

交通运输

# 基于油气悬架的越野 车辆三级阻尼可调技术研究

韩军堂 杨 杰 马家林

(装备指挥技术学院士官系,北京 102249)

**摘 要** 针对某型越野车辆设计了三级阻尼可调油气悬架,在对其结构和工作原理进行分析的基础上,建立了阻尼数学模型。通过仿真分析、台架试验及实车平顺性道路试验检验,表明所建立的阻尼数学模型是正确的。该三级阻尼可调油气悬架可用于实车,并能有效提升某型越野车辆的行驶平顺性。

**关键词** 越野车 阻尼可调 油气悬架 台架试验 平顺性道路试验

**中国法分类号** U463.335.1;

**文献标志码** A

随着汽车技术的发展,越野汽车逐渐形成了自身鲜明的发展方向,对多变道路的适应性是其发展的重要特色之一。表现在车辆行驶地域更加广泛,通过崎岖、苛刻路面的能力增强,客观上就要求车辆的平顺性与之相适应。因此,阻尼可调技术在越野汽车领域的应用更为迫切。本文针对某型越野汽车设计了三级阻尼可调油气悬架,在对其悬架结构和工作原理进行分析的基础上,建立了阻尼数学模型,通过台架试验与仿真分析的对比及平顺性道路试验检验,表明所设计的三级阻尼可调油气悬架装车后可有效提升越野车辆的行驶平顺性能<sup>[1,2]</sup>。

## 1 结构与工作原理

### 1.1 三级阻尼可调油气悬架结构

如图1所示,为所设计的1/4车三级阻尼可调油气悬架结构简图。活塞缸(2)上端通过关节轴承与车架连接,下端活塞杆通过关节轴承与悬架下臂

相连。活塞缸为柱塞式结构,活塞杆中空,I腔为油腔,II腔与大气相通。活塞缸通过油管、外置阻尼阀(3)与蓄能器(4)相连。

外置阻尼阀(3)是阻尼可调油气悬架的关键部件,主要由压缩阀(5)、常通孔(6)、高压溢流阀(7)、中压溢流阀(8)、低压溢流阀(9)和开关电磁阀(10)(11)等组成,其中,压缩阀、常通孔及三个溢流阀并联安装,开关电磁阀(10)与中压溢流阀(8)串联,开关电磁阀(11)与低压溢流阀(9)串联,使用中,可以通过预先设定三个溢流阀的溢流压力来达到调节阻尼的目的,其中压缩阻尼固定,伸张阻尼可调。

蓄能器为油气悬架的弹性元件<sup>[3]</sup>,分为储油腔和充气腔,气腔根据车辆对悬架刚度的要求预充有一定压力的氮气,储油腔用于蓄存活塞压缩时活塞缸流来的油液,或拉伸时为活塞缸补油。

### 1.2 三级阻尼可调油气悬架工作原理

当车辆在路面上行驶时,在不平路面的激励下,车轮和车身产生相对运动,活塞杆连同活塞相对活塞缸作往复运动。当活塞向上运动,即油气悬架处于压缩行程时,活塞缸I腔油压上升,迫使油液经油管、外置阻尼阀流入蓄能器,在油液流经外置阻尼阀时,因三个溢流阀均处于截止状态,故油液仅经常通孔和压缩阀流入蓄能器,压缩阀为单向

