

DOI: 10.3901/JME.2009.05.276

双气室油气悬架特性研究*

杨波 陈思忠 王勋 杨杰 赵玉壮
(北京理工大学机械与车辆工程学院 北京 100081)

摘要: 为改善越野车辆的行驶平顺性, 提出一种双气室油气悬架。对双气室油气悬架的结构进行了分析, 阐述其工作原理, 并建立其数学模型。基于某越野车的参数, 建立 1/4 车辆振动模型, 通过仿真分别研究双气室油气悬架的各个参数对其车身加速度、悬架动挠度及车轮相对动载的影响。结果表明, 内置蓄能器对车轮相对动载影响大于外置蓄能器; 外置阻尼器对平顺性的影响大于活塞上阻尼孔的影响。通过对结果的优化确定了双气室油气悬架的参数, 分别在时域和频域内对装有双气室油气悬架、单气室油气悬架以及螺旋弹簧的车辆平顺性进行了对比。仿真结果表明, 与单气室油气悬架和被动悬架相比, 采用双气室油气悬架可明显改善车辆的行驶平顺性, 更适合于越野车辆。

关键词: 越野车辆 双气室 油气悬架 平顺性

中图分类号: U463.344.3

Research of Twin-accumulator Hydro-pneumatic Suspension

YANG Bo CHEN Sizhong WANG Xun YANG Jie ZHAO Yuzhuang
(School of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: In order to improve the ride performance of the off-road vehicle, a twin-accumulator hydro-pneumatic suspension is proposed. Its structure is analyzed, its working principle is described, and its mathematic model is built. Based on the parameters of an off-road vehicle, 1/4 vehicle vibration model is built. Through simulation, the influence of each parameter of twin-accumulator hydro-pneumatic suspension on the vehicle body acceleration, dynamic deflection of suspension and relative dynamic load of wheel is studied respectively. The results indicate that the interior accumulator has greater influence on the relative dynamic load of wheel than the outside accumulator, and the outside damper has greater influence on the ride performance than the damping hole on the piston. Through optimization of the results, the parameters of twin-accumulator hydro-pneumatic suspension are determined. The ride performance of the vehicle with twin-accumulator hydro-pneumatic suspension is compared with those of vehicles with passive hydro-pneumatic suspension and with coil spring in both time domain and frequency domain. The results indicate that the adoption of twin accumulator system can obviously improve the ride performance of vehicle, and it is more suitable for off-road vehicle.

Key words: Off-road vehicle Twin-accumulator Hydro-pneumatic suspension Ride performance

0 前言

平顺性和操纵稳定性是车辆悬架系统设计需要同时考虑的两个方面, 为了使这两方面的性能同时达到最优, 主动悬架和半主动悬架被广泛讨论^[1-10]。主动悬架由于结构复杂、成本高、功耗大等特点, 目前除了赛车和高级轿车外, 应用很少^[2-4]。半主动悬架在大多数情况下性能接近主动悬架, 并

且其成本等远远低于主动悬架, 因此在近年内备受关注。刚度、阻尼分级可调的悬架系统是半主动悬架的一种, 相对于主动悬架, 它结构简单、能耗小、成本低, 在车辆上容易实现^[4]。KARNOPP 等^[2-3,5]从理论上提出了基于油气悬架的刚度阻尼分级可调半主动悬架的概念, 从理论上分析了基于油气悬架的半主动悬架的可行性。ABD-EL-TAWWA^[6-8]详细地讨论了双气室油气悬架相对于单气室油气悬架的优点, 并基于线性最优控制理论, 采用开关控制方式对双气室油气悬架进行控制。ELS 等^[9]在陆虎越

* 国家部委预研资助项目(1030020440802)。20080513 收到初稿, 20090220 收到修改稿

野车上安装了半主动刚度两级可调、阻尼三级可调的油气悬架并进行了道路试验，试验结果表明它可以有效地改善车辆的行驶平顺性。雪铁龙公司作为油气悬架的先驱者，其开发的 Hydractive II、III^[11] 可以通过切断和连通中央蓄能器来完成对刚度的控制，有效地改善了车辆的平顺性。

目前，对于越野车来说，其行驶路况复杂多变，并且它们大都采用被动悬架，其刚度和阻尼参数固定不变，因此很难获得较好的行驶平顺性。针对这种现状，本文设计了一种双气室油气悬架来改善越野车辆的行驶平顺性。这种方案结构紧凑，成本低，不需要额外的能量消耗，并且在目前的技术条件下容易实现，因此具有工程应用价值。并且这种方案为进一步实现刚度阻尼分级可调的半主动悬架提供了基础^[2-11]。

