

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.002

车辆半主动空气悬架系统设计与试验*

汪若尘 陈龙 张孝良 朱兴华

(江苏大学汽车工程研究院, 镇江 212013)

【摘要】 建立了半主动空气悬架系统数学模型,设计了可调阻尼减振器、半主动悬架控制器以及台架试验系统。在仿真的基础上,进行了可调阻尼减振器试验与半主动空气悬架系统 1/4 模型台架试验,分析了半主动空气悬架及其控制系统对车辆动态性能的影响,计算和试验结果基本吻合,提高了车辆的乘坐舒适性。

关键词: 车辆 半主动空气悬架 可调阻尼减振器 模糊控制 台架试验

中图分类号: U463.335.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)04-0006-04

Design and Test of Semi-active Air Suspension System of Vehicle

Wang Ruochen Chen Long Zhang Xiaoliang Zhu Xinghua

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

Abstract

The mathematical model of semi-active air suspension was built. Adjustable damper, semi-active air suspension controller and bench test system were designed. On the basis of simulation, adjustable damper and 1/4 model of semi-active air suspension bench were tested, the influence of semi-active air suspension and its control system to vehicle dynamic performance were analyzed. Calculation and test results were basically identical. The ride comfort of vehicles was improved.

Key words Vehicle, Semi-active air suspension, Adjustable damper, Fuzzy control, Bench test

引言

悬架是车辆系统中的关键部件,它起到传递和衰减路面振动的作用。传统的空气悬架采用机械高度阀来调节车身高度,具有响应速度慢、精度低的缺点。电子技术特别是大规模集成电路和微型电子计算机技术的快速发展,极大地推动了电子控制在车辆悬架系统中的巨大发展和广泛应用,具有非线性刚度特性的电子控制空气悬架系统研究和应用成为业内的又一研究热点^[1-5]。

20世纪70年代以来,汽车工业发达国家开始

研究基于振动主动控制的主动/半主动悬架系统^[6-7],国内也有专家学者进行该领域的研究,在半主动悬架零部件设计、仿真分析和试验研究方面取得了一定的成果^[8]。而电子控制空气悬架的研究还主要集中在车身高度控制上,涉及空气悬架半主动模糊控制的较少。本文建立车辆半主动空气悬架系统的数学模型,分析半主动空气悬架系统对车辆动态性能的影响,提出一种模糊控制的半主动空气悬架控制策略,设计可调阻尼减振器、半主动空气悬架控制器以及半主动空气悬架试验系统,在仿真的基础上,进行台架试验。

收稿日期: 2011-03-20 修回日期: 2011-05-05

* 国家自然科学基金资助项目(50905078)、江苏省教育厅自然科学基金资助项目(08KJB580001)、江苏大学高层次人才启动基金资助项目(07JDG039)和江苏省汽车工程重点实验室开放基金资助项目(QC200901)

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

通讯作者: 陈龙,教授,博士生导师,主要从事汽车动态性能模拟与控制及交通安全控制研究,E-mail: chenlong@ujs.edu.cn

1 半主动空气悬架模型

车辆悬架是一个复杂的振动系统,研究垂直方向上振动对汽车平顺性的影响时,将汽车简化为二自由度的线性振动分析模型^[1]。

根据牛顿第二定律,可以得到半主动空气悬架系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + GW & (1) \\ Y = CX + HW & (2) \end{cases}$$

其中 $X = [x_1 - x_0 \quad x_2 - x_1 \quad \dot{x}_1 \quad \dot{x}_2]^T$

$$Y = [\ddot{x}_2 \quad \ddot{x}_2 - \ddot{x}_1 \quad k_1(x_1 - x_0)]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ -k_1/m_1 & k_2/m_1 & -(c_0 + c_r)/m_1 & (c_0 + c_r)/m_1 \\ 0 & -k_2/m_2 & (c_0 + c_r)/m_2 & -(c_0 + c_r)/m_2 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & -k_2/m_2 & (c_0 + c_r)/m_2 & -(c_0 + c_r)/m_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad W = \dot{x}_0(t)$$

- 式中 c_0 ——悬架基值阻尼
 W ——路面速度激励
 c_r ——悬架可控阻尼
 m_1 ——非簧载质量
 m_2 ——簧载质量 k_1 ——轮胎刚度
 k_2 ——悬架弹簧刚度
 x_0 ——路面激励
 x_1 ——非簧载质量位移
 x_2 ——簧载质量位移