导通结构,仅当压缩阀两侧压差达到开阀压力时才打开,压缩行程主要靠蓄能器内气体受到压缩后的

弹性来抑制活塞的向上运动,阻尼力由油液流经常通孔和压缩阀时产生。

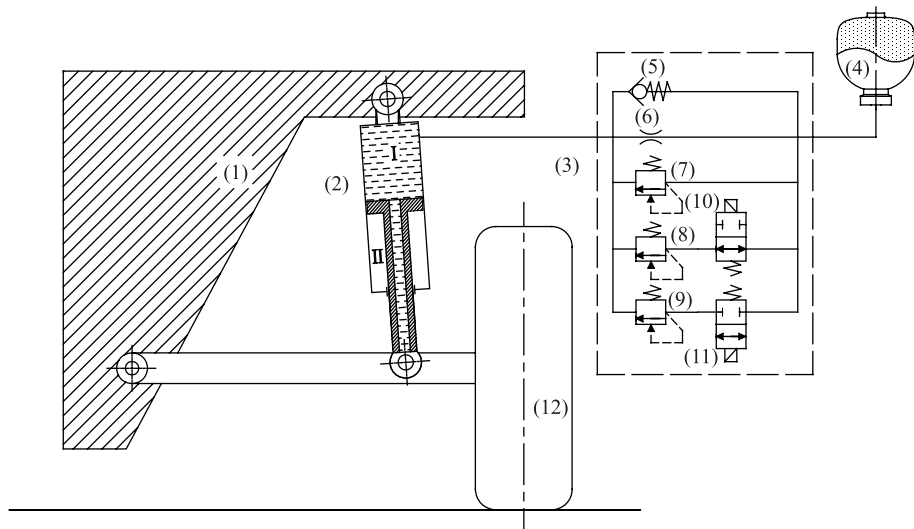


图1 油气悬架结构简图

(1)—车身,(2)—活塞缸,(3)—外置阻尼阀(4)—蓄能器,(5)—压缩阀,(6)—常通孔,  
(7)—高压溢流阀,(8)—中压溢流阀,(9)—低压溢流阀,(10)、(11)—天关电磁阀,(12)—车轮

当活塞向下运动时,即油气悬架处于伸张行程时,活塞缸 I 腔油压下降,蓄能器中的受压气体将油液由储油腔通过外置阻尼阀压回活塞缸 I 腔,当活塞相对活塞缸运动速度较低时,油液仅通过常通孔流回活塞缸,当振动速度增大时,将分三种情况为车辆提供三种不同的伸张阻尼力:①当开关电磁阀(10)和(11)均处于关闭状态时,油液经高压溢流阀溢流,此时所产生的阻尼力为最大;②当开关电磁阀(10)关闭,(11)打开时,油液经低压溢流阀溢流,产生最小阻尼;③当(11)关闭,(10)打开时,油液经中压溢流阀溢流,产生中等阻尼。初始状态(10)打开(11)关闭,即为中等阻尼状态。

## 2 阻尼数学模型

### 2.1 压缩行程阻尼数学模型

#### 2.1.1 开阀前阻尼数学模型

油液由活塞缸经油管流入阻尼阀,并由阻尼阀常通孔经油管流入蓄能器中。则开阀前阻尼阀两侧压差为

$$\Delta p_{y-kq} = 0.5\rho d^4 v_d^2 / (C_{d0}^2 d_0^4) \quad (1)$$

式(1)中, $\rho$ —油液密度; $d$ —活塞直径; $v_d$ —活塞振动速度; $C_{d0}$ —流过常通孔的流量系数; $d_0$ —常通孔直径。

则开阀前阻尼力为

$$F_{y-kq} = 0.25\pi d^2 \Delta p_{y-kq} = 0.125\pi \rho d^6 v_d^2 / (C_{d0}^2 d_0^4) \quad (2)$$

#### 2.1.2 开阀后阻尼数学模型

总的流量为流过常通孔的流量与流过溢流阀的流量之和,且阻尼阀两侧的压差与常通孔两侧压差、溢流阀两侧压差相等,则阻尼阀两侧压差为

$$\Delta p_{y-kh} = [c_1^{2/3} c_3^{1/3} / (6c_1) - 2c_2 / c_3^{1/3}]^2 \quad (3)$$

式(3)中, $c_1 = \sqrt{2/\rho} C_{dx} \pi^2 d_{yx}^3 / (4k_{y0})$ ;

$$c_2 = \sqrt{2/\rho} (C_{d0} A_0 - C_{dx} \pi d_{yx} h_{y0})$$

$$c_3 = 27\pi d^2 v_d + 12 \sqrt{3} / (4c_2^3 / c_1 + 27\pi^2 d^4 v_d^2 / 16)$$

$C_{dx}$ —流过溢流阀的流量系数; $d_{yx}$ —压缩溢流阀直径; $k_{y0}$ —压缩溢流阀弹簧刚度; $h_{y0}$ —压缩溢流阀弹簧预压缩量; $A_0$ —常通孔面积。

则开阀后阻尼力

$$F_{y-kh} = 0.25\pi d^2 \Delta p_{y-kh} =$$

$$0.25\pi d^2\left(\frac{1}{6c_1}c_1^{2/3}c_3^{1/3}-2c_2/c_3^{1/3}\right)^2\tag{4}$$

