

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.001

车辆蓄能悬架系统仿真与试验*

汪若尘 陈 兵 张孝良 陈 龙 江浩斌
(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 设计了2种结构形式的车用蓄能悬架,建立了车辆蓄能悬架系统的数学模型,构建了Ⅰ、Ⅱ型蓄能悬架结构,采取多目标优化方法,得到了2种蓄能悬架的性能参数,在仿真基础上,进行了台架试验,仿真与试验结果较为一致,表明蓄能悬架系统充分发挥了弹簧相位滞后、阻尼器呈中性及蓄能器相位超前的特性,提高了车辆隔振能力,协调了整车综合性能。

关键词: 车辆 蓄能器 悬架 仿真 试验

中图分类号: TH136 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0001-04

Simulation and Experiment of Vehicle Inerter Suspension System

Wang Ruochen Chen Bing Zhang Xiaoliang Chen Long Jiang Haobin
(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Two types of suspension with inerters were designed. The mathematical model of suspension with inerters was built. The suspension with inerters of I and II types were set up. With the multi-objective optimization methods, the performance parameters of the two types were obtained. Based on the simulation, the bench test was done and the simulation was consistent with the test results. It shows that the suspension with inerters exerts the feature that spring was phase lag, damper was neutral and inerters was phase advance. The vehicle vibration isolation performance was increased and the comprehensive performance of vehicle was coordinated.

Key words Vehicle, Inerter, Suspension, Simulation, Experiment

引言

被动悬架主要由弹簧和阻尼器组成,具有结构简单、性能可靠、造价低和无能耗等诸多优点,是应用最广泛的悬架形式^[1]。但被动悬架结构参数一旦确定,就无法调整,不能协调车辆乘坐舒适性与行驶安全性间的矛盾。自20世纪70年代起,汽车工业发达国家开始研究主动/半主动控制悬架,取得了很多成果^[2~4],但这些技术由于成本、控制的问题,还无法大规模应用。以上的研究均基于经典的隔振理论,如需大幅提高车辆隔振性能,必须寻找新的理论和方法设计车辆悬架系统。

机电相似理论为机械网络研究奠定了理论基

础。2003年,英国学者Smith提出蓄能器概念后,将车辆悬架系统类比电子系统,进行机械网络分析,蓄能器、阻尼和弹簧分别与电容、电阻和电感一一对应^[5]。由此可知,蓄能器具有相位超前及通高频、阻低频的特性,阻尼器呈中性,弹簧具有相位滞后及通低频、阻高频的特性^[6~12]。可以看出,由蓄能器、弹簧和阻尼器组成的悬架系统,只要进行合理的优化组合,可以突破经典隔振理论对悬架隔振性能进一步提高的限制,提高车辆动态性能。

本文基于复域机械阻抗理论,建立由蓄能器、阻尼器及弹簧组成的蓄能悬架系统,蓄能悬架数学模型,构建Ⅰ、Ⅱ型蓄能悬架结构,采用多目标优化方法,得到Ⅰ、Ⅱ型蓄能悬架的性能参数,在仿真基础

收稿日期: 2012-04-06 修回日期: 2012-05-07

* 国家自然科学基金资助项目(50905078)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20093227120004)和江苏大学高级人才启动基金资助项目(07JDG039)

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

上进行台架试验。

1 蓄能悬架系统数学模型

应用复域机械阻抗法建立的悬架单轮模型^[13~15],如图1所示。

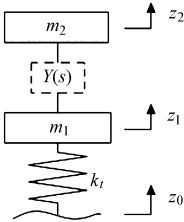


图1 悬架单轮模型

Fig.1 Quarter-car vehicle model

图中, z_1 为非簧载质量位移; z_2 为簧载质量位移, m_1 为非簧载质量; m_2 为簧载质量; z_0 为路面随机输入; $Y(s)$ 为悬架复域机械阻抗; k_t 为轮胎刚度。该悬架单轮模型拉普拉斯变换下的动力学方程为

$$\begin{cases} m_2 s^2 Z_2 + sY(s)(Z_2 - Z_1) = 0 \\ m_1 s^2 Z_1 + sY(s)(Z_1 - Z_2) + k_t(Z_1 - Z_0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, Z_0 、 Z_1 、 Z_2 分别为 z_0 、 z_1 、 z_2 的拉氏变换形式。

