

单向阀式汽车磁流变减振器磁路设计与试验*

贾永枢¹, 周孔亢², 翁茂荣¹, 徐 兴³

(1. 浙江工贸职业技术学院汽车与机械工程学院 温州, 325003) (2. 江苏大学汽车与交通工程学院 镇江, 212013)
(3. 江苏大学汽车工程研究院 镇江, 212013)

摘要 针对汽车双筒磁流变减振器工作出现的外特性畸变现象, 在传统磁流变减振器活塞结构基础上, 设计了一种具有流通孔和单向阀、非旋转体的新型电磁活塞, 并分析了活塞磁路的理论计算方法。根据单向阀式活塞的非旋转体特点, 应用 Ansys 有限元分析软件基于单元边法的 Solid117 单元建立 1/4 三维有限元磁路仿真模型, 进行三维静态磁场分析。设计制造了新型电磁活塞, 应用特斯拉计进行活塞阻尼通道的磁路试验, 对比磁路的三维仿真, 理论计算与试验数据基本吻合, 表明新型活塞磁路的三维仿真与理论计算是正确的。按照某款汽车技术要求设计加工了磁流变减振器, 进行了阻尼特性试验, 结果显示, 示功曲线非常饱满, 有效地消除了外特性畸变, 表明设计的单向阀式电磁活塞是可行有效的。

关键词 三维有限元; 磁路; 单向阀; 双筒磁流变减振器
中图分类号 TB535; TH138

引 言

汽车磁流变减振器具有可控性好、响应快、功耗低等特点, 是目前汽车半主动悬架系统的重要研究内容^[1-3]。磁流变减振器内部磁流变液的粘度受外加磁场控制, 通过控制阻尼通道的磁场大小可以产生不同的阻尼力^[4-5]。电磁活塞设计直接决定减振器性能, 应提供足够大的磁场强度, 同时要避免磁路饱和, 因此合理设计活塞结构及磁路是磁流变减振器重要的研究内容。目前, 国内外对活塞结构设计进行了一定的研究, 如 Lord 公司设计的轴对称活塞结构成功应用在磁流变减振器上, 并得到商业化推广应用^[6]。关新春等^[7]从磁学与力学两种角度分析了不同规格的磁流变阻尼器特点。廖昌荣等^[8]针对传统的磁流变减振器磁场利用率不高的问题, 提出了一种基于多级径向流动模式的磁流变减振器磁路, 并建立磁路分析模型。但传统的电磁活塞及磁路主要是普通旋转体结构, 试验表明, 采用简单旋转体活塞结构的传统汽车双筒磁流变减振器, 工作时由于磁流变液不能及时补偿上腔, 容易出现空行程、外特性畸变现象, 影响了减振器性能。

为了避免汽车双筒磁流变减振器的外特性畸

变, 在传统磁流变减振器活塞结构的基础上, 提出设计了一种含有流通孔和单向阀的非旋转体电磁活塞结构。针对活塞的非旋转体特性, 应用 Ansys 软件对非旋转体磁路进行三维仿真分析, 通过磁路和减振器外特性试验, 验证了单向阀式电磁活塞结构及磁路设计的有效性与三维仿真的正确性。

1 传统汽车双筒磁流变减振器外特性畸变试验

应用传统旋转体电磁活塞结构, 设计加工了汽车悬架双筒磁流变减振器, 结构示意图如图 1 所示。减振器外径为 45 mm, 长度为 620 mm, 活塞杆直径为 20 mm, 活塞线圈电阻为 1.3 Ω , 输入电流为 0~2 A。减振器装在多程程控示功机上进行阻尼特性试验, 如图 2 所示。

试验时输入控制电流为 0~2 A, 在每个输入电流下激励频率选用 0.17, 0.42, 0.83, 1.25, 1.67 Hz, 振幅 ± 50 mm, 最大速度为 0.524 m/s, 得到如图 3 所示的阻尼力特性曲线。由示功图可以看出, 随着电流加大, 汽车双筒磁流变减振器的压缩和拉伸阻尼力逐渐增大, 但在拉伸行程开始阶段出现严重的畸变现象, 减振器无法正常使用。结合图 1, 主

