DOI: 10.3901/JME.2015.10.137

基于虚拟样机模型的液压 ISD 悬架动态性能分析*

汪若尘 黄欢 孟祥鹏 吴涛 陈龙

(江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013)

摘要: 悬架是汽车的重要总成, 惯容器的出现为汽车悬架技术的发展开辟了一个新的方向和领域。为了研究液压“惯容器-弹簧-阻尼器”(Inerter-spring-damper, ISD)悬架性能, 以试验样车为基础, 分别建立整车 ISD 悬架虚拟样机模型和液压惯容器模型, 进行系统的联合仿真, 分析随机路面谱输入和脉冲路面谱输入作用下液压 ISD 悬架的动态特性, 研制液压惯容器和 ISD 悬架原理样机, 并进行四通道轮胎耦合道路模拟台架试验。结果表明, 与传统被动悬架相比, 液压 ISD 悬架具有更好的整车动态性能, 车身的质心垂直加速度、俯仰角加速度、侧倾角加速度、左前悬架动行程和左前轮胎动载荷方均根值下降明显, 有效地抑制了车身振动, 控制了车身姿态, 协调了整车乘坐舒适性和行驶安全性之间的矛盾。

关键词: 汽车悬架; 液压惯容器; 联合仿真; 台架试验; 乘坐舒适性; 行驶安全性

中图分类号: U463

Dynamic Performance Analysis of Hydraulic ISD Suspension Based on Virtual Prototype Model

WANG Ruochen HUANG Huan MENG Xiangpeng WU Tao CHEN Long

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

Abstract: Suspension is an important assembly of vehicle. The emergence of inerter opens up a new direction and field for the development of automotive suspension technology. To study the performance of hydraulic “inerter-spring-damper(ISD)” suspension, on the basis of test prototype, a virtual prototype model of vehicle ISD suspension and hydraulic inerter model are established respectively. Co-simulation is carried out to analyze the dynamic performance of hydraulic ISD suspension with stochastic road spectrum input and pulse road spectrum input. The principle prototypes of hydraulic inerter and ISD suspension are designed and its four-channel tyre coupling road simulation bench test is performed. The results show that the hydraulic ISD suspension has better vehicle dynamic performance in contrast to the traditional passive suspension, and root mean square values of vertical acceleration of the centre of body mass, pitching angle acceleration, roll angle acceleration, dynamic schedule of the left front suspension and dynamic load of the left front tire decline obviously. The hydraulic ISD suspension can inhibit body's vibration, control the posture of body effectively and coordinate the contradiction between vehicle's ride comfort and driving safety.

Key words: automotive suspension; hydraulic inerter; co-simulation; bench test; ride comfort; driving safety

0 前言

悬架是汽车的重要总成, 对汽车的乘坐舒适性和安全性有直接影响^[1]。2001 年英国学者 SMITH 等^[2-4]提出了惯容器的概念, 并研制了齿轮齿条式和滚珠丝杠式惯容器。随后将惯容器应用到汽车悬架以改善整车综合性能, 逐渐形成“惯容器-弹簧- 阻尼

器”(Inerter-spring-damper, ISD)新悬架结构体系, 引起了汽车工程界的广泛关注^[5-8]。

2007 年陈龙等^[9-13]开始对惯容器和 ISD 悬架进行研究。齿轮齿条惯容器结构简单、承载力大, 但齿轮啮合存在背隙(回程间隙)问题, 高速旋转换向时会产生迟滞现象, 而且在大负荷作用下, 轮齿很容易因短时过载或冲击载荷而折断。滚珠丝杠惯容器可以通过预紧力来消除滚珠丝杠副的背隙, 能在一定程度上解决迟滞和噪声问题, 但是较大的预紧力使摩擦力增大, 难以协调背隙和摩擦力之间的矛盾。针对机械惯容器的上述缺点, 江苏大学研制了