2 蓄能悬架结构及参数优化

由蓄能器、阻尼器和弹簧组成蓄能悬架系统结构多种多样。基于蓄能器和弹簧的特性可知,二者的串联可以阻止高频和低频力流的通过,隔振效果明显。构建的 I、II 型蓄能悬架结构如图2所示。

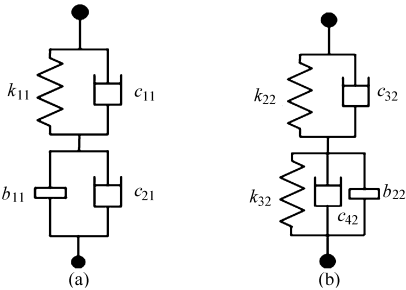


图2 构建的蓄能悬架

Fig.2 Suspensions employing inerter with different structures

(a) I 型蓄能悬架 (b) II 型蓄能悬架

由机械阻抗的定义及串联系统的阻抗,可得 I、II 型蓄能悬架的复域机械阻抗分别为

$$Y_1(s) = \frac{1}{\frac{1}{\frac{k_{11}}{s} + c_{11}} + \frac{1}{b_{11}s + c_{21}}} \quad (2)$$

$$Y_2(s) = \frac{1}{\frac{1}{\frac{k_{32}}{s} + b_{22}s + c_{42}} + \frac{1}{\frac{k_{32}}{s} + c_{32}}} \quad (3)$$

综合考虑舒适性和轮胎动载荷以及悬架动行程

三方面因素,采用多目标优化的方法^[16],得到 I、II 型蓄能悬架系统的性能参数,结果如表1所示。

表1 悬架系统参数

Tab.1 Parameters of suspension system

参数	数值
簧载质量 m_2/kg	317.5
非簧载质量 m_1/kg	45.4
轮胎刚度 $k_t/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	192
弹簧刚度 $k_{11}/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	21.9
高频阻尼系数 $c_{11}/\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	1.485
蓄能器比例系数 b_{11}/kg	106
低频阻尼系数 $c_{21}/\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	3
弹簧刚度 $k_{22}/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	17
弹簧刚度 $k_{32}/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	17
蓄能器比例系数 b_{22}/kg	539
高频阻尼系数 $c_{32}/\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	1.221
低频阻尼系数 $c_{42}/\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	5.216

