

液压互联消扭悬架系统研究*

汪若尘 吴涛 孟祥鹏 黄欢 陈龙

(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

摘要: 根据悬架约束最小化原理,提出一种液压互联消扭悬架系统,阐述了该系统的结构与原理,构建了液压互联消扭悬架系统模型及整车动力学模型,分析了各种工况下液压互联消扭悬架动态性能,设计液压互联消扭悬架原理样机,进行台架试验,仿真与试验结果基本一致。结果表明:与传统被动悬架相比,液压互联消扭悬架能有效抑制车身振动,控制了车身姿态,协调了车辆的行驶平顺性与安全性,提高了车辆极端路况的路面通过性能,消除了部分车身扭转载荷,并能实时控制车辆的转向特性。

关键词: 液压互联消扭悬架 平顺性 通过性 试验

中图分类号: U463.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0288-06

Interconnected Hydraulic Torsion-elimination Suspension System

Wang Ruochen Wu Tao Meng Xiangpeng Huang Huan Chen Long

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: According to the principle of suspension constrained minimization, an interconnected hydraulic torsion-elimination suspension system was put forward. Firstly, the structure and principle of the system was introduced, the interconnected hydraulic torsion elimination suspension system was set up in the AMESim and the vehicle dynamic model was established with Matlab/Simulink. Co-simulation based on Matlab/Simulink and AMESim was carried out to analyze the dynamic performance of interconnected hydraulic torsion-elimination suspension system. The principle prototype of interconnected hydraulic torsion-elimination suspension system was designed and its bench test was performed. Simulation and experimental results were basically identical. The results showed that compared with the traditional passive suspension, interconnected hydraulic torsion-elimination suspension can effectively inhibit the body vibration, control the body posture and coordinate the vehicle riding comfort and safety, improve vehicle passing ability in extreme condition, eliminate part of the body torsion load and perform the real time control of vehicle steering characteristics.

Key words: Interconnected hydraulic torsion-elimination suspension Riding comfort Passing ability Test

引言

四轮汽车存在着多余约束,在路面起伏接近或大于静挠度的情况下,多余约束的缺点就会显得比较突出,通常是以减小悬架刚度与增大悬架动行程来解决,但是这些办法会带来横向角刚度与纵向角刚度的降低,削弱了车辆的操纵稳定性^[1-4]。多余

约束必然带来不平路面上各轮荷的不均匀,尤其是经常在崎岖不平路面上行驶的越野汽车,经常因不平路面对车身的冲击而出现过度变形、裂纹等早期损坏现象,同时也影响了其他零部件的使用寿命。郭孔辉提出了“约束最小化问题”原理^[5],并提出了一系列两轴和多轴车辆悬架的支承约束最小化实施方案,吉林大学^[6-7]提出了一种油气耦连悬架系统,

收稿日期: 2014-01-13 修回日期: 2014-02-13

* 国家自然科学基金资助项目(50905078)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2012714)、江苏省333高层次人才培养工程资助项目、江苏省六大人才高峰资助项目、江苏省高校青蓝工程资助项目和江苏大学拔尖人才工程资助项目

作者简介: 汪若尘,副教授,博士生导师,主要从事车辆动态性能模拟与控制研究,E-mail: wrc@ujs.edu.cn

增加了车辆的通过性能和驱动性能,提高了车辆的平顺性。但油气弹簧结构较复杂,成本较高,且由于工作介质(高压气体与油液)对相对运动部件表面粗糙度、装配精度、耐磨性、以及密封环节的设计都有较高的要求,需要专门的充气装备及作业规程对气室及时充气,以确保密封性,避免使用过程中气体缓慢泄露,故维修保养较麻烦^[8-12]。

本文提出一种液压互联方案,构建液压互联消扭悬架系统模型及整车动力学模型,分析其动态性能,设计原理样机,进行台架试验。该样机结构简单、成本低廉,提高了车辆的行驶平顺性、安全性及通过性,消除了部分车身扭转载荷,并能实时控制车辆的转向特性。