2 可调减振器设计与试验

根据减振器阻尼力的设计要求,并考虑成本和工艺继承性等因素,在某被动式液压减振器基础上设计了电控气动式可调阻尼减振器,其结构如图1所示。

底阀和筒体仍采用原减振器结构,在原活塞组件上增设由阀芯和阀体组成的转阀式阻尼调节机构,把连杆改为中空结构,空心连杆内装有转轴,转轴的下端与阀芯相连,转轴的上端与摆动气缸相连,转轴在摆动气缸的驱动下转动,并带动阀芯转动,使阀芯和阀体上的小孔的重合度发生变化,使节流阀口的通液面积发生变化,从而实现阻尼调节功能。

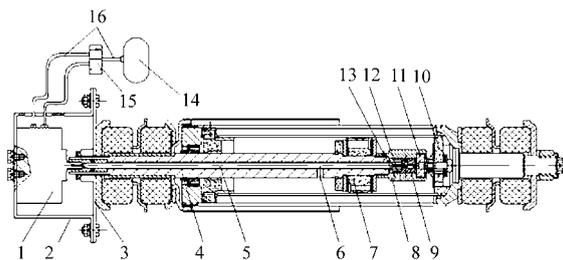


图1 电控气动式可调阻尼减振器结构

Fig.1 Structure composition of electronic pneumatic adjustable damper

1. 摆动气缸 2. 气缸保持架 3. 支撑托垫 4. 连杆 5. 转轴
6. 连杆上的孔 7. 活塞组件 8. 阀体 9. 阀芯 10. 底阀组件
11. 封头 12. 阀芯上孔 13. 阀体上孔 14. 储气室 15. 电磁阀
16. 气管

试验在 INSTRON 8800 型单通道数控液压伺服激振试验台上进行,试验台由微机、压力传感器、位移传感器、油泵、控制器、伺服阀、激振头以及电荷放大、A/D、D/A 转换等模块组成。试验结果如图2及表1所示。

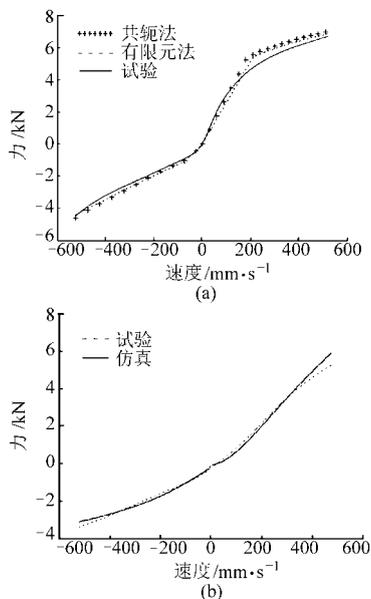


图2 速度特性对比

Fig.2 Speed characteristics contrast

(a) 硬阻尼状态 (b) 软阻尼状态

由图2及表1可知,减振器复原阻尼力、压缩阻尼力的试验值与仿真结果十分接近,表明设计的可调减振器性能优良、结构简单,工艺继承性好,可满足试验和使用要求。

3 半主动空气悬架仿真

车辆悬架性能评价指标有:车身加速度、悬架动行程和轮胎动载荷。本文在约束悬架动行程和轮胎动载荷的前提下,尽量减小车身加速度。因此选取车身加速度为控制指标。 e 为质心加速度的给定值

与实际值之差,误差变化率为 $e_e(t) = \frac{de(t)}{dt}$ 。将 e 和 e_e 作为模糊控制器的输入变量, u 为模糊控制器的输出变量。为简单起见,本系统中输入变量 e 和 e_e 的模糊论域选为 $[-3, 3]$, 其模糊子集为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$, 相应的基本论域为 $[-3, 3]$ 、 $[-60, 60]$; 模糊输出变量 u 模糊论域为 $[-6, 6]$, 其基本论域为 $[-240, 240]$; 3个因子 k_e 、 k_{ec} 、 k_u 分别为 1、0.05 和 40。模糊控制规则参考文献[5]。