3 蓄能悬架动态性能分析

在 Matlab/Simulink 环境下,对蓄能悬架系统进行数值仿真,分析悬架系统的频率响应,并与某被动悬架进行比较,结果如图3所示。

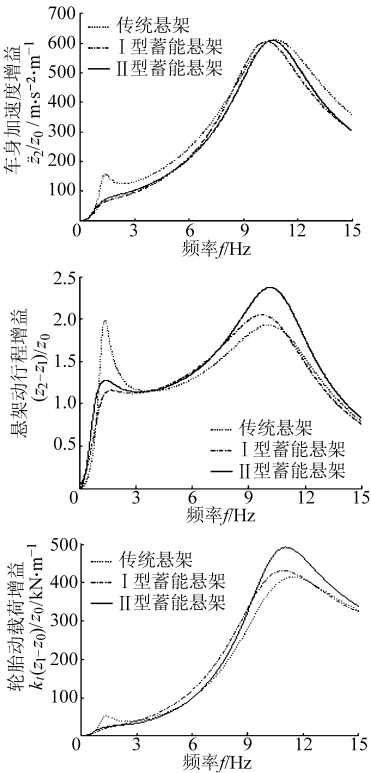


图3 悬架系统频率响应

Fig.3 Frequency responses of suspension system

由图3可知,I、II 型蓄能悬架对路面引起的冲击和振动进行了有效衰减,悬架动行程和轮胎动载荷得到遏制。

为了进一步了解蓄能悬架的动态性能,对 C 级路面、车速为 20、30 m/s 工况进行仿真,结果如图 4 及表 2 所示。

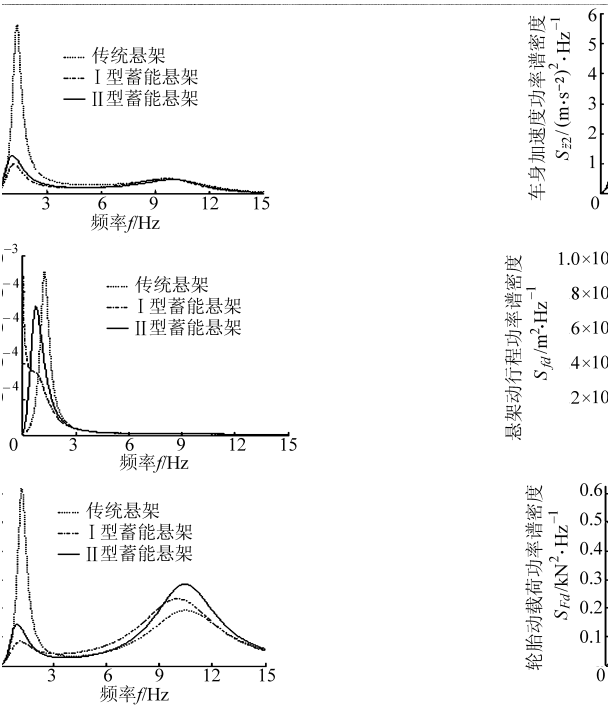


图 4 悬架系统响应功率谱密度

Fig. 4 Responses PSD of suspension system

表 2 悬架系统响应均方根

Tab. 2 Responses RMS values of suspension

悬架类型	系统响应均方根	车速 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	
		20	30
传统悬架	车身加速度均方根 $\sigma_{\ddot{z}_2}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	2.976 2	4.021 7
	悬架动行程均方根 σ_{f_d}/m	0.029 6	0.038 9
	轮胎动载荷均方根 σ_{F_d}/kN	1.309 7	1.773 7
I 型蓄能悬架	车身加速度均方根 $\sigma_{\ddot{z}_2}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	2.191 3	2.968 6
	悬架动行程均方根 σ_{f_d}/m	0.026 9	0.036 3
	轮胎动载荷均方根 σ_{F_d}/kN	1.292 1	1.753 3
II 型蓄能悬架	车身加速度均方根 $\sigma_{\ddot{z}_2}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	2.258 3	3.063 3
	悬架动行程均方根 σ_{f_d}/m	0.028 9	0.036 9
	轮胎动载荷均方根 σ_{F_d}/kN	1.303 9	1.768 6

由图 4 及表 2 可知,蓄能悬架综合性能明显优于传统悬架,提高了乘坐舒适性,且具有较强的适应性。

4 蓄能悬架试验

将设计的 II 型蓄能悬架装在某液压伺服激振台上,进行台架试验^[17]。试验时,采用 Wavebook 数据采集系统、加速度传感器、位移传感器及电荷放大器

等。在激振台上模拟 C 级路面,车速为 20、30 m/s 工况下,悬架动态响应结果如图 5 及表 3 所示。

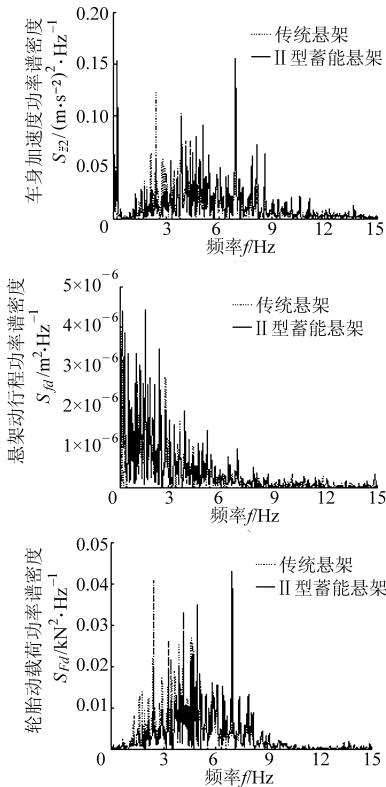


图 5 随机激励试验结果

Fig. 5 Test results in random excitation

表 3 悬架系统随机响应均方根

Tab. 3 RMS values of suspension responses

悬架类型	系统响应均方根	车速 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	
		20	30
传统悬架	车身加速度均方根 $\sigma_{\ddot{z}_2}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	0.417 2	0.642 0
	悬架动行程均方根 σ_{f_d}/m	0.022 7	0.037 5
	轮胎动载荷均方根 σ_{F_d}/kN	0.261 1	0.509 2
II 型蓄能悬架	车身加速度均方根 $\sigma_{\ddot{z}_2}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	0.407 2	0.629 1
	悬架动行程均方根 σ_{f_d}/m	0.021 4	0.036 5
	轮胎动载荷均方根 σ_{F_d}/kN	0.243 9	0.493 1

由图 5 及表 3 可知,II 型蓄能悬架具有良好的减振性能,改善了车身振动,减小了悬架动挠度、轮胎动载荷,提高了乘坐舒适性、车辆行驶安全性,协调了整车综合性能。