1 双气室油气悬架系统的设计

本文提出的双气室油气悬架结构如图1所示，外置阻尼器和蓄能器通过油管和液压缸相连，内置蓄能器由活塞杆内腔和浮动活塞组成，这样可以有效地利用空间，减小悬架系统的尺寸；活塞上有阻尼孔，活塞杆顶部设计有补偿孔，活塞杆外壁和缸筒组成了补偿腔，补偿腔的存在可以保证静态时活塞上下压力的平衡，同时可以缓和车轮的冲击。通过蓄能器、储气室的参数以及外置阻尼器和活塞上阻尼孔阻尼参数的变化可实现双气室油气悬架的外特性的改变。

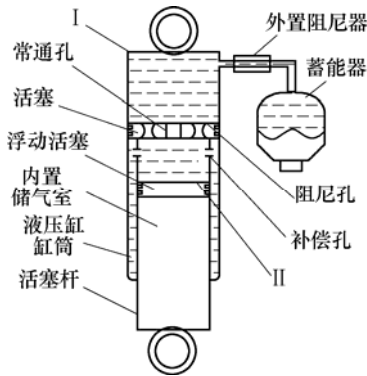


图1 双气室油气悬架结构简图

2 双气室油气悬架数学模型的建立

如图1所示，设I腔的压力为 p_1 ，II腔的压力为 p_2 ，外置蓄能器的压力为 p_3 ，由于补偿腔体积相对很小，并且本文着重从理论上讨论双气室油气悬架的可行性，因此在建模过程中忽略补偿孔的阻尼

力和补偿腔环面的面积，认为补偿腔的压力为 p_2 ，活塞上下作用面的面积均为 A_1 ；外置阻尼器的阻尼系数为 $c_1(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^5)$ ，活塞上的阻尼孔的阻尼系数设为 $c_2(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^5)$ ， $c_s = cA_1^2$ ， c_s 为双气室油气悬架的阻尼系数^[10]。

则油气悬架的输出力 F_s 为

$$F_s = p_1 A_1 \tag{1}$$

$$p_2 = p_1 - c_1 \dot{V}_1 \tag{2}$$

$$p_3 = p_1 - c_2 \dot{V}_2 \tag{3}$$

$$V_1 + V_2 = A_1 x \tag{4}$$

式(4)中， V_1 为流经外置蓄能器的油液体积， V_2 为流经活塞阻尼孔的油液体积， x 为活塞的行程，蓄能器内气体的压力可根据式(5)确定^[12]

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{T^{0.5} V_m (V_m + b)} \tag{5}$$

$$V_m = \frac{V}{m/M} \tag{6}$$

式中， a, b 是与气体种类相关的常数， V 和 m 分别为蓄能器内实际气体体积和质量， R 和 T 为实际气体常数和绝对温度， V_m 为工作气体摩尔体积， M 为工作气体的分子量。

3 平顺性仿真分析

本文建立了 1/4 车辆模型，分别针对双气室两个储气室的初始充气压力和两级阻尼器的阻尼系数进行了动力学仿真，研究了这些参数对车辆平顺性评价指标的影响。所研究的平顺性评价指标包括车身振动加速度 a 、悬架动挠度 S 及车轮相对动载 D 。其中 $D = F_d / G$ ， $F_d = k_1(x_1 - q)$ ， F_d 为车轮动载， k_1 为轮胎刚度， x_1 为车轮垂直位移， q 为路面激励， G 为车轮法向静载。

3.1 车辆振动模型及仿真参数的确定

1/4 车辆振动模型如图2所示，数学模型如式(7)所述^[11]。其中， x_1, x_2 分别为车轮和车身沿垂直

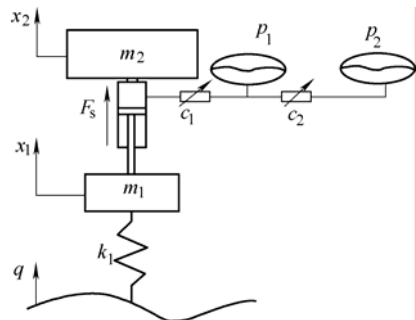


图2 1/4 车辆振动模型简图

方向的坐标, 坐标原点选在各自的平衡位置, 模型的其他参数及该仿真中所需的参数的说明及数值见表 1。

表 1 双气室油气悬架参数

参数名称	参数值
悬挂质量 m_2/kg	500
非悬挂质量 m_1/kg	70
轮胎刚度 $k_1/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	261 300
外置蓄能器体积 V_1/L	0.5
内置蓄能器体积 V_2/L	0.2
活塞作用面积 A_1/cm^2	8.042 5
路面的空间频率 α/m^{-1}	0.079
路面不平度变量 ρ/m	0.043 2

$$\begin{cases} m_2 \ddot{x}_2 - F_s + m_2 g = 0 \\ m_1 \ddot{x}_2 - k_1(x_1 - q) + F_s + m_2 g = 0 \end{cases} \quad (7)$$