* 国家自然科学基金(50905078)、江苏省自然科学基金(BK2012714)、江苏省 333 工程、江苏省六大人才高峰、江苏省青蓝工程和江苏大学拔尖人才工程资助项目。20140606 收到初稿, 20141108 收到修改稿

液压惯容器。液压系统不存在背隙,而且结构简单、承载力大、运行噪声小,相比于齿轮齿条式和滚珠丝杠式惯容器更有发展和应用前景。

基于 ADAMS 建立 ISD 悬架整车模型,利用 AMESim 建立液压惯容器模型,并进行联合仿真,研究液压 ISD 悬架动态性能。研制液压惯容器和 ISD 悬架原理样机,进行台架试验研究。

1 液压 ISD 悬架

1.1 两级串联 ISD 悬架系统

ISD 悬架主要由三种基本元件组成:惯容器、弹簧和阻尼器。陈国涛等^[14]基于机电相似性理论和网络综合的方法研究出一种以舒适性为导向的两级串联 ISD 悬架结构,如图 1a 所示。

理论上,该悬架能在全频率范围内缓冲和衰减由路面不平引起的振动和冲击。但在实际应用中,惯容器会在车身重力的作用下被“击穿”而失效,因此在惯容器两端并联旁路弹簧,得到改进结构,如图 1b 所示。

(a) 理论结构 (b) 改进结构

图 1 两级串联 ISD 悬架

为降低悬架高度,通过等臂杠杆改变悬架作用力方向,将两级串联式悬架“对折”,使其结构紧凑,易于布置,如图 2 所示。

图 2 杠杆式 ISD 悬架

1.2 液压惯容器工作原理

液压惯容器是由液压缸和液压马达等组成的封闭液压系统,如图 3 所示。它的两个端点分别为

液压缸筒和活塞杆,两者的相对运动推动油液流动,从而驱动液压马达旋转,马达带动飞轮旋转,以实现惯容。

图 3 液压惯容器原理图

惯容器两端点作用力 $F_1 = F_2 = F$, 且

$$F = b(\ddot{x}_2 - \ddot{x}_1) \quad (1)$$

式中, b 为惯容系数; $\ddot{x}_1$ 、 $\ddot{x}_2$ 分别为液压缸筒和活塞杆的加速度, 且

$$b = I \frac{\eta_v}{\eta_m} \left(\frac{A}{D} \right)^2 \quad (2)$$

式中, I 为飞轮转动惯量; η_v 为马达容积效率; η_m 为马达机械效率; A 为活塞截面积; D 为马达流量与角速度比。

2 悬架联合仿真模型的建立

2.1 整车 ISD 悬架虚拟样机建模

本课题研究所选用的试验样车为自行研制的乘用车底盘,通过实际测量和计算,得到试验样车的主要参数如表 1 所示,作为整车建模的参考,其中轮胎规格为 195/65R15。

表 1 试验样车主要参数

参数	数值
前轮距 B_f/mm	1 480
后轮距 B_r/mm	1 480
前轴至车身质心距离 l_f/mm	1 250
后轴至车身质心距离 l_r/mm	1 510
悬架质量 m/kg	1 380
俯仰转动惯量 $I_\theta/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	2 440
侧倾转动惯量 $I_\varphi/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	380
前轴非悬架质量 $m_n, m_{n'}/\text{kg}$	40.5
后轴非悬架质量 $m_{t1}, m_{t'}/\text{kg}$	45.4
前悬惯容系数 $b_n, b_{n'}/\text{kg}$	447.5
后悬惯容系数 $b_{t1}, b_{t'}/\text{kg}$	332
前悬一级弹簧刚度 $k_{n1}, k_{n1'}/(\text{kN}/\text{m})$	17
后悬一级弹簧刚度 $k_{t1}, k_{t1'}/(\text{kN}/\text{m})$	22
前悬二级弹簧刚度 $k_{n2}, k_{n2'}/(\text{kN}/\text{m})$	15
后悬二级弹簧刚度 $k_{t2}, k_{t2'}/(\text{kN}/\text{m})$	15
前悬一级阻尼系数 $c_{n1}, c_{n1'}/[\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}]$	1.5
后悬一级阻尼系数 $c_{t1}, c_{t1'}/[\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}]$	1.5
前悬二级阻尼系数 $c_{n2}, c_{n2'}/[\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}]$	2.8
后悬二级阻尼系数 $c_{t2}, c_{t2'}/[\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}]$	2.8