1 液压互联消扭悬架系统结构与原理

液压互联消扭悬架系统采用后悬互联、前悬保持传统悬架不变的结构。如图 1 所示,装有液压互联消扭悬架系统的车辆后悬包括弹簧、减震器、双作用液压缸、通畅管路、等臂杠杆、可控节流阀、电控单元和显示屏。

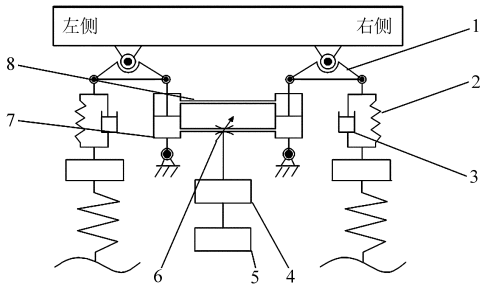


图 1 液压消扭悬架后悬

Fig. 1 Rear suspension of interconnected hydraulic torsion-elimination suspension system

- 1. 等臂杠杆 2. 弹簧 3. 减震器 4. 电控单元 5. 显示屏
- 6. 节流阀 7. 左右双作用液压缸 8. 通畅管路

左右双作用液压缸的上下腔通过节流阀和通畅管路对应互连,节流阀的开度受电控单元控制,显示屏位于驾驶室内,方便驾驶员观察与控制液压互联消扭悬架系统的工作。

车辆后悬在传统悬架基础上利用了等臂杠杆,相当于串联了一个双作用液压缸。由于后悬 2 个液压缸之间充分连通,所以两液压缸内的油液压力总会快速平衡相等,使后悬总是趋向于朝着受力相等的方向运动,以减小多余约束的影响。假设车身保持水平时,左后轮向上运动,悬架处于压缩行程,而右后轮向下运动,悬架处于复原行程,此时左后弹簧受到压缩通过等臂杠杆使双作用液压缸下腔油压升高,右后弹簧受到拉伸通过等臂杠杆使双作用液压缸下腔油压降低。传统悬架车辆可能出现左后车轮

受到很大载荷,而右后车轮腾空的情况,大大降低了车辆横向和纵向的稳定性以及车辆的通过性能,而液压互联悬架系统中油液通过相互流动减小了左后轮的垂向作用力,增加了左后轮的垂向作用力,使两后轮载荷仍能趋于相等且都与地面保持良好接地,车辆维持水平姿态。

从力学上来说,把后悬左右悬架的力向中心简化,则左右力矩相抵消,则后悬的垂向作用力即化简为一个作用在后悬中心的合力,所以装有液压互联消扭悬架系统后车辆相当于只受到 3 个约束作用,构成了拟三角支承,从而大大改善了车轮的接地性。

这种互联方式,消除了多余约束,改善了车轮的接地性,提高了行驶的平顺性与不平路面的通过性能,并消除了部分车身扭转载荷。通过管路中的节流阀控制后悬的耦合程度降低因互联导致拐弯时侧倾角变大,完全关闭时相当于传统悬架,适当的互联能增加车辆拐弯时的不足转向^[13-17]。