3.2 路面模型

由于越野车辆经常在坏路面上行驶, 因此本文采取有理函数参数估计法建立了 E 级路面的时域模型, 单个车轮受到的路面激励时域数学模型为^[12]

$$\dot{q}(t) = -\alpha u q(t) + \xi(t) \quad (8)$$

$$E[\xi(t)\xi(\tau)] = 2\alpha u \rho^2 \delta(t - \tau) \quad (9)$$

式中, $q(t)$ 为车轮所受到的路面随机激励; $\xi(t)$ 为白噪声; τ 为时间差, $E[\xi(t)\xi(\tau)]$ 为所选路面的自相关函数, α 为所选路面的空间频率, ρ 为路面不平度变量, u 为车速, 本文取为 50 km/h, $\delta(t - \tau)$ 为脉冲函数。

3.3 各参数对双气室油气悬架特性的影响

表 2 给出了当外置蓄能器充气压力不同时的平顺性仿真结果。结果表明, 随着充气压力的增加, 车身振动加速度逐渐减小, 悬架动挠度则逐渐增大, 车轮相对动载逐渐增大, 但车轮相对动载的变化趋势不明显, 这表明外置蓄能器充气压力对车轮相对动载变化影响不大。

表 2 不同 p_{01} 时双气室油气悬架方均根值

充气压力 p_{01}/MPa	加速度 $a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	动挠度 S/mm	相对动载 D
1.5	2.09	15.1	0.165
2.5	2.02	15.2	0.165
3.0	2.01	15.3	0.166
3.5	1.99	15.5	0.167

表 3 给出了当内置储气室初始充气压力不同时的平顺性仿真结果。结果表明, 随着充气压力的增加, 车身振动加速度先逐渐减小而后又增大, 悬架动挠度则逐渐减小, 车轮相对动载逐渐减小。

表 4 给出了外置阻尼器阻尼系数变化时的平顺性仿真结果。结果表明, 随着阻尼系数的增加, 车身振动加速度逐渐增大, 悬架动挠度则逐渐减小,

车轮相对动载逐渐减小。

表 3 不同 p_{02} 时双气室油气悬架方均根值

充气压力 p_{02}/MPa	加速度 $a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	动挠度 S/mm	相对动载 D
1.5	2.07	15.6	0.172
2.5	1.99	15.5	0.167
3.0	2.00	15.4	0.163
3.5	2.02	15.3	0.162

表 4 不同 c_{s1} 时双气室油气悬架方均根值

充气压力 $c_{s1}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	加速度 $a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	动挠度 S/mm	相对动载 D
2 700	1.72	18.0	0.194
3 200	1.88	16.6	0.179
3 700	1.99	15.4	0.167
4 200	2.12	14.4	0.158

表 5 给出了活塞上阻尼孔阻尼系数对平顺性的影响。仿真结果表明, 随着阻尼系数的增加, 车身振动加速度逐渐增大, 悬架动挠度则逐渐减小, 车轮相对动载逐渐减小。

表 5 不同 c_{s2} 时双气室油气悬架方均根值

充气压力 $c_{s2}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	加速度 $a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	动挠度 S/mm	相对动载 D
2 000	1.97	15.6	0.170
2 500	1.99	15.4	0.168
3 000	1.99	15.4	0.167
3 500	2.01	15.2	0.166

通过对比可以看出, 外置蓄能器和内置蓄能器对车身振动加速度的影响趋势不同, 随着外置蓄能器充气压力增加, 车身振动加速度逐渐减小, 而随着内置蓄能器充气压力的增加, 车身振动加速度先减小后增大, 内置蓄能器对车轮相对动载影响大于外置蓄能器; 外置阻尼器对平顺性的影响大于活塞上阻尼孔的影响。