整车 ISD 悬架模型是一个较复杂的机械系统，建模时对模型进行如下简化和假设：① 整车中所有杆件均为刚体，忽略其弹性；② 所有杆件之间均为铰接，忽略其内部间隙；③ 各运动副内的摩擦力忽略不计；④ 弹簧和阻尼器均简化为线性弹簧和线性阻尼器。基于 ADAMS 软件，根据如图 2 所示的杠杆式布置方案，建立整车 ISD 悬架虚拟样机模型，如图 4 所示。

图 4 整车 ISD 悬架虚拟样机模型

由图 4 可知，整车模型包括前悬架模型(双横臂式独立悬架)、后悬架模型(多连杆式独立悬架)、轮胎模型、车身模型(简化为刚性球体)和转向系统模型，考虑建模难易，建立液压惯容器实体模型和二级减振器时使用同一对端点。同时，模拟四通道轮胎耦合道路模拟试验系统建立激振台模型。激振台与地面用平移副约束，通过定义驱动即可模拟路面谱激励信号，对轮胎进行位移信号输入，使得仿真时整车模型产生垂向、俯仰、侧倾等振型。

2.2 液压惯容器建模

在 AMESim 软件中建立液压惯容器模型，主要

包括液压缸(双活塞杆双作用式液压缸)、液压马达(摆线钢球式液压马达)、飞轮以及管路(高压橡胶管)四部分。根据式(2)计算出前、后悬架惯容器飞轮转动惯量分别为 I_f 和 I_r ，液压惯容器主要参数如表 2 所示。

表 2 液压惯容器主要参数

参数	数值
液压缸内径 D_c/mm	45
活塞杆直径 d/mm	20
液压马达排量 $V/(\text{cm}^3/\text{r})$	8.2
液压马达额定转速 $n/(\text{r}/\text{min})$	1 537
液压马达额定流量 $Q/(\text{L}/\text{min})$	14
液压马达机械效率 η_m	0.65
液压马达容积效率 η_v	0.92
前悬飞轮转动惯量 $I_f/(\text{kg}\cdot\text{mm}^2)$	408.34
后悬飞轮转动惯量 $I_r/(\text{kg}\cdot\text{mm}^2)$	302.95

2.3 联合仿真设置

ADAMS 和 AMESim 的联合仿真需要通过输入输出状态变量实现数据交互。在 ADAMS 中定义 4 个输入状态变量，分别为前后悬架四个惯容器的出力：FL_grq_force、FR_grq_force、RL_grq_force、RR_grq_force；8 个输出状态变量分别为 4 个惯容器的活塞杆和液压缸筒的位移：FL_lower_dis、FL_upper_dis、FR_lower_dis、FR_upper_dis、RL_lower_dis、RL_upper_dis、RR_lower_dis、RR_upper_dis。通过 ADAMS/Controls 模块进行模型导出设置，将生成的接口文件 foramesim.inf 导入 AMESim，并以 AMESim 作为仿真主界面，系统联合仿真模型如图 5 所示。

图 5 系统联合仿真模型

3 平顺性仿真分析

分别采用随机路面谱输入和脉冲路面谱输入进行仿真,运用 Matlab/Simulink 建立路面谱模型,将产生的路面信号数据导入 ADAMS 并生成样条曲线,利用 AKISPL 函数将样条数据拟合成功函数曲线,从而建立驱动信号。