表1 减振器试验结果和仿真结果对比

Tab.1 Comparative analysis the simulation and experimental result of adjustable damper

减振器	指标	复原阻尼力/N		压缩阻尼力/N	
		软	硬	软	硬
前减振器	试验结果	5 543	7 085	3 682	4 498
	仿真结果 1	5 836	7 150	3 498	4 420
	偏差 1/%	5.28	0.92	-5.00	-1.73
	仿真结果 2	5 887	7 317	3 526	4 638
	偏差 2/%	6.20	3.27	-4.24	3.11
后减振器	试验结果	7 637	12 890	969	1 030
	仿真结果 1	7 831	13 000	1 080	1 186
	偏差 1/%	2.54	0.85	11.46	15.14
	仿真结果 2	7 882	13 432	1 105	1 210
	偏差 2/%	3.21	4.20	14.04	17.48

基于 Matlab/Simulink 与所建模型,对半主动空气悬架系统进行仿真分析,所用车型的相关参数如表 2 所示。

表2 相关参数

Tab.2 Related parameters

参数	簧载质量/kg	非簧载质量/kg	轮胎刚度/ $kN \cdot m^{-1}$	弹簧初始刚度/ $kN \cdot m^{-1}$	减振器阻尼系数/ $kN \cdot s \cdot m^{-1}$
数值	1 010	175	756	100	6.6

取车速为 50、80 km/h 的 B 级路面输入进行时域仿真分析,设定仿真时间为 10 s,选取车身加速度、悬架动行程、轮胎动载荷为评价指标。仿真部分结果如图 3 及表 3 所示。

由图 3 及表 3 可知,施加控制后的半主动空气悬架的车身加速度和悬架动行程两个指标在车速为 50 km/h、B 级路面工况下分别降低了 18.06%、12.1%,在车速为 80 km/h、B 级路面工况下分别降低了 16.8%、18.3%。在频域中,控制后一定程度上减小了车身振动,提高了行驶平顺性。

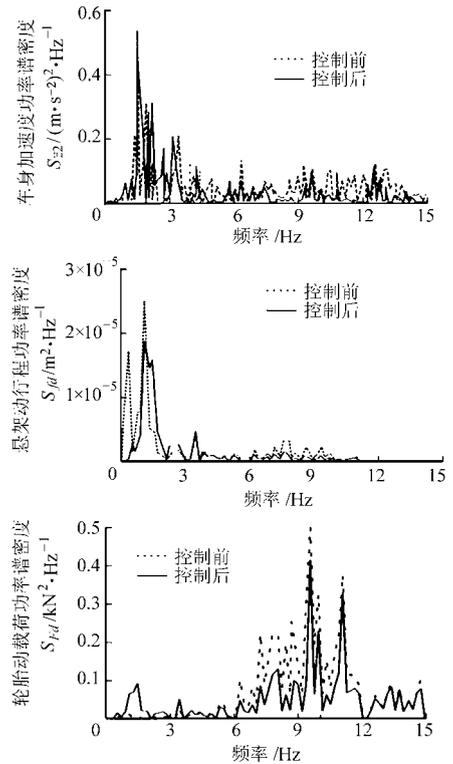


图3 B级路面仿真结果对比(50 km/h)

Fig.3 Simulation results contrast of B-level road

表3 平顺性仿真结果

Tab.3 Result of ride comfort simulation

评价指标	车速/ $km \cdot h^{-1}$		
	50	80	
控制前	车身加速度/ $m \cdot s^{-2}$	0.687 6	1.187 9
	悬架动行程/m	0.007 4	0.013 1
	轮胎动载荷/N	2 377.0	4 103.8
控制后	车身加速度/ $m \cdot s^{-2}$	0.563 4	0.987 3
	悬架动行程/m	0.006 5	0.010 7
	轮胎动载荷/N	2 502.2	4 321.3

4 半主动空气悬架动态特性响应

为了进一步研究半主动空气悬架动态响应,进行了半主动空气悬架台架试验。试验系统主要包括 INSTRON 8800 型数控电液伺服试验系统、半主动空气悬架系统、数据采集系统和加速度传感器,试验系统原理如图 4 所示。