2 液压互联消扭悬架系统建模

2.1 整车动力学模型

基于 Matlab/Simulink 软件,建立整车动力学模型^[13-14],如图 2 所示。

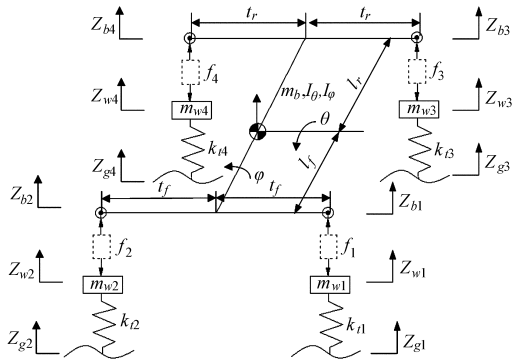


图 2 整车动力学模型

Fig. 2 Vehicle dynamic model

根据模型,其质心处垂直运动方程为

$$m_b \ddot{Z}_c = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \tag{1}$$

车身俯仰运动方程为

$$I_\theta \ddot{\theta} = l_r (f_3 + f_4) - l_f (f_1 + f_2) \tag{2}$$

车身侧倾运动方程为

$$I_\phi \ddot{\phi} = l_f (f_1 - f_2) + l_r (f_3 - f_4) \tag{3}$$

车轮的垂直运动方程为

$$\begin{cases} m_{w1} \ddot{Z}_{w1} = -k_{t1} (Z_{w1} - Z_{g1}) - f_1 \\ m_{w2} \ddot{Z}_{w2} = -k_{t2} (Z_{w2} - Z_{g2}) - f_2 \\ m_{w3} \ddot{Z}_{w3} = -k_{t3} (Z_{w3} - Z_{g3}) - f_3 \\ m_{w4} \ddot{Z}_{w4} = -k_{t4} (Z_{w4} - Z_{g4}) - f_4 \end{cases} \tag{4}$$

当俯仰角与侧倾角较小时有

$$\begin{cases} Z_{b1} = Z_c - l_f \theta + l_f \varphi \\ Z_{b2} = Z_c - l_f \theta - l_f \varphi \\ Z_{b3} = Z_c + l_f \theta + l_f \varphi \\ Z_{b4} = Z_c + l_f \theta - l_f \varphi \end{cases} \quad (5)$$

整车模型的相关参数见表 1。

表 1 整车模型主要参数

参数	数值
悬挂质量 m_b/kg	1 380
俯仰转动惯量 $I_\theta/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	2440
侧倾转动惯量 $I_\varphi/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	380
前轴非悬挂质量 $m_{w1}, m_{w2}/\text{kg}$	40.5
后轴非悬挂质量 $m_{w3}, m_{w4}/\text{kg}$	45.4
轮胎刚度 $k_{t1}, k_{t2}, k_{t3}, k_{t4}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	192
前轴至车身质心距离 l_f/m	1.25
后轴至车身质心距离 l_r/m	1.51
前轴轮距的一半 l_f/m	0.74
后轴轮距的一半 l_r/m	0.74

2.2 液压互联消扭悬架建模

在 AMESim 软件中建立液压互联消扭悬架模型,主要包括由螺旋弹簧与减震器并联组成的前悬架模型以及由双作用液压缸与传统悬架串联并通过通畅管路互联的后悬架模型,其主要参数如表 2 所示。

表 2 液压互联悬架参数

参数	数值
前悬架刚度 $k_{11}, k_{12}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	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
双作用液压缸直径 D/m	0.048
活塞杆直径 d/m	0.02
通畅管路内径 d_i/m	0.01
通畅管路长度 L/m	1.5

2.3 联合仿真设置

Matlab/Simulink 与 AMESim 的联合仿真^[18-20]是在 2 种软件(两部分模型)同时运行的状态下进行的。在 AMESim 软件中定义的 4 个输入状态变量分别为前后悬架作用力 f_1, f_2, f_3, f_4 ; 8 个输出状态变量分别为簧载质量与非簧载质量位移 $Z_{b1}, Z_{w1}, Z_{b2}, Z_{w2}, Z_{b3}, Z_{w3}, Z_{b4}, Z_{w4}$ 。在 AMESim 软件中进行系统编译生成供 Simulink 使用的 S 函数,并以 Simulink 为仿真主界面,从而实现 AMESim 与 Matlab/Simulink 联合仿真。系统联合仿真模型如图 3 所示。