* 国家自然科学基金资助项目(51105177);温州市科技计划资助项目(G20090126)
收稿日期:2013-05-15;修回日期:2013-09-29

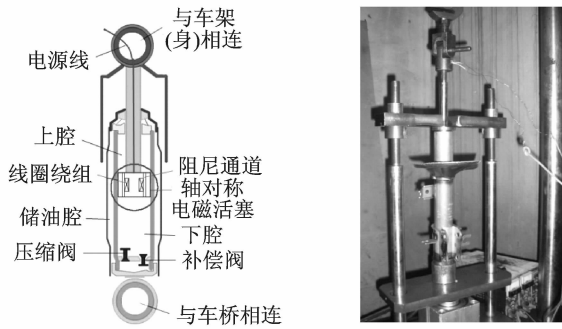


图1 传统汽车双筒磁流变减振器

Fig.1 Traditional vehicle twin-tube MRD



图2 传统汽车双筒磁流变减振器阻尼特性试验

Fig.2 Traditional vehicle MRD properties experiment

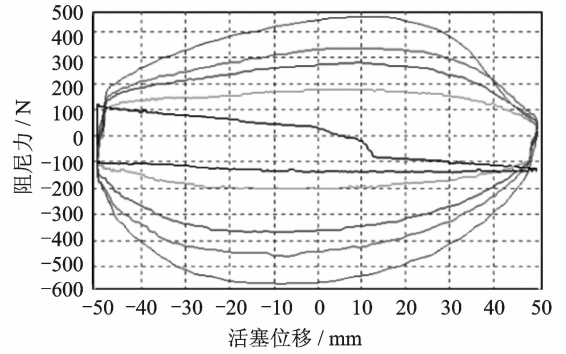
要是由于在压缩行程时,减振器下腔的磁流变液分别通过压缩阀和阻尼通道流入储油腔和上腔,但通电时,由于阻尼通道磁流变液的粘度迅速增大,下腔的磁流变液不能及时充满上腔,后续的拉伸行程出现空行程,阻尼力产生畸变。

2 单向阀式活塞结构及补偿原理

针对传统旋转体活塞结构在压缩行程时由于下腔的油液不能及时补偿上腔,造成拉伸行程出现空行程产生阻尼力畸变,提出在传统活塞结构基础上增设流通孔和单向阀,增大压缩行程对上腔的油液流量,提高压缩行程的补偿能力,防止阻尼力的畸变。活塞结构如图4所示,电磁线圈绕制在工字形铁心上,工字形铁心压在导磁套筒内部并与套筒内壁形成环形阻尼通道。工字形铁心中心开设4个流通孔,上面设置1个单向阀片和1个阀片预紧弹簧。流通孔用来在压缩行程时增大油液补偿;单向阀片用来控制油液的单向流动即只在压缩时打开阀门进行补偿;预紧弹簧用来压紧阀片,防止单向阀片工作时关闭不紧引起油液泄露。

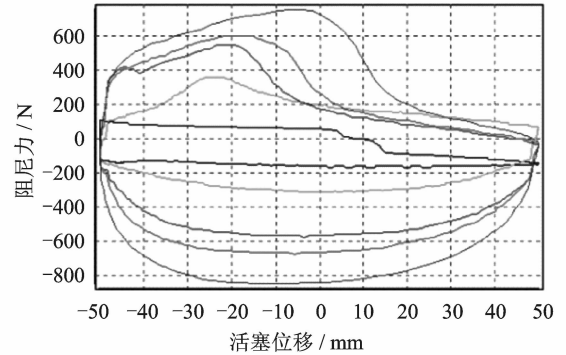
根据磁路原理,电磁线圈通电时产生的磁场垂直穿过环形阻尼通道,但4个流通孔内部的磁场可以忽略不计。输入不同的电流,在环形阻尼通道内产生不同的磁场,可以控制流过环形阻尼通道之间的磁流变液粘度,实现减振器阻尼力大小的控制;但流通孔内部没有磁场,液体粘度不可控,有效地增加了液体上下腔的流通面积,避免油液补偿不足造成外特性的畸变。