3.4 对比分析

表 6 给出了双气室油气悬架和单气室油气悬架及螺旋弹簧的平顺性评价指标方均根值的对比结果。其中, 单气室油气悬架的活塞面积为 8.043 cm^2 , 蓄能器的初始充气压力为 1.5 MPa, 体积为 0.6 L, 阻尼为 $3 400 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$, 其他仿真参数详见参考文献[12]; 螺旋弹簧的刚度为 $35 458 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, 阻尼为 $3 500 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 其他仿真参数详见参考文献[13]。相对于螺旋弹簧, 双气室油气悬架的车身振动加速度方均根值降低了 17.3%, 悬架动挠度降低了 9%, 车轮相对动载降低了 6.18%; 而相对于单气室油气悬架, 其车身振动加速度方均根值减小了 10.4%, 悬架动挠度降低了 5.52%, 车轮相对动载减小了 1.18%。

表6 不同类别悬架平顺性对比

悬架类型	加速度 $a/(m \cdot s^{-2})$	动挠度 S/mm	相对动载 D
螺旋弹簧	2.41	17.1	0.178
单气室	2.22	16.3	0.169
双气室	1.99	15.4	0.167

为了进一步对比说明，图3~5给出了双气室油气悬架与单气室油气悬架以及螺旋弹簧的平顺性评价指标在频域内的对比。本文建立的油气悬架模型表现出很强的非线性，因此，其频域结果是通过在时域的仿真结果做频谱分析得到的。图3表明，相对于螺旋弹簧，双气室油气悬架大大降低了车辆在低频的共振峰值，同时也改善了高频范围内的振动情况，相对于单气室油气悬架，双气室油气悬架明显地改善了其高频振动特性，并降低了整个频率范围内的幅值，大大地改善了车辆的振动特性。由图4可以看出，与螺旋弹簧相比，单气室油气悬架减小了悬架动挠度在低频范围内的共振峰值，双气室油气悬架则降低了悬架动挠度在低频范围内的峰值以及其共振频率。图5表明，双气室油气悬架主要降低了非悬挂质量低频范围内的共振峰值，并使得其高频共振频率减小，改善了车轮的接地性。

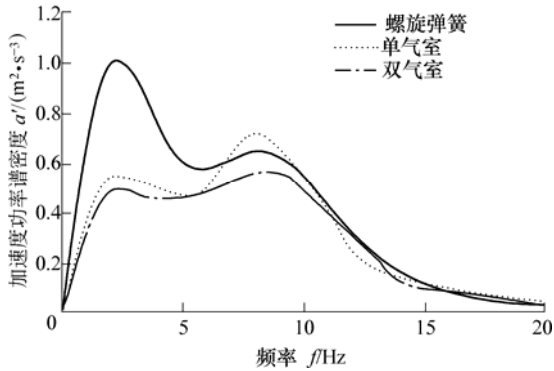


图3 车身振动加速度功率谱密度对比

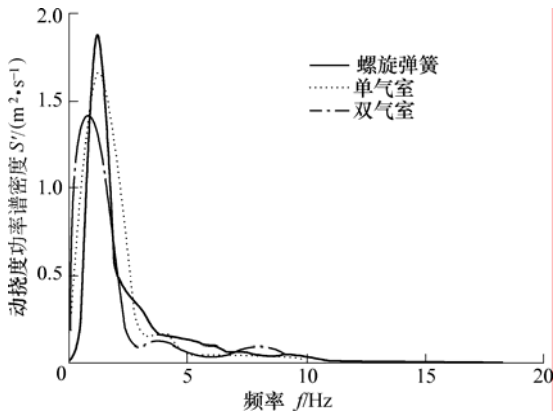


图4 悬架动挠度功率谱密度对比

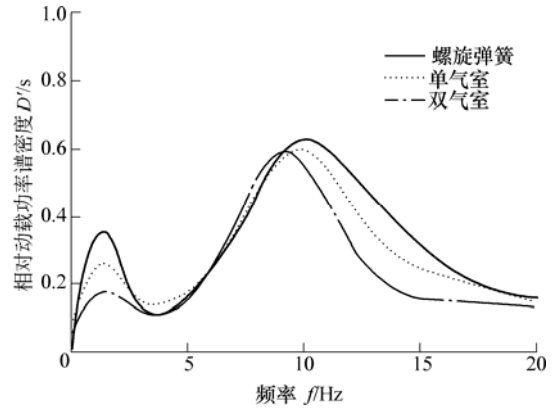


图5 车轮相对动载功率谱密度对比

4 结论

- (1) 提出了一种双气室油气悬架，这种方案不需要额外的能量消耗，并且为下一步实现刚度阻尼可控悬架奠定了基础。
- (2) 建立了1/4车辆振动模型，通过仿真研究了双气室油气悬架各个参数对其平顺性的影响。
- (3) 对双气室油气悬架、单气室油气悬架及螺旋弹簧的平顺性评价指标分别在时域和频域内进行了对比分析。结果表明，双气室油气悬架使得平顺性的各个指标均得到较大的改善，更适合于越野车辆。