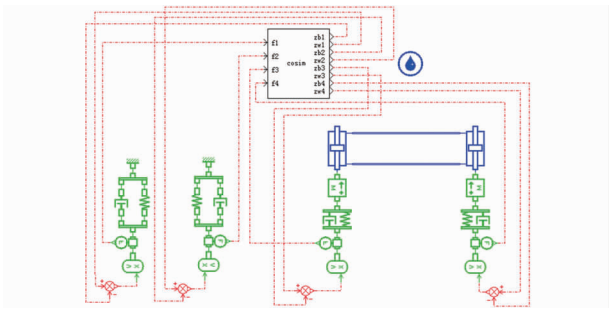


图 3 系统联合仿真模型

Fig.3 System co-simulation model

3 系统平顺性仿真

选择一个周期长为 3 m,幅值为 0.05 m,左右轮输入相位差为 180°的对扭路面,车速选择 30 km/h。在此工况对车身侧倾角、车轮动载荷、左前车身加速度、左前悬架动行程进行时域仿真分析,系统时域响应如图 4 所示,各轮胎动载荷幅值对比如图 5 所示。

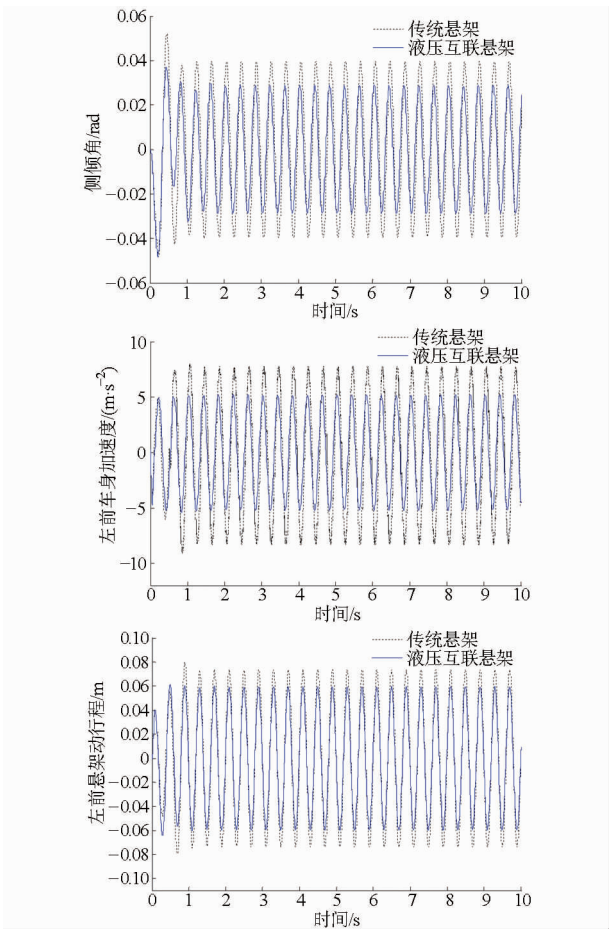


图 4 对扭路面系统时域响应

Fig.4 System time domain response on twisting roads

由图 4 仿真结果可以看出,装有液压互联消扭悬架系统的车辆在单频对扭路面上侧倾角明显减小,这与预想的一致,而且驾驶员附近的车身加速度、悬架动行程也较传统悬架小,说明液压互联消扭悬架在提高了车辆行驶平顺性的同时没有以牺牲悬

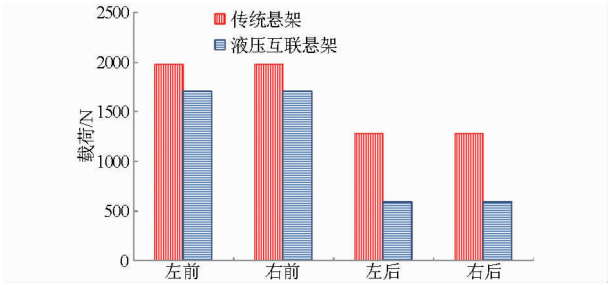


图5 各轮胎动载荷幅值

Fig.5 Tire dynamic load amplitude

架运动空间为代价;从图5可看出轮胎垂直载荷波动也较小,而且未互联的2个车轮,由于后轮的互联作用,波动也有所减小。说明液压互联悬架协调了行驶平顺性与安全性,提高了车辆综合性能。