减振器拉伸行程时活塞杆向上运动,单向阀在上腔油液压力和预紧弹簧的作用下关闭流通孔,磁流变液由上腔通过环形阻尼通道流向下腔,产生拉伸阻尼力。压缩行程时活塞杆向下运动,单向阀在



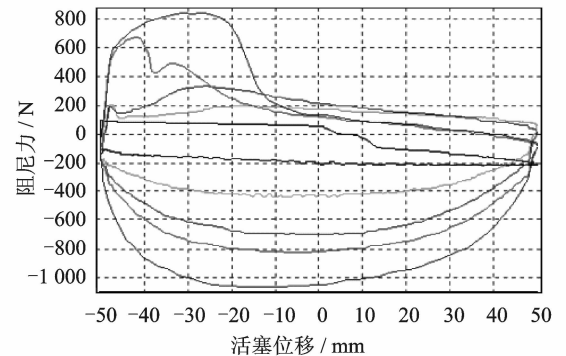
(a) 电流0 A时示功图

(a) Damping-displacement curve of current 0 A



(b) 电流0.4 A时示功图

(b) Damping-displacement curve of current 0.4 A



(c) 电流0.8 A时示功图

(c) Damping-displacement curve of current 0.8 A

图3 传统汽车双筒磁流变减振器在不同电流时的示功图(由内往外频率分别为0.17,0.42,0.83,1.25,1.67 Hz的曲线)

Fig.3 Damping-displacement curve of traditional vehicle MRD at different currents (Frequencies are 0.17, 0.42, 0.83, 1.25, 1.67 Hz from the inside to the outside)

下腔油液的作用下克服较小的弹簧预紧力打开流通孔,下腔的油液分别经环形阻尼通道和单向流通孔流入上腔,产生压缩阻尼力。单向阀的打开,增大了下腔流入上腔的流通面积,油液对上腔进行有效补偿,防止拉伸行程出现空行程和外特性畸变。

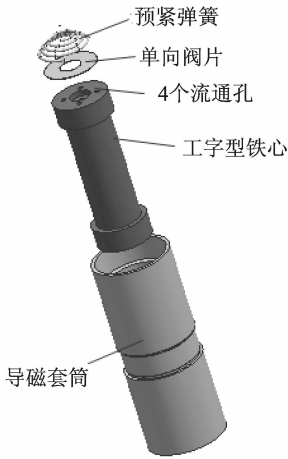


图 4 单向阀式活塞结构

Fig. 4 Piston structure with check valve

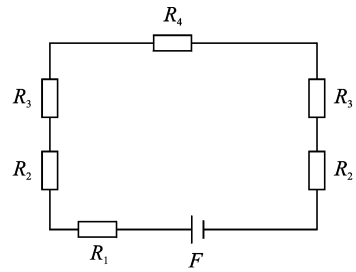


图 6 活塞的等效磁路

Fig. 6 Equivalent magnetic circuit of piston

3 磁路理论计算

图 4 单向阀式活塞结构可以简化为图 5 所示的磁路结构。根据磁流变减振器工作特点,磁路设计的目标是在减振器内外筒尺寸确定下,磁力线垂直穿过阻尼通道,并在整个活塞磁路未达到饱和的前提下,最大可能提高环形阻尼通道 A_3, A_5 处的磁感应强度。

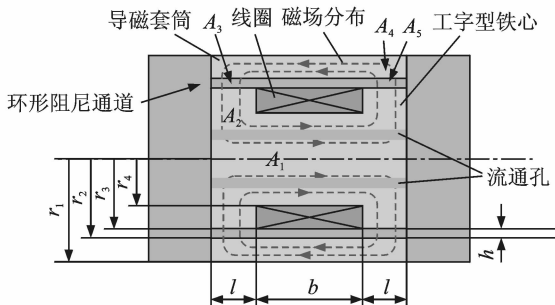


图 5 单向阀式活塞磁路结构

Fig. 5 Magnetic circuit of piston with check valve

根据磁通的连续性以及磁路对称性,在忽略漏磁后,磁路就和电路一样,活塞闭合磁路可以近似简化为如图 6 所示的等效磁路,图中 F 为线圈产生的总磁势, R_1, R_2, R_3, R_4 为磁路中 A_1, A_2, A_3, A_4 区域的磁阻。