参考文献

- [1] SHARP R S, CROLLA D A. Road vehicle suspension design-a review[J]. Vehicle System Dynamics, 1987, 16: 167-192.
- [2] KARNOPP D. Active and semi-active vibration isolation[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1995, 117(3): 177-185.
- [3] KARNOPP D, HEESS G. Electronically controllable vehicle suspension[J]. Vehicle System Dynamics, 1991, 20: 207-217.
- [4] 吴志成, 陈思忠, 杨林, 等. 越野车辆可控悬架及其控制理论的发展现状[J]. 兵工学报, 2006, 27(5): 903-910. WU Zhicheng, CHEN Sizhong, YANG Lin, et al. The development and present status of controllable suspension and its control theory for off-road vehicle[J]. ACTA, 2006, 27(5): 903-910.
- [5] PAUL A W. Advanced hydraulic suspension ride simulation using a 3-dimensional vehicle model[R]. SAE Paper 940866, 1994.
- [6] ABD-EL-TAWWAB A M. Advanced hydro-pneumatic semi-active suspension system[J]. Journal of Low

- Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2001, 20(6): 93-103.
- [7] ABD-EL-TAWWAB A M. Twin-accumulator suspension system[R]. SAE Paper 970384, 1997.
- [8] ABD-EL-TAWWAB A M. Semi-active twin-Accumulator suspension system[R]. SAE Paper 2002-01-0985, 2002.
- [9] ELS P S, VAN Niekerk Johannes L. Dynamic modeling of an off-road vehicle for the design of a semi-active hydro-pneumatic spring-damper system[J]. Vehicle System Dynamics(Supplement), 1999, 33: 566-577.
- [10] 王书镇. 高速履带车辆行驶系[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1988.
- WANG Shuzhen. Running system of high speed track vehicle[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988.
- [11] Citroen. The Citroen technical guide[EB/OL]. (1998-12-1). [2006-05-17]. <http://www.citroen.com/CWW/fr-FR/TECHNOLOGIES/COMFORT/HYDRACTIVE/PRESENTATION/HYDRACTIVE.htm>.
- [12] 杨波. 越野车辆油气悬架动力学建模仿真与试验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006.
- YANG Bo. Study on dynamics of hydro-pneumatic suspension system for off-road vehicle by modeling, simulation and test[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006.
- [13] 段俊法. 越野车辆悬架动力学仿真和试验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2005.
- DUAN Junfa. Study on dynamics of suspension system for off-road vehicle by simulation and test[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2005.
-
- 作者简介: 杨波(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为汽车悬架系统动力学。
E-mail: yb019@bit.edu.cn
- 陈思忠, 男, 1958 年出生, 教授。主要研究方向为汽车悬架、转向系统设计。
E-mail: chensz@bit.edu.cn
-
- (上接第 275 页)
- [3] BICCHI A, BALLUCHI A, PRATTICCHIZZO D, et al. Introducing the "Sphericle": An experimental testbed for research and teaching in nonholonomy[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 20-25, 1997, Albuquerque, NM, USA. New York: IEEE, 1997: 2 620-2 625.
- [4] JAVADI A H, MOJABI P. Introducing august: A novel strategy for an omnidirectional spherical rolling robot[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 11-15, 2002, Washington D C, United States. New York: IEEE, 2002: 3 527-3 533.
- [5] 李团结, 严天宏, 张学锋. 一种全向滚动球形机器人的动力学建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(18): 4 239-4 242.
- LI Tuanjie, YAN Tianhong, ZHANG Xuefeng. Dynamic modeling and simulation of spherical omnidirectional rolling robot[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(18): 4 239-4 242.
- [6] ABBOTT M S. Kinematics, dynamics and control of single-axle, two-wheel vehicles(Biplanar Bicycles)[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [7] 刘延柱. 高等动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LIU Yanzhu. Advanced dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [8] LIU Daliang, SUN Hanxu, JIA Qingxuan, et al. Motion control of a spherical mobile robot by feedback linearization[C]// 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Jun. 25-27, 2008, Chongqing, China. New York: IEEE, 2008: 965-970.
- [9] ZHAN Qiang, LIU Zengbo, CAI Yao. A back-stepping based trajectory tracking controller for a non-chained nonholonomic spherical robot[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(5): 472-480.
-
- 作者简介: 岳明(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士研究生。主要研究方向为球形机器人、宇航空间机构与控制。
E-mail: yueminghit@163.com
- 邓宗全, 男, 1956 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为特种机器人和月球车。
E-mail: denzq@hit.edu.cn