4 系统操稳性、通过性及消扭性分析

在AMESim中建立液压互联悬架整车18自由度模型,在不同工况下研究液压互联悬架对于整车操纵稳定性、不平路面的通过性以及X轴方向车身扭矩的影响。

4.1 系统操稳性能仿真分析

方向盘在0.1s内由0°阶跃至100°,同时,发动机转矩在10s内由零线性增加至500N·m,记录横摆角加速度,研究液压互联消扭悬架系统对于车辆稳态转向特性的影响。横摆角速度增益及侧倾角对比如图6所示。

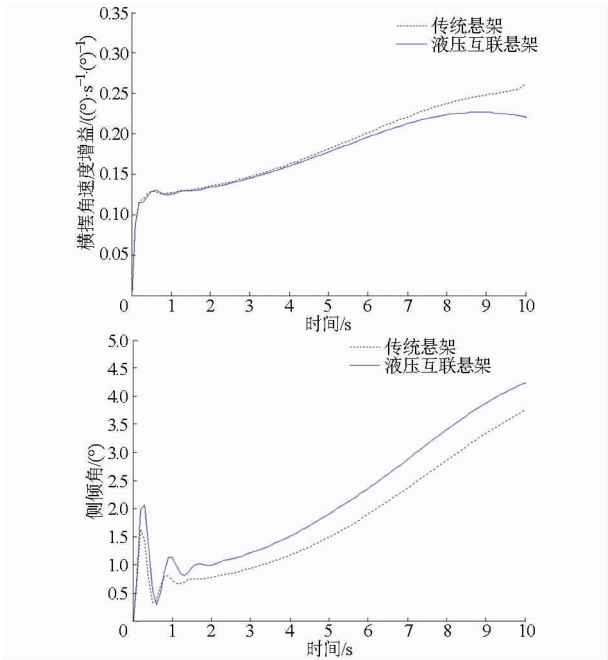


图6 双移线路面时域响应

Fig.6 System time domain response on double lane road

由图6可知,液压互联消扭悬架系统可以改变稳态转向特性,使不足转向度加大,但同时会使车身侧倾角变大,互联悬架系统流量控制阀的灵活控制

作用,可以很好地实时调节车辆的转向特性,如流量控制阀关闭,即相当于传统悬架,车辆的横向稳定性能就不发生任何改变;而通过ECU算法实时控制节流阀开度,调节互联程度,可以改变车辆的转向特性,增加或减小车辆的不足转向度。

4.2 系统通过性及对消扭性能仿真分析

选择周长为4m,振幅为0.08m,相位差为180°的对扭路面,发动机的转矩在10s内从零增加到500N·m之后保持不变。研究车速的变化及车身X轴方向扭矩的变化,如图7所示。