3.1 随机路面谱输入

选取路面等级为 B 级,车速 $v=30$ m/s,系统仿真的时域响应如图 6 所示,方均根值如表 3 所示。

图 6 随机路面谱激励下的时域响应

表 3 随机路面谱激励下的响应方均根值

参数	传统悬架	液压 ISD 悬架	降幅(%)
质心垂直加速度/(m/s ²)	0.194 6	0.157 1	19.3
俯仰角加速度/(rad/s ²)	0.125 9	0.104 6	16.9
侧倾角加速度/(rad/s ²)	0.435 6	0.391 2	10.2
前左悬架动行程/m	0.003 3	0.003 2	3.1
前左轮胎动载荷/N	220.34	193.87	12.0

由图 6 和表 3 可知,在随机路面谱输入下,液压 ISD 悬架的隔振性能优于传统被动悬架,车辆行驶平顺性得到了有效改善。

3.2 脉冲路面谱输入

取长坡形单凸块模型作为脉冲路面谱输入,系统仿真的时域响应如图 7 所示。

图 7 脉冲路面谱激励下的时域响应

由图 7 可知,在脉冲路面谱输入下,液压 ISD 悬架相对于传统被动悬架,质心垂直加速度、俯仰角加速度峰值均有所降低,分别降低了 23.3%和 24.1%。

4 整车液压 ISD 悬架试验

为了验证液压 ISD 悬架的有效性和可行性,研制了液压惯容器和 ISD 悬架原理样机,根据杠杆式的布置方案将其安装在试验样车上,如图 8 所示。

图 8 两级串联 ISD 悬架样机布置

由图 8 可知, 杠杆支架与车身固定, 杠杆与杠杆支架用旋转副约束; 第一级减振器下端与转向节总成用旋转副约束, 上端与杠杆外侧端用球副约束; 第二级减振器下端与车身用旋转副约束, 上端与杠杆内侧用球副约束; 惯容器下端与车身用旋转副约束, 上端与杠杆内侧端用旋转副约束。可知惯容器的安装位置与悬架的第一级不等臂, 因此惯容器的惯容系数已按杠杆臂长进行了折算, 通过更换飞轮以改变飞轮转动惯量来加以调整。

将陀螺仪安装于车身质心位置, 采集车身的质心垂直加速度、俯仰角加速度和侧倾角加速度信号; 将位移传感器一端安装于前左车身, 另一端安装于前左车轮中心, 采集前左悬架动行程信号; 将另一位移传感器一端安装于前左车轮中心, 另一端安装于前左激振台, 采集前左轮胎动行程信号并用于计算前左轮胎动载荷。运用 LMS SCADAS III 信号采集系统和计算机实时采集并保存各个传感器信号数据, 试验现场如图 9 所示。

(a) 试验样车

(b) LMS SCADAS III 信号采集系统

图 9 试验现场

利用 MTS320 四通道轮胎耦合道路模拟试验系统进行信号加载, 分别加载某汽车试验场的沙石路面谱和 GB5902-1986 脉冲路面谱, 系统的时域响应如图 10、表 4 和图 11 所示。

由图 10 和表 4 可知, 在沙石路面谱输入下, 液压 ISD 悬架相对于传统被动悬架, 减振性能有所提高, 改善了汽车的乘坐舒适性和整车动态性能。

图 10 沙石路面谱激励下的时域响应

表 4 沙石路面谱激励下的响应方均根值

参数	传统悬架	液压 ISD 悬架	降幅(%)
质心垂直加速度/ (m/s^2)	0.226 9	0.187 3	17.5
俯仰角加速度/ (rad/s^2)	0.139 0	0.117 8	15.3
侧倾角加速度/ (rad/s^2)	0.480 6	0.431 2	10.3
前左悬架动行程/m	0.009 7	0.009 5	2.1
前左轮胎动载荷/N	281.17	260.45	7.4