2.1.3 开阀最大后阻尼数学模型

溢流阀最大开度后,阻尼阀两侧的压差

$$\Delta p_{y-km}=\frac{d^4\rho}{32(C_{dx}d_{yx}h_{y\max}+C_{d0}d_0^2/4)^2}v_d^2\tag{5}$$

式(5)中, $h_{y\max}$ —压缩溢流阀最大开度。

开阀最大后阻尼力

$$F_{y-km}=0.25\pi d^2\Delta p_{y-km}=\frac{\pi d^6\rho}{128(C_{dx}d_{yx}h_{\max}+C_{d0}d_0^2/4)^2}v_d^2\tag{6}$$

2.2 伸张行程阻尼数学模型

2.2.1 开阀前阻尼力

$$F_{s-kq}=0.25\pi d^2\Delta p_{s-kq}=0.125\pi\rho d^6v_d^2/(C_{d0}^2d_0^4)\tag{7}$$

2.2.2 开阀后阻尼力

$$F_{s-kh}=0.25\pi d^2\Delta p_{s-kh}=0.25\pi d^2\left(\frac{1}{6c_1}c_1^{2/3}c_3^{1/3}-2c_2/c_3^{1/3}\right)^2\tag{8}$$

式(8)中, $c_1=\sqrt{2/\rho}C_{dx}\pi^2d_{sx}^3/(4k_{s0})$ ;  
 $c_2=\sqrt{2/\rho}(C_{d0}A_0-C_{dx}\pi d_{sx}h_{s01})$ ; $d_{sx}$ —伸张溢流阀直径; $c_3=27\pi d^2v_d+12\sqrt{3}/\sqrt{4c_2^3/c_1+27\pi^2d^4v_d^2/16}$ ; $k_{s0}$ —伸张溢流阀弹簧刚度; $h_{s01}$ —伸张溢流阀弹簧预压缩量。

中阻尼、大阻尼开阀后阻尼数学模型与小阻尼数学模型区别仅在于伸张溢流阀弹簧预压缩量不同,即 $h_{s01}<h_{s02}<h_{s03}$ 。

2.2.3 开阀最大阻尼力

$$F_{s-km}=0.25\pi d^2\Delta p_{s-km}=\frac{\pi d^6\rho}{128(C_{dx}d_{sx}h_{s\max}+C_{d0}d_0^2/4)^2}v_d^2\tag{9}$$

式(9)中, $h_{s\max}$ —伸张溢流阀最大开度。

3 仿真与台架试验

为了研究三级阻尼可调的效果,采用 Matlab/Simulink 软件对上述数学模型进行仿真分析,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

| 名称                                 | 数值                       |
|------------------------------------|--------------------------|
| 油液密度 $\rho$                        | 850 kg · m <sup>-3</sup> |
| 活塞直径 $d$                           | 0.06 m                   |
| 流量系数 $C_{d0}$ 、 $C_{dx}$           | 0.62                     |
| 常通孔直径 $d_0$                        | 0.004 m                  |
| 压缩溢流阀弹簧刚度 $k_{y0}$                 | 12 kN · m <sup>-1</sup>  |
| 伸张溢流阀弹簧刚度 $k_{s0}$                 | 15 kN · m <sup>-1</sup>  |
| 压缩溢流阀直径 $d_{yx}$                   | 0.010 m                  |
| 伸张溢流阀直径 $d_{sx}$                   | 0.007 m                  |
| 压缩溢流阀预压缩量 $h_{y0}$                 | 0.005 m                  |
| 伸张低压溢流阀弹簧预压缩量 $h_{s01}$            | 0.005 m                  |
| 伸张中压溢流阀弹簧预压缩量 $h_{s02}$            | 0.006 m                  |
| 伸张高压溢流阀弹簧预压缩量 $h_{s03}$            | 0.007 m                  |
| 压缩/伸张溢流阀最大开度 $h_{y\max}/h_{s\max}$ | 0.0022 m                 |

台架试验在“北京佛力悬架测试系统实验台”上进行。为便于比对,仿真与台架试验的激励均为 2.5 Hz 振幅 0.03 m 的正弦波,仿真与试验曲线的对比如图 2 所示。

图 2 中,(a)、(b)两图纵坐标代表阻尼力,阻尼力为正时代表伸张行程,为负时代表压缩行程;(a)图横坐标代表活塞位移,(b)图横坐标代表活塞速度,速度小于零为压缩行程,速度大于零为伸张行程。