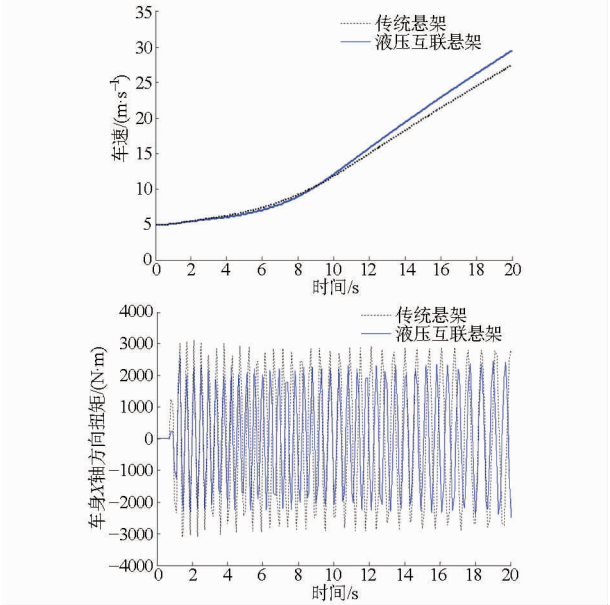


图7 对扭路面时域响应

Fig.7 System time domain response on twisting road

由图7可知,在相同发动机曲轴转矩输出时,装有液压互联悬架系统的车辆行驶速度应该更快,液压互联悬架系统可以显著提高越野车车速,而越野车车速的提高说明液压互联悬架系统对车辆的通过性有提升作用,车身X轴方向扭矩大幅降低说明液压互联消扭悬架系统能消除部分车身扭转载荷,提高车辆使用寿命。

5 台架试验

为了验证液压互联悬架的有效性和可行性,设计了液压互联消扭悬架原理样机,并安装在试验样车底盘上,试验现场如图8所示。

利用MTS320型四通道轮胎耦合道路模拟试验系统进行信号加载,运用LMS SCADASⅢ型信号采集系统,运用陀螺仪、位移传感器与加速度传感器进行信号采集。试验采用正弦激励输入以及对扭路面信号输入,正弦激励分别取0.3、0.5、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、9.5、10.0、10.5、11.0、12.0、13.0、14.0、15.0Hz。左右

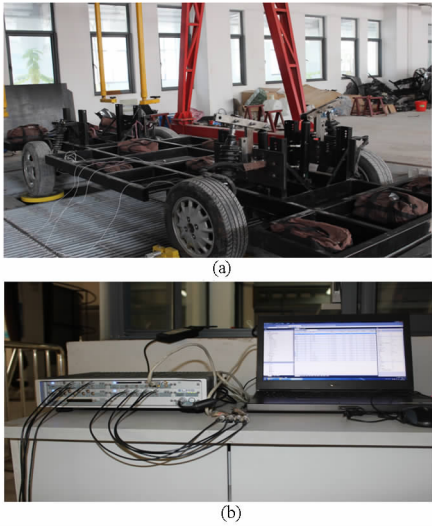


图 8 试验现场

Fig. 8 Test site

(a) 试验样车 (b) LMS SCADASⅢ信号采集系统

轮输入相位差为 180° ,幅值均为 10 mm,以频率为横坐标,研究侧倾角幅值随频率的变化,系统响应如图 9、10 及表 3 所示。

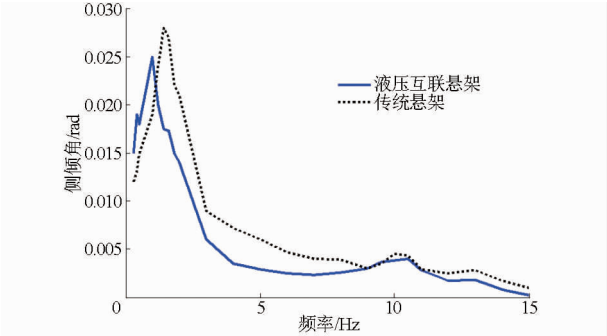


图 9 侧倾角频域响应

Fig. 9 Frequency domain response of roll angle

由图 9 可知,液压互联消扭悬架的低频峰值左移且共振峰值降低,在整个频域范围内侧倾角幅值都有明显的下降,尤其在 $1 \sim 8\text{ Hz}$ 内侧倾角幅值大幅度降低为液压互联悬架的最佳作用范围,提高了车辆的横向稳定性。

由图 10 和表 3 可知,在对扭路面信号下,液压互联消扭悬架相对于传统被动悬架,横向稳定性、乘坐的舒适性和安全性都有所提高。

6 结论

(1)车辆行驶在崎岖不平路面上时,液压互联消扭悬架系统对改善车辆的平顺性有很好的作用,通过对扭路面时,液压互联消扭悬架系统的车辆侧倾角、车轮动载荷及驾驶员位置处垂直振动加速度均方根都较小。