根据磁路欧姆定律和基尔霍夫定理

$$F = NI = R_m \Phi = (R_1 + 2R_2 + 2R_3 + R_4) \Phi \quad (1)$$

其中: R_m 为回路总磁阻; N 为线圈匝数; I 为线圈电流; 磁通 $\Phi = \int_S B \cdot dS$, B 为磁力线通过面积 S 的磁感应强度。

由磁阻计算公式^[9]

$$R = \oint_l \frac{dx}{uS} = \oint_l \frac{dx}{u_0 u_r S} \quad (2)$$

其中: x 为磁路长度; u_0 为空气导磁率; u_r 为与外磁场有关材料相对导磁率。

可以得到

$$R_1 = \int_{l/2}^{b+l.5l} \frac{dx}{u_0 u_r \pi (r_4^2 - d^2)} = \frac{b+l}{\mu_0 \mu_1 \pi (r_4^2 - d^2)} \quad (3)$$

$$R_2 = \int_{r_4}^{r_3} \frac{dx}{u_0 u_r 2\pi x l} = \frac{\ln r_3 - \ln r_4}{\mu_0 \mu_2 2\pi l} \quad (4)$$

$$R_3 = \int_{r_3}^{r_2} \frac{dx}{\mu_0 \mu_r 2\pi x l} = \frac{\ln r_2 - \ln r_3}{\mu_0 \mu_3 2\pi l} \quad (5)$$

$$R_4 = \int_{l/2}^{b+l.5l} \frac{dx}{\mu_0 \mu_r \pi (r_1^2 - r_2^2)} = \frac{b+l}{\mu_0 \mu_4 \pi (r_1^2 - r_2^2)} \quad (6)$$

式(3)中 d 为流通孔的直径,根据减振器外特性畸变程度确定,一般每个孔可取 1.5 mm,由于孔径较小对磁阻的影响可以不计。忽略漏磁,每一段磁路中的磁通密度是均匀的,由式(1)阻尼通道的磁感应强度 B_3 的表达式得

$$B_3 = \frac{NI}{R_m S_3} \quad (7)$$

其中: S_3 为磁力线穿过阻尼通道的有效作用面积。

4 磁路三维有限元仿真

为了准确计算磁路,一般采用有限元方法对磁路进行仿真优化^[10-11]。对于简单旋转体磁路结构,可以简化为有限元二维仿真模型^[12]。由于设计的活塞铁心中有 4 个面对称流通孔,是一种非旋转体磁路,不能应用二维有限元仿真模型分析,选用 Ansys 软件 EMAG 模块的静态磁场仿真对活塞磁路进行三维有限元分析,分析活塞以及阻尼通道处的磁场分布。

1) 定义单元类型与材料属性

三维静态磁场分析有标量势法和单元边法两种方法。标量势法使用节点自由度作为单元自由度,

对于非连续介质求解时带来较大误差;单元边法 Solid117 单元的节点自由度矢量磁势是沿单元边切线积分的结果,计算精度比标量势法高。因此选用基于单元边法的 Solid117 单元进行三维仿真。整个活塞的材料选用导磁率高、矫顽力低、退磁性能好的 DT4C 型电工纯铁材料,磁流变减振器工作液选用德国 BASF 磁流变液,并设置材料的 B-H 参数。

2) 三维结构模型建立

由于 4 个流通孔具有面对称性,为减少单元网格划分数量、提高计算速度等,取含 1/4 面对称流通孔的结构模型作为有限元的研究对象,在 Ansys 电磁模块前处理模块中建立有限元几何结构模型,如图 7 所示。