台架试验表明,示功图已明显出现了三级阻尼可调效果,且示功图面积与弹簧预压缩量成正比,阻尼的改变仅发生在伸张行程,这一点与仿真的结果能较好地吻合。对于速度特性曲线,在伸张行程一侧开阀后也出现了三条开阀压力不同的曲线,随着伸张溢流阀弹簧预压缩量的增加,开阀压力逐渐增大,与仿真分析的结果能较好的吻合,表明通过溢流压力的改变可以实现阻尼力的三级可调的效果,且开阀后阻尼可调的效果非常明显,该结构更适合越野汽车多变道路行驶时对阻尼的要求。

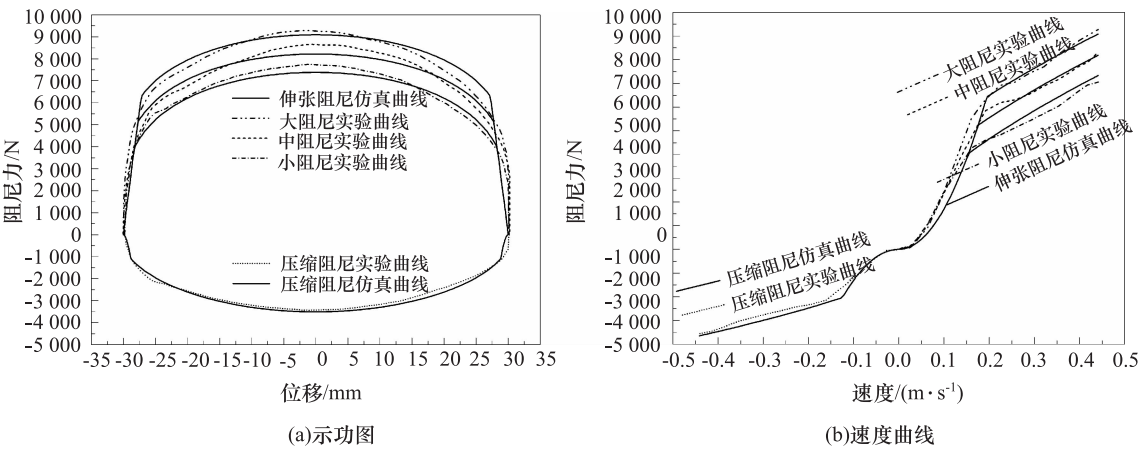


图2 仿真与台架试验对比

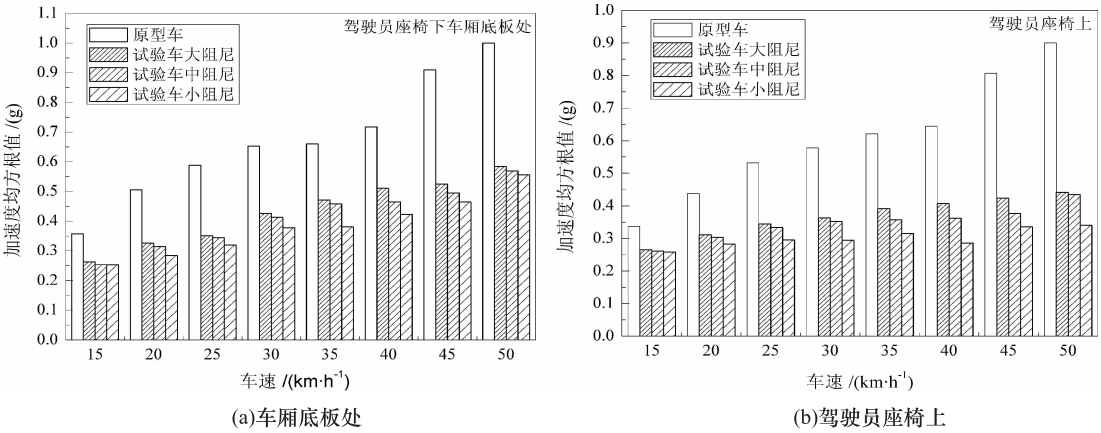


图3 车厢底板处及驾驶员座椅上加速度均方根值对比

4 平顺性道路试验

为了验证阻尼可调悬架系统对整车性能的改善情况,将试验样机装车,并进行了平顺性实际道路试验检验。车辆平顺性主要通过随机道路直线行驶进行测定。试验标准采用“GB/T 4970—1996《汽车平顺性随机输入行驶试验方法》”<sup>[4]</sup>。