试验中模拟 B 级和 D 级路面激励,车速分别为 50、80 km/h 工况下半主动空气悬架系统的动态性能试验参数如表 2 所示,并在 Matlab 中把控制前、后的数据进行对比分析,部分结果如图 5 及表 4 所示。

由图 5 及表 4 可知,施加控制后半主动空气悬架的车身加速度和悬架动行程两个指标在车速为

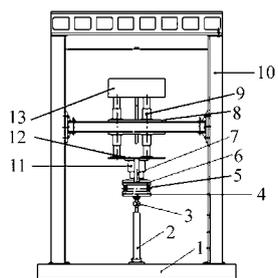


图4 空气弹簧试验系统原理图

Fig. 4 System principle diagram of air spring test

1. 底座 2. 油缸 3. 激振头 4. 连接托盘 5. 螺旋弹簧 6. 非簧载质量配重 7. 减振器 8. 横梁 9. 滚动直线导套副 10. 立柱 11. 空气弹簧 12. 连接托盘 13. 加载箱

表4 台架试验结果

Tab. 4 Bench test results

车速/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	评价参数		B级	D级
50	车身加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	控制前	0.908 5	1.147 2
		控制后	0.756 0	0.953 5
	悬架动行程/m	控制前	0.009 7	0.011 0
		控制后	0.008 6	0.009 5
80	轮胎动载荷/N	控制前	3 145.4	4 032.1
		控制后	3 389.2	4 235.7
	车身加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	控制前	1.304 9	1.504 7
		控制后	1.106 3	1.238 1
悬架动行程/m	控制前	0.014 5	0.023 5	
	控制后	0.012 7	0.020 2	
	轮胎动载荷/N	控制前	5 048.3	6 073.5
		控制后	5 222.5	6 251.9

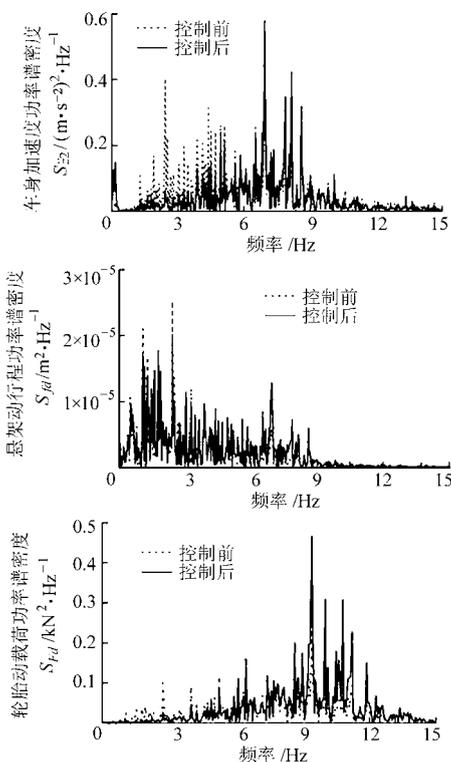


图5 B级路面试验结果对比(50 km/h)

Fig. 5 Experiment results contrast of B-level road

50 km/h、B级路面工况下分别降低了16.7%、11.3%，在车速为50 km/h、D级路面工况下分别降低了16.8%、13.6%，在车速为80 km/h、B级路面工况下分别降低15.2%、12.4%，在车速80 km/h、D级路面工况下分别降低了17.7%、14.04%，表明设计的半主动空气悬架模糊控制系统在一定程度上能有效改善车辆的行驶平顺性及乘坐舒适性。

5 结论

(1)建立的半主动空气悬架系统模型正确、控制策略有效。

(2)设计的可调阻尼减振器和半主动空气悬架模糊控制系统结构合理,能满足仿真和试验的要求,仿真结果与试验结果基本吻合。

参 考 文 献

- 1 陈一锴, 何杰, 张卫华, 等. 多轴重型货车悬架系统改进天棚控制策略[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 16 ~ 22.
Chen Yikai, He Jie, Zhang Weihua, et al. Modified skyhook damping control of multi-axial heavy truck suspension system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 16 ~ 22. (in Chinese)
- 2 Fox M N, Roebuck R L, Cebon D. Modelling rolling-lobe air springs[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2007, 14(3): 254 ~ 270.
- 3 Yamamoto Hiroshi, Zheng Ying, Okada Jun-Ichi. Optimum design method for a two degree of freedom system supported with air suspensions[J]. Japan Society of Mechanical Engineers, 2008, 74(5): 1 129 ~ 1 136.
- 4 陈杰平, 冯武堂, 郭万山, 等. 整车磁流变减振器半主动悬架变论域模糊控制策略[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 8 ~ 13.
Chen Jieping, Feng Wutang, Guo Wanshan, et al. Whole vehicle magnetorheological fluid damper semi-active suspension variable universe fuzzy control simulation and test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 8 ~ 13. (in Chinese)