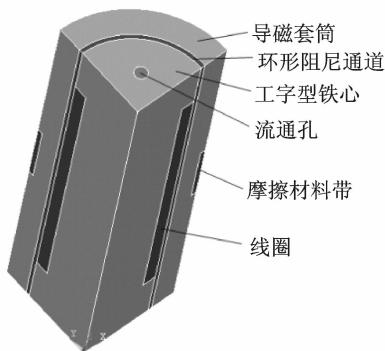


图 7 活塞 1/4 三维结构模型

Fig. 7 1/4 three-dimensional finite element model of piston

3) 网格划分

活塞整体采用智能划分三维网格,为了提高环形阻尼通道仿真精度,对通道的表面进一步细化划分网格,划分后 1/4 活塞的节点数为 34 671,单元数为 22 416。

4) 加载与求解

施加载荷和边界条件的设定是获得仿真正确结果的关键。圆筒形线圈电流载荷可以通过设置跑道线圈的长轴、短轴、半径的参数获得。同时施加磁力线平行边界条件,即假设磁力线无漏磁且平行于边界,最后求解运算。

图 8 为加载电流 2 A 时活塞 1/4 和活塞整体三维仿真磁场云图,阻尼通道的介质为磁流变液。经仿真对比,应用两种活塞模型仿真得到阻尼通道磁极的磁感应强度都为 0.6 T,整体模型与 1/4 模型的阻尼通道仿真结果是一致的。改变加载电流可以得到活塞不同的磁场云图,2 A 时整个模型的最大磁感应强度为 1.7 T,而根据《电磁纯铁》(GB/T 6983-2008)标准 DT4C 的饱和磁感应强度为 1.8

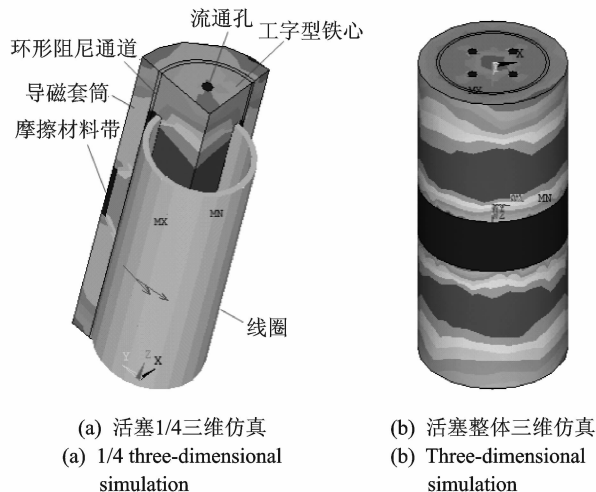


图 8 活塞三维有限元仿真磁场云图

Fig. 8 Piston of magnetic cloud map of 1/4 three-dimensional finite element

T,因此整个活塞未出现磁饱和现象,磁场分布合理。根据减振器对磁流变液性能要求,可以满足减振器工作要求。

5 试验验证

5.1 活塞磁路特性试验

自行设计了单向阀式非旋转体的汽车双筒磁流变减振器的电磁活塞,考虑活塞实际工作的漏磁问题,活塞材料选用 DT4C 电工纯铁。采用上海高端 GM-2 特斯拉计测定磁路磁场,输入电流 0~2 A,活塞阻尼通道的介质为空气,如图 9 所示。测试减振器内部活塞阻尼通道的磁场,改变输入电流大小,通过特斯拉计显示记录活塞阻尼通道的磁场,得到如图 10 磁场与电流关系的特性曲线。



图 9 活塞磁路试验

Fig. 9 Piston magnetic circuit test

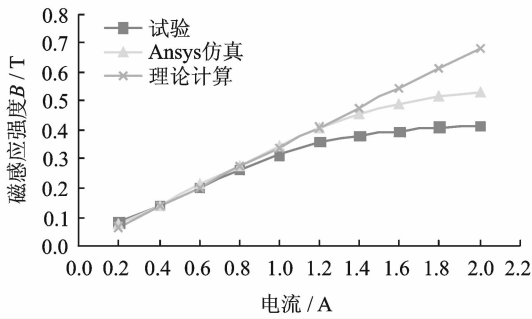


图 10 活塞阻尼通道磁场与电流关系曲线

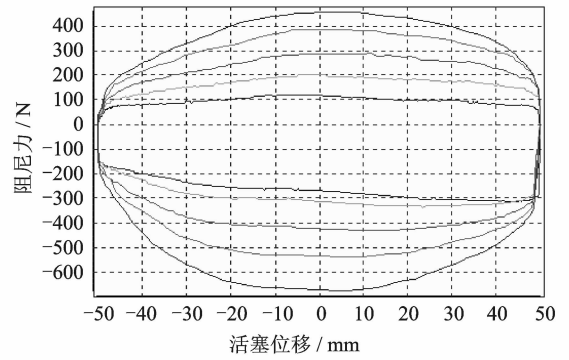
Fig. 10 Plot for for damping channel magnetic field vs. current