试验前分别在各测点安装有加速度传感器,其中驾驶员座椅传感器1个,安装于驾驶员座椅上;车厢底板加速度传感器1个,安装于驾驶员座椅下;车轮传感器4个,分别安装于悬架下摆臂靠近车轮处;车架传感器4个,分别安装在车轮正上方车架上。

为了便于分析,这里仅以比利时路驾驶员座椅上及车厢底板处加速度的改善为例进行说明。

比利时路面不同车速下,驾驶员座椅及车厢底板处加速度均方根值对比如图3所示。由图3可见,比利时路面下,样车较原车行驶平顺性能改善较大,阻尼越小对车厢底板及驾驶员座椅处垂直加速度均方根值的改善越明显。

5 结论

针对越野车辆的行驶特点,设计了溢流压力可控型三级阻尼可调油气悬架,在对其结构和工作原理进行分析的基础上,建立了阻尼数学模型,台架试验与仿真分析对比表明阻尼数学模型的建立是正确的,所设计的油气悬架可用于实车,平顺性实际道路实验表明,该三级阻尼可调油气悬架可以有效地改善越野车辆的行驶平顺性。

## 参 考 文 献

- 1 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. 兵工学报,2006;27(5):903—910
- 2 杨 杰. 基于油气悬架的阻尼可调技术研究. 北京:北京理工大  
学机械与车辆学院,2009
- 3 吴仁智. 油气悬架系统动力学建模仿真和试验研究. 杭州:浙江大学,2000
- 4 GB/T 4970-1996. 汽车平顺性随机行驶试验方法. 北京:中国标准出版社,1996

## Research on Off-road Vehicle with Three Level Damping Based on Hydro-pneumatic Suspensions

HAN Jun-tang, YANG Jie, MA Jia-lin

(Department of Commissioned Officer, Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 102249, P. R. China)

**[Abstract]** A kind of hydro-pneumatic suspension with three level damping was designed According to the characteristics of off-road vehicle. A complex nonlinear mathematic damping model of hydro-pneumatic suspensions was set up on the basis of comprehensive analysis of its working principle and structure. Simulation analysis compared with the test data of bench test and road test showed that the mathematic model is authentic, not only the hydro-pneumatic suspension with three level damping can be used in a real vehicle, but also the ride performance of off-road vehicle can be improved greatly.

**[Key words]** off-road vehicle damping adjustable hydro-pneumatic suspension bench test ride performance road test

(上接第 3334 页)

- 6 Behrens R T, Scharf L L. Signal processing applications of oblique projection operators, IEEE trans on Signal processing, 1994;42(6):1413—1424
- 7 Vandaele P. Moonen M. Two deterministic blind channel estimation algorithms based on oblique projections. Signal Processing, (2000);80:481—495
- 8 Poelman A J, Guy J R F. Multinotch logic – product polarization suppression filters – a typical design example and its performance in a rain clutter environment. Proceedings of IEE Pt, F, 1984;131  
(4):383—396
- 9 Poelman A J. Virtual polarization adaption-a method of increasing detection capability of a radar system through polarization – vector processing. Proceedings of IEE Pt. F, 1981;128(5):261—269
- 10 Mao Xing-Peng, Liu Yong-Tan. Null phase-shift polarization filtering for high-frequency radar. IEEE Trans. On AES, 2007;43(4):1397—1408
- 11 张贤达, 矩阵分析与应用, 北京:清华大学出版社, 2001:55—59

## Oblique Projection Operator and Its Application in Signal Polarization Filtering

LIU Ai-jun, CAO Bin<sup>1</sup>

(Dept. of Communication Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, P. R. China;

Comm. Engineering Research Center, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School<sup>1</sup>, Shenzhen 518100, P. R. China)

**[Abstract]** The calculation for oblique projection operator of multiple interference subspace is proposed on the basis of the oblique projection theory. Combined the oblique projection operator with the signal polarization filtering, a new approach based on oblique projection operator for signal polarization filtering is addressed and the interference can be completely mitigated and meanwhile the target signal does not cause any losses in amplitude and phase using the proposed method.

**[Key words]** oblique projection operator polarization filtering subspace interference suppress