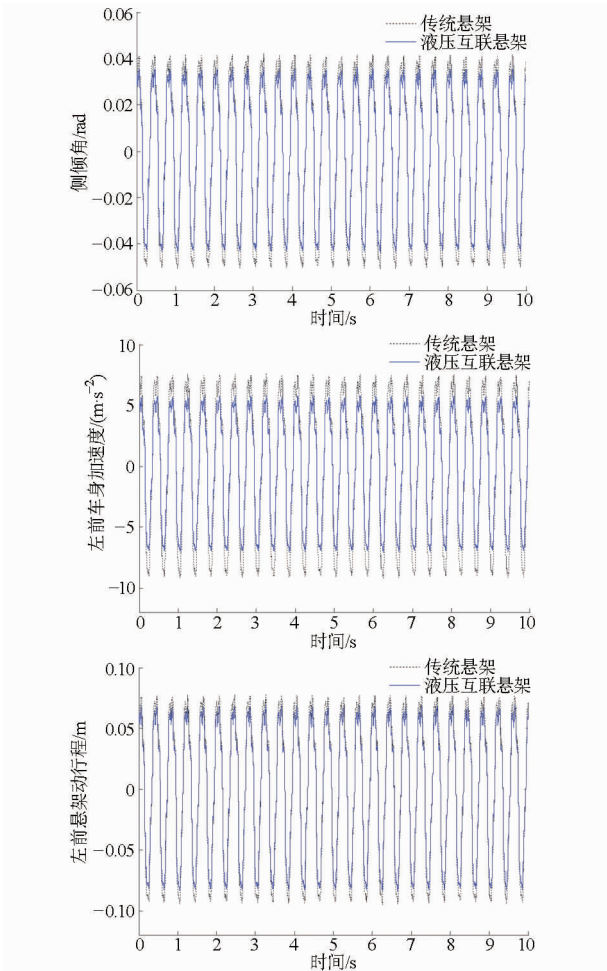


图 10 对扭路面系统时域响应

Fig. 10 System time domain response on twisting road

表 3 对扭路面响应均方根

Tab. 3 RMS value of system response on twisting road

参数	传统 悬架	液压互联 悬架	降幅/ %
侧倾角/rad	0. 030 5	0. 025 4	16. 7
左前车身加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	5. 4737	3. 958 0	27. 6
左前悬架动行程/m	0. 051 3	0. 047 9	6. 62
左前车身轮胎动载荷/N	1 434. 3	1 121. 0	21. 7
右后车身轮胎动载荷/N	906. 41	584. 94	5. 4

(2)操纵稳定性方面,液压互联悬架对车辆的稳态转向性能也有影响,可以增加车辆的不足转向度,加入控制系统的液压互联消扭悬架系统适用范围更广,更加灵活,不但可以调节车辆的平顺性,也可以实时控制车辆的转向特性。

(3)液压互联消扭悬架系统对增加车辆的驱动能力有积极影响。液压互联消扭悬架系统通过平衡悬架之间载荷,使得互联悬架的车轮受力更加均匀,驱动能力增加,并能消除部分车身扭转载荷。