分析图 10,活塞阻尼通道的磁感应强度随电流增大而增大,磁路具有较强的可控性。在空气介质中,电流 2 A 时通道的磁感应强度为 0.42 T,磁路可以满足汽车磁流变减振器对磁场的要求。对比三维仿真、理论计算与试验数据,输入电流在 0~1 A 时三者数据吻合较好;当电流 1~2 A 时试验与仿真、理论计算误差不断增大,2 A 时误差最大分别为 0.11,0.26 T。这主要是由于电流大于 1 A 时活塞的纯铁材料开始逐渐出现磁饱和现象,而仿真模型和理论计算忽略了磁路饱和、漏磁、加工工艺等误差问题。因此,忽略上述误差因素,磁路三维有限元仿真和理论计算方法是正确的。

5.2 单向阀式汽车双筒磁流变减振器阻尼特性试验

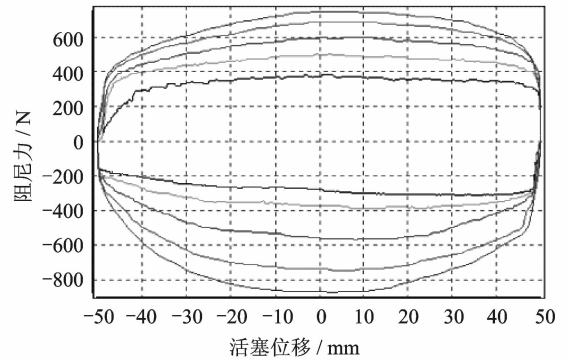
为了测试设计的单向阀式电磁活塞及磁路性能,根据某款轿车减振器的技术要求,自行设计、加工、制造了单向阀式非旋转体活塞的汽车悬架双筒充气磁流变减振器,对减振器进行阻尼特性试验。为了方便对比,除了电磁活塞增设流通孔和单向阀外,减振器的其他主要结构尺寸、试验条件等与普通磁流变减振器一致,得到如图 11 所示的阻尼力特性曲线。

分析图 11,减振器耗能性随着输入电流、激励频率的增大而增加,减振器压缩与复原阻尼力也不断增加,减振器阻尼力具有良好的可控性。对比图 3和图 11,采用单向阀式非旋转体活塞的汽车双筒磁流变减振器示功曲线非常饱满,有效地消除了旋转体结构的工作空行程、阻尼力畸变问题,示功图可以满足减振器工作要求,设计的单向阀式非旋转体电磁活塞结构及磁路是有效的。



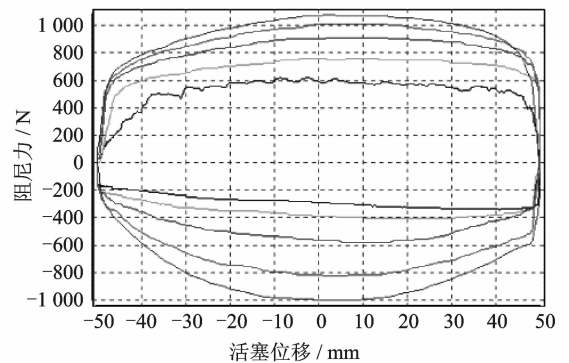
(a) 电流 0 A 时示功图

(a) Damping-displacement curve of current 0 A



(b) 电流 0.4 A 时示功图

(b) Damping-displacement curve of current 0.4 A



(c) 电流 0.8 A 时示功图

(c) Damping-displacement curve of current 0.8 A

图 11 单向阀式汽车磁流变减振器在不同电流时的示功图(由内往外频率分别为 0.17,0.42,0.83,1.25,1.67 Hz 的曲线)