5 结论

(1) 构建的 I、II 型蓄能悬架结构简单,性能优良,可提高车辆的隔振性能。

(2) 蓄能悬架仿真和试验表明,理论研究与试验结果有较好的一致性。

参 考 文 献

- 1 周孔亢. 车辆理论基础[M]. 2 版. 北京:兵器工业出版社,2002.
- 2 郑玲,邓兆祥,李以农. 汽车半主动悬架的模型参考自适应控制[J]. 中国公路学报,2005,18(2):99~102.
Zheng Ling, Deng Zhaoxiang, Li Yinong. Model reference adaptive control of semi-active suspensions[J]. China Journal of Highway and Transport,2005,18(2):99~102. (in Chinese)
- 3 Georgiou G, Verros G, Natsiavas S. Multi-objective optimization of quarter-car models with a passive or semi-active suspension system [J]. Vehicle System Dynamics,2007,45(1):77~91.
- 4 Shirahatt Anil, Prasad P S S, Panzade Pravin, et al. Optimal design of passenger car suspension for ride and road holding [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2008,30(1):66~76.
- 5 Papageorgiou Christakis, Smith M C. Laboratory experimental testing of inerters [C] // 2005 44th IEEE Conference on Decision and Control, Seville, Spain, 2005:3 351~3 356.
- 6 Wang Fucheng, Chen Chengwei, Liao Minkai, et al. Performance analyses of building suspension control with inerters [C] // 2007 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, LA, USA, 2007:3 786~3 791.
- 7 Wang Fucheng, Liao Minkai, Liao Bohuai, et al. The performance improvements of train suspension systems with mechanical networks employing inerters[J]. Vehicle System Dynamics,2009, 47(7):805~830.
- 8 Iyad Talal Al-zahrnah. Performance evaluation and multiobjective optimization of passive vehicle suspension systems [D]. Dhahran, Saudi Arabia; King Fahd University of Petroleum and Minerals. 1993.
- 9 Smith M C. Force-controlling mechanical device; PCT/GB02/03056 [P]. 2002-07-04.
- 10 Smith M C. Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters [J]. Vehicle System Dynamics,2004, 42(4):235~257.
- 11 Wang Fucheng, Yu Chunghang, Chang Monglon, et al. The performance improvements of train suspension systems with inerters [C] // 2006 45th IEEE Conference on Decision and Control, Manchester, USA, 2006:1 472~1 477.
- 12 张威,张景海,隗海林,等. 汽车动力学仿真模型的发展[J]. 汽车技术,2003(2):1~4.
Zhang Wei, Zhang Jinghai, Kui Hailin, et al. Development of vehicle dynamic simulation model[J]. Automobile Technology, 2003(2):1~4. (in Chinese)
- 13 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):1 248~1 250.
Chen Long, Zhan Xiaoliang, Jiang Haobin, et al. Vehicle suspension system employing inerter based on electrical-mechanical analogy theory [J]. China Mechanical Engineering,2009, 20(10):1 248~1 250. (in Chinese)
- 14 陈无畏,李欣冉,陈晓新,等. 车辆悬架中高频振动传递分析与橡胶衬套刚度优化[J]. 农业机械学报,2011,42(10): 25~29.
Chen Wuwei, Li Xinran, Chen Xiaoxin, et al. Middle-high frequency vibration transfer analysis of vehicle suspension and optimization of rubber bushings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(10):25~29. (in Chinese)
- 15 王永刚,郑碧玉. 可控阻尼对隔振系统的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(5):108~122.
Wang Yonggang, Zheng Biyu. Effects of controlled damping on isolation system response[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2005,25(5):108~122. (in Chinese)
- 16 陈国栋,韩旭,刘桂萍,等. 一种基于代理模型引导采样的多目标优化方法[J]. 系统仿真学报,2011,23(10):2 103~2 107.
Chen Guodong, Han Xu, Liu Guiping, et al. Multi-objective optimization method based on surrogate model guiding sample[J]. Journal of System Simulation,2011,23(10):2 103~2 107. (in Chinese)
- 17 张辉,何景峰,韩俊伟. 油气悬架加载试验台正弦波复现控制方法[J]. 农业机械学报,2009,40(7):34~39.
Zhang Hui, He Jingfeng, Han Junwei. Sine wave replication control method on hydro-pneumatic suspension force loading system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(7):34~39. (in Chinese)