参 考 文 献

- 1 陈龙,黄晨,江浩斌,等. 基于悬架效用函数的车身姿态控制[J]. 农业机械学报, 2011,42(8): 15-20.
Chen Long,Huang Chen,Jiang Haobin,et al. Body posture control based on suspension utility function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(8): 15-20. (in Chinese)
- 2 Mith M C,Walker G W. Interconnected vehicle suspension[J]. Proc. IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering,2005, 219(3):295-307.
- 3 Ideout G,Anderson R. Experimental testing and mathematical modeling of the interconnected hydragas suspension system[C]// SAE Paper 2003-01-0312,2003.
- 4 Smith W,Zhang N. Recent developments in passive interconnected vehicle suspension[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2010, 5(1):1-18.
- 5 郭孔辉. 阀控均载耦连悬架系统:中国,CN200810212290.0 [P]. 2009-01-21.
- 6 陈禹行. 油气耦连悬架系统的建模与仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2009.
Chen Yuxing. Modeling and simulation analysis of hydro-pneumatic coupled suspension system[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 7 郭孔辉,卢荡,宋杰,等. 油气消扭悬架的试验与仿真[J]. 吉林大学学报:工学版,2008, 38(4): 754-757.
Guo Konghui, Lu Dang, Song Jie, et al. Test and simulation on hydro-pneumatic torsion eliminating suspension[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition,2008, 38(4): 754-757. (in Chinese)
- 8 赵春明. 油气悬架系统动力学理论及相关技术研究[D]. 大连:大连理工大学,1998.
Zhao Chunming. Hydro-pneumatic coupled suspension system theory and related technology research [D]. Dalian: Dalian University of Technology,1998. (in Chinese)
- 9 孙求理. 油气悬挂系统的理论研究与优化[D]. 上海:同济大学,1994.
Sun Qiuli. Hydro-pneumatic coupled suspension system theoretical research and optimization[D]. Shanghai: Tongji University, 1994. (in Chinese)
- 10 方新. 连通式油气悬架系统特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.
Fang Xin. Research on connected hydro pneumatic suspension system [D]. Dalian:Dalian University of Technology,2011. (in Chinese)
- 11 Hayakawa K,Matsumoto K,Yamashita M,et al. Robust H2 feedback control of decoupled automobile active suspension systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1999, 44(2): 392-396.
- 12 陈龙,张孝良,汪若尘. 应用惯性蓄能器的车辆悬架:中国, 200810123830.8[P]. 2008-12-24.
- 13 张孝良. 蓄能悬架系统及其试验[D]. 镇江:江苏大学, 2009.
Zhang Xiaoliang. Suspensions employing inerter and its bench test[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2009. (in Chinese)
- 14 祝辉,陈无畏. 汽车悬架、转向和制动系统建模与相互影响分析[J]. 农业机械学报,2010,41(1):7-12.
Zhu Hui, Chen Wuwei. System modeling and interaction analysis of vehicle suspension, steering and braking system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(1): 7-12. (in Chinese)
- 15 刘伟,刘大维,陈焕明,等. 基于联合仿真的半主动悬架车辆行驶平顺性研究[J]. 农业机械学报,2009,40(6): 16-22.
Liu Wei,Liu Dawei,Chen Huanming,et al. Ride comfort of MR-damper semi-active suspension systems based on co-simulations [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(6): 16-22. (in Chinese)
- 16 丁飞,张农,韩旭. 安装液压互联悬架货车的机械液压多体系统建模及模态分析[J]. 机械工程学报,2012,48(6):116-123.
Ding Fei, Zhang Nong,Han Xu. Modeling and modal analysis of multi-body truck system fitted with hydraulically interconnected suspension[J]. Journal of Mechanical Engineering,2012,48(6):116-123. (in Chinese)
- 17 汪若尘,孟祥鹏,施德华,等. 车辆惯容器-弹簧-阻尼器半主动悬架模糊控制[J]. 农业机械学报,2013,44(12):1-5.
Wang Ruochen, Meng Xiangpeng, Shi Dehua, et al. Fuzzy control of vehicle ISD semi-active suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(12):1-5. (in Chinese)
- 18 孙涛,徐桂红,柴陵江. 四轮非平稳随机激励路面模型的研究[J]. 汽车工程,2013,35(10):868-872.
Sun Tao, Xu Guihong, Chai Lingjiang. A study on the road model with four-wheel non-stationary random excitations [J]. Automotive Engineering,2013,35(10):868-872. (in Chinese)
- 19 Ding Fei, Zhang Nong, Han Xu. Dynamic characteristics of a tri-axle heavy truck fitted hydraulically anti-pith interconnected suspension[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering,2011,1(4):415-423.
- 20 Shao Xinxin,Du Haiping,Zhang Nong,et al. Switched fuzzy control of hydraulically interconnected suspension with experimental validation[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering,2014,4(2):99-108.