(a) 质心垂直加速度

图11 脉冲路面谱激励下的时域响应

由图11可知,在脉冲路面谱输入下,液压ISD悬架相对于传统被动悬架,质心垂直加速度、俯仰角加速度峰值分别降低了15.2%和21.7%。

5 结论

(1) 基于ADAMS和AMESim的液压ISD悬架联合建模与仿真方法可行,所建模型准确,仿真结果可信。

(2) 试验结果表明,在沙石路面谱输入下,液压ISD悬架相对于传统被动悬架,如表4所示的各评价指标均有所降低;在脉冲路面谱输入下,车身的质心垂直加速度、俯仰角加速度峰值分别降低了15.2%和21.7%。悬架隔振性能明显提升,协调了整车乘坐舒适性和行驶安全性之间的矛盾。

参考文献

- [1] 陈家瑞. 车辆悬架系统减振控制的研究[J]. 华东交通大学学报, 2004, 21(1): 87-90.
CHEN Jiarui. A study on vibration damp control for vehicle suspension system[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2004, 21(1): 87-90.
- [2] SMITH M C. Force-controlling mechanical device: America, US07316303B2[P]. 2008-01-08.
- [3] SMITH M C. Performance benefits in passive vehicle suspension employing inerters[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 42(4): 235-257.
- [4] PAPAGEORGIOU C, SMITH M C. Laboratory experimental testing of inerters[C]//Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 3351-3356.
- [5] SMITH M C. Synthesis of mechanical networks: the inerter[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(10): 1648-1662.
- [6] SMITH M C, WANG Fucheng. Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters[C]//42nd IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii USA, 2003: 2258-2263.
- [7] SCHEIBE F, SMITH M C. Analytical solutions for optimal ride comfort and tyre grip for passive vehicle suspensions[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(10): 1229-1252.
- [8] PAPAGEORGIOU C, SMITH M C. Positive real synthesis using matrix inequalities for mechanical networks: Application to vehicle suspension[J]. IEEE Trans. Control System Technology, 2006, 14(3): 423-435.
- [9] 陈龙, 张孝良, 江浩斌, 等. 基于机电系统相似性理论的蓄能悬架系统[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1248-1250.
CHEN Long, ZHANG Xiaoliang, JIANG Haobin, et al. Vehicle suspension system employing inerter based on electrical-mechanical analogies theory[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(10): 1248-1250.
- [10] 张孝良. 蓄能悬架系统及其实验[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
ZHANG Xiaoliang. Suspensions employing inerter and its bench test[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009.
- [11] 陈龙, 张孝良, 聂佳梅, 等. 基于半车模型的两级串联型ISD悬架性能分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 102-108.
CHEN Long, ZHANG Xiaoliang, NIE Jiamei, et al. Performance analysis of two-stage series-connected inerter-spring-damper suspension based on half-car model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 102-108.
- [12] 张孝良, 陈龙, 聂佳梅, 等. 2级串联型ISD悬架频响特性分析与试验[J]. 江苏大学学报, 2012, 33(3): 255-258.
ZHANG Xiaoliang, CHEN Long, NIE Jiamei, et al. Analysis and experiment of frequency response characteristics of two-stage series-connected ISD suspension[J]. Journal of Jiangsu University, 2012, 33(3): 255-258.
- [13] 汪若尘, 陈兵, 张孝良, 等. 车辆蓄能悬架系统仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 1-4.
WANG Ruochen, CHEN Bing, ZHANG Xiaoliang, et al. Simulation and experiment of vehicle inerter suspension system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 1-4.
- [14] 陈国涛, 陈龙, 张孝良, 等. “惯容器-弹簧-阻尼”悬架系统正实综合研究[J]. 机械设计与制造, 2012(4): 116-118.
CHEN Guotao, CHEN Long, ZHANG Xiaoliang, et al. The PR synthesis research of the ISD suspension system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(4): 116-118.

作者简介: 汪若尘, 男, 1977年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。
主要研究方向为车辆动态性能模拟与控制。
E-mail: wrc@ujs.edu.cn