Fig. 11 Damping-displacement curve of vehicle MRD with check valve at different currents (Frequencies are 0.17, 0.42, 0.83, 1.25, 1.67 Hz from the inside to the outside)

6 结 论

1) 针对传统电磁活塞结构用于汽车双筒磁流变减振器出现的空行程、外特性畸变问题,提出了一

种单向阀式非旋转体的电磁活塞结构,并分析该活塞的磁路理论计算方法。

2) 自行设计加工了单向阀式非旋转体电磁活塞,对阻尼通道处磁路进行试验,结果表明,磁路具有较强的可控性,设计的非旋转体活塞磁路及结构是有效的。试验数据与理论计算、Ansys 三维磁路仿真数据吻合,表明非旋转体活塞的磁路理论计算与三维仿真是正确的。

3) 按照某款汽车前悬架减振器的技术要求,设计和制作了双筒式磁流变减振器,并进行外特性试验。结果显示,示功图非常饱满,具有良好的可控性,可以有效消除减振器工作的空行程、外特性畸变,表明提出的单向阀式非旋转体电磁活塞结构及磁路是正确有效的,可以有效地防止外特性畸变。

4) 针对汽车双筒磁流变减振器的非旋转体特性,应用 Ansys 软件基于单元边法 Solid117 单元建立 1/4 三维有限元磁路仿真模型,分析三维静态磁场,为磁流变减振器磁路设计提供依据。

参 考 文 献

- [1] Kanarachos S A. Intelligent semi-active vehicle suspension systems using neural networks[J]. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, 2012,7(2):135-158.
- [2] Giorgetti A, Baldanzini N, Biasiotto M, et al. Design and testing of a MRF rotational damper for vehicle applications[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(6):152-181.
- [3] Parlak Z, Engin T, Cesmeci S, et al. Dynamic characterisation of a vehicle magnetorheological shock absorber[J]. International Journal of Vehicle Design, 2012,59(2):129-146.
- [4] Tudon-Martinez J C, Lozoya-Santos J, Morales-Mendez R. Efficiency of on-off semiactive suspensions in a pick-up truck[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2012,5(1):333-342.
- [5] 贾永枢,周孔亢. 车用磁流变液流变特性分析及试验[J]. 机械工程学报,2009,45(6):246-250.
- Jia Yongshu, Zhou Kongkang. Rheological properties analysis and experiment of magnetorheological fluid for automobile[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(6):246-250. (in Chinese)
- [6] Lord C. Designing with MR fluids[R]. North Carolina: Lord Corporation, 1999.
- [7] Guan Xinchun, Li Jinhai, Ou Jinping. Magnetic and mechanical performance of magnetorheological fluid damper with different dimension[J]. Journal of Functional Materials, 2006,37(7):1169-1171.
- [8] Zhao Danxia, Liao Changrong, Liu Qiong, et al. Design method of magnetic circuit for magnetorheological fluid shock absorber[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2012,18(2):159-164.
- [9] 邹继斌. 磁路与磁场[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998:43-44.
- [10] Guo N Q, Du H, Li W H. Finite element analysis and simulation evaluation of a magnetorheological valve[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003,21(6):438-445.
- [11] Zhu Xiaohua, Lai Chunlin. Design and performance analysis of a magnetorheological fluid damper for drill-string[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012,40(1):67-83.
- [12] 李以农,潘杰锋,郑玲. 磁流变阻尼器的有限元参数优化设计[J]. 重庆大学学报,2010,33(5):35-40.
- Li Yinong, Pan Jiefeng, Zheng Ling. Design optimization of magneto-rheological damper based on finite element parametric language[J]. Journal of Chongqing University, 2010,33(5):35-40. (in Chinese)



第一作者简介:贾永枢,男,1977年12月生,副教授。主要研究方向为车辆磁流变减振器、车辆动态性能。曾发表《车用磁流变液流变特性分析及试验》(《机械工程学报》2009年第45卷第6期)等论文。

E-mail: wzmjys@sina.com