Simulink联合仿真模型,并通过试验验证了模型的正确性。

(3)相比较于未加电路控制的液压互联悬架,液压互联馈能悬架能合理改善整车平顺性与操稳性,有效提升了悬架性能,且在不同路面频率振动下的仿真与试验结果验证了恒电流控制电路的重要性。

## 参考文献

- 黄晨, 陈龙, 江浩斌, 等. 稳态工况下横摆角速度与侧倾角的关系分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2):34-39. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140207&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140207&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.007.  
HUANG Chen, CHEN Long, JIANG Haobin, et al. Relationship between vehicle yaw velocity and heeling angle under steady state [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):34-39. (in Chinese)
- 黄建兴, 赵义群. 人-车闭环操纵稳定性综合评价及其虚拟样机实现[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10):102-108.  
HUANG Jianxing, ZHAO Youqun. Comprehensive evaluation of human-vehicle closed-loop system for handling stability and technology of virtual prototype[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10):102-108. (in Chinese)
- SMITH M C, WALKER G W. Interconnected vehicle suspension [J]. Proc. IMech. E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2005, 219(3):295-307.
- SMITH W A, ZHANG N, JEKU J. Hydraulically interconnected vehicle suspension: theoretical and experimental ride analysis [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(1):41-64.
- SMITH W A, ZHANG Nong, HU William. Hydraulically interconnected vehicle suspension: handling performance[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(1-2):87-106.
- 何仁, 陈士安, 陆森林. 馈能型悬架的工作原理与结构方案评价[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5):5-9.  
HE Ren, CHEN Shian, LU Senlin. Operation theory and structure evaluation of reclaiming energy suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5):5-9. (in Chinese)
- MONTAZERI-GH M, SOLEYMANI M. Investigation of the energy regeneration of active suspension system in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(3):918-925.
- 王淑芳, 李涛, 岑豫皖, 等. 液压馈能型悬架系统的仿真研究[J]. 机械工程师, 2011(12):57-58.  
WANG Shufang, LI Tao, QIN Yuwan, et al. The simulation and study for reclaiming hydraulic energy in suspension system[J]. Mechanical Engineer, 2011(12):57-58. (in Chinese)
- ZHANG G, CAO J, YU F. Design of active and energy-regenerative controllers for DC-motor-based suspension[J]. Mechatronics, 2012, 22(8):1124-1134.
- 邵欣欣. 液压互联悬架建模及控制策略研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.

- SHAO Xinxin. Modeling of hydraulically interconnected suspension with control analysis[D]. Changsha: Hunan University, 2014. (in Chinese)
- 11 SHAO X, ZHANG N, DU H, et al. Fuzzy control of hydraulically interconnected suspension with configuration switching[C]// IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 2013:66 – 71.
- 12 王玉龙. 安装液压互联悬架的车辆建模及模态分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.  
WANG Yulong. Modeling and model analysis of vehicles fitted with roll resistant specific hydraulically interconnected suspension system[D]. Changsha: Hunan University, 2014. (in Chinese)
- 13 WANG L, ZHANG N, DU H. Experimental investigation of a hydraulically interconnected suspension in vehicle dynamics and stability control[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2012, 5(2):759 – 768.
- 14 XU G, ZHANG N, ROSER H M. Roll and pitch independently tuned interconnected suspension: modelling and dynamic analysis [J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(12):1 – 20.
- 15 KAWAMOTO Y, SUDA Y, INOUE H, et al. Modeling of electromagnetic damper for automobile suspension[J]. Journal of System Design & Dynamics, 2007, 1(3):524 – 535.
- 16 黄昆, 张勇超, 喻凡, 等. 电动式主动馈能悬架综合性能的协调性优化[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(2):226 – 230.  
HUANG Kun, ZHANG Yongchao, YU Fan, et al. Coordinate optimization for synthetical performance of electrical energy-regenerative active suspension[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(2):226 – 230. (in Chinese)
- 17 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)
- 18 方志刚, 过学迅. 汽车液电馈能式减振器馈能理论及阻尼特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.  
FANG Zhigang, GUO Xuexun. Energy recovery theory and damping characteristic research of vehicle hydraulic electromagnetic shock absorber [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 19 张晗, 过学迅, 徐琳, 等. 液电式馈能减振器外特性仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2):38 – 46.  
ZHANG Han, GUO Xuexun, XU Lin, et al. Simulation and test for hydraulic electromagnetic energy-regenerative shock absorber [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2):38 – 46. (in Chinese)
- 20 徐琳. 汽车液电馈能式减振器研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.  
XU Lin. Study on hydraulic transmission[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- 21 孙晓强, 陈龙, 汪少华, 等. 半主动空气悬架阻尼多模型自适应控制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3):351 – 357. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150351&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150351&journal_id=jcsam) DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.051.  
SUN Xiaoqiang, CHEN Long, WANG Shaohua, et al. Research on damping multi-model adaptive control of semi-active air suspension[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3):351 – 357. (in Chinese)
- 22 唐斌, 江浩斌, 陈龙, 等. 基于微分几何的 E – ECHPS 车辆转向稳定性控制[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12):285 – 293. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20151239&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151239&journal_id=jcsam) DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.039.  
TANG Bin, JIANG Haobin, CHEN Long, et al. Steering stability control of vehicles equipped with E – ECHPS based on differential geometry[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):285 – 293. (in Chinese)