调节。

(3)极板与物料直接接触的情况下,长时间工作无明显腐蚀。因此整个设备清洗简单方便,维护周期长。

(4)频率越高对极板腐蚀越小,但是提高频率会使效率越低。在使用本设备进行通电加热时,需要统筹考虑极板污染和工作效率,合理选择电源工作频率。

参 考 文 献

- 1 李修渠. 通电加热在食品加工中的应用[J]. 食品科技, 2001(6): 10~12.
Li Xiuqu. Use of ohmic heating in food industry[J]. Food Science and Technology, 2001(6): 10~12. (in Chinese)
- 2 李法德, 孙玉利, 李陆星. 连续通电加热条件下豆浆的电导率[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 275~278.
Li Fade, Sun Yuli, Li Luxing. Electrical conductivity of soybean milk during cooking with continuous ohmic heating device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(12): 275~278. (in Chinese)
- 3 Sastry S K, Barach J. Ohmic and inductive heating[J]. Journal of Food Science, 2000, 65(Sup. 8): 42~46.
- 4 Ghnimi S, Flach-Malaspina N, Dresche M, et al. Design and performance evaluation of an ohmic heating unit for thermal processing of highly viscous liquids[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86(6): 626~632.
- 5 Knirsch M C, Santos C A, Vicente A, et al. Ohmic heating—a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(9): 436~441.
- 6 Li F D, Li L T, Li Z, et al. Determination of starch gelatinization temperature by ohmic heating[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 62(2): 113~120.
- 7 Stancl J, Zitny R. Milk fouling at direct ohmic heating[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(4): 437~444.
- 8 孙玉利. 液态食品连续通电加热系统的实验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
Sun Yuli. Experimental study on continuous ohmic heating system for liquid food [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 9 李陆星. 连续通电加热系统的温度分布与极板污染的实验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.
Li Luxing. Experimental study on temperature distribution and electrode fouling in continuous ohmic heating system [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 10 王冉冉, 朱敏, 李法德. 食品通电加热中极板污染问题研究进展[J]. 农业工程, 2011, 1(1): 67~71.
Wang Ranran, Zhu Min, Li Fade. Fouling and corrosion of electrode by ohmic heating in food processing[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(1): 67~71. (in Chinese)
- 11 李陆星, 许振珊, 李法德. 连续通电加热系统极板污染问题的实验研究[J]. 食品科技, 2010, 35(7): 153~156.
Li Luxing, Xu Zhenshan, Li Fade. Experimental study on electrode fouling in continuous ohmic heating system[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(7): 153~156. (in Chinese)
- 12 QB/T 2132—2008 植物蛋白饮料 豆奶(豆浆)和豆奶饮料[S]. 2008.
QB/T 2132—2008 Plant protein beverage—soymilk and soy drink[S]. 2008. (in Chinese)

(上接第9页)

- 5 王东亮, 管继富, 王文瑞. 半主动油气悬架系统模糊控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 23~26.
Wang Dongliang, Guan Jifu, Wang Wenrui. Fuzzy control system for semi-active hydro-pneumatic suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 23~26. (in Chinese)
- 6 Du Haiping, Kam Yim Sze, James Lam. Semi-active H_{∞} control of vehicle suspension with magneto-rheological dampers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283(3~5): 981~996.
- 7 Christophe Lauwerys, Jan Swevers, Paul Sas. Robust linear control of an active suspension on a quarter car test-rig [J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(5): 577~586.
- 8 汪若尘, 江浩斌, 张孝良, 等. 阻尼非线性半主动悬架建模与控制[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 14~17.
Wang Ruochen, Jiang Haobin, Zhang Xiaoliang, et al. Modeling and control of semi-active suspension with nonlinear damping [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 14~17. (in Chinese)