

一种内旁通道阀式磁流变液悬置结构原理 与试验研究

钱立军, 杜浩, 陈朋, 白先旭

(合肥工业大学 车辆工程系 自适应结构与智能系统实验室, 安徽, 合肥 230009)

摘 要: 理想的动力总成悬置在低频高幅值激励下应具有大刚度大阻尼、在高频低幅值激励下小刚度小阻尼特性. 针对现有磁流变液悬置的动刚度可控范围低、零场动刚度大及工作行程有限等问题, 本文提出并实现了一种在全工作频率范围内具有较大动刚度范围、较小零场动刚度和最大化工作行程的磁流变液悬置, 即内旁通道阀式磁流变液悬置. 利用有限元仿真软件对该磁流变液悬置进行了电磁场仿真分析, 建立了该磁流变液悬置的可控阻尼力数学模型, 并基于搭建的伺服液压作动系统进行了磁流变液悬置阻尼力可控性能试验.

关键词: 动力总成; 磁流变液; 悬置; 内旁通道阀

中图分类号: TB535.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-0645(2018)增刊 1-0020-04

DOI: 10.15918/j.tbit 1001-0645.2018. 增刊 1.005

Principle Design and Test of a MR Fluid Mount with an Inner Bypass Valve

QIAN Li-jun, DU Hao, CHEN Peng, BAI Xian-xu

(Laboratory for Adaptive Structures and Intelligent Systems (LASIS), Department of Vehicle
Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: Ideal power-train mounting systems should have large stiffness and damping at low frequencies and large amplitudes, small stiffness and damping at high frequencies and small amplitudes. To solve the problems of small controllable range of dynamic stiffness, large field-off dynamic stiffness and limit stroke of the existing magneto rheological (MR) fluid mounts, a MR fluid mount with an inner bypass valve was proposed and developed. The MR fluid mount was designed to provide a wide range of dynamic stiffness in full working frequency range, small field-off dynamic stiffness and maximum stroke. Electromagnetic field simulation analysis of the MR fluid mount was carried out with a finite element simulation software. A mathematical model of the MR fluid mount was built. Experimental tests based on the servo-hydraulic test system were conducted.

Key words: power-train; MR fluid; mount; inner bypass valve

液压悬置目前广泛应用于汽车、轮船、工程机械等动力总成悬置系统. 相对于橡胶悬置, 液压悬置在低频激励下表现出较大的阻尼特性, 一定程度上抑制了动力总成系统的振动. 然而, 在高频激励下由于液压悬置的阻尼孔或惯性通道堵塞, 液压悬置

表现出的大刚度特性恶化了悬置系统隔振性能^[1]. 磁流变液是一种在外界磁场作用下流变特性快速、可逆调节的智能材料^[2]. 应用磁流变液的悬置具有较大的阻尼力(动刚度)控制范围, 并且具有响应速度快、阻尼力大、结构简单、耐久性好、耗能低以及替

收稿日期: 2018-06-15

基金项目: 国家部委预研项目(6140240040101)

作者简介: 白先旭(1984-), 男, 工学博士, 副教授, E-mail: bai@hfut.edu.cn.

代性好的特点^[3-5].

传统磁流变液悬置结构并没有妥善解决高频振动时阻尼孔或惯性通道堵塞的问题,即使在添加解耦器的情况下,液体的共振依旧会增大悬置的零场动刚度^[6-7]. 同时由于阻尼孔或惯性通道的堵塞,传统磁流变液悬置阻尼力可调节范围有限. 又由于传统磁流变液悬置的上液腔体积较大,需使用大量的磁流变液,这样就提高了悬置生产成本. 此外,在一些挤压模式的磁流变液悬置中,由于磁流变液的挤压工作特性受到挤压间隙大小的限制,因此悬置的应用范围受到了振动位移幅值的限制^[3].

为解决现有技术的不足,提出了一种内旁通道阀式磁流变液悬置的结构原理. 该内旁通道阀式磁流变液悬置由橡胶单元和磁流变液单元组成. 在不改变传统磁流变液悬置外部尺寸、磁流变液使用量的前提下,实现一种在整个工作频率范围内具有较大动刚度调节、较小零场动刚度以及最大化工作行程的磁流变液悬置. 将对磁流变液悬置的电磁回路进行有限元仿真与分析,建立可控阻尼力数学模型,并进行试验测试和分析.

1 磁流变液悬置结构原理

图 1 给出了提出的内旁通道阀式磁流变液悬置的结构原理图. 内旁通道阀式磁流变液悬置是由橡胶单元和磁流变液单元组成. 橡胶单元中的橡胶主簧处在液压腔外部,用于承受静载荷. 磁流变液单元是由外缸体构成液压腔,在外缸体中同心设置内缸筒,在外缸体与内缸筒之间形成环形流道. 由活塞杆和活塞构成活塞机构,活塞在内缸筒中的轴向移动带动液压腔中磁流变液在环形通道和内缸筒的内腔之间形成流动,进而使得环形流道中的磁流变液工作在流动模式下. 励磁线圈嵌装在内缸筒外周的环形

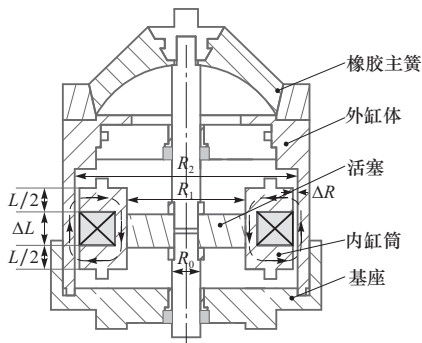


图 1 磁流变液悬置原理图

Fig. 1 MR fluid mount principle prototype.

凹槽中,当给励磁线圈施加电流时,励磁线圈将在内缸筒和外缸体之间产生磁场. 通过调节作用于励磁线圈上的电流,可以实现对工作间隙内磁流变液屈服应力的控制,进而调节磁流变液悬置的输出阻尼力(动刚度). 提出的磁流变液悬置匹配了较小刚度和阻尼的橡胶主簧,并且橡胶单元与磁流变液单元通过活塞机构连接平行作用,橡胶主簧与磁流变液没有直接接触,橡胶主簧没有参与到液压腔的构建中. 因此在高频激励下,不会因为橡胶主簧的柔性特性发生流通过道的堵塞,进而实现较小的零场动刚度.

2 有限元分析

图 2 为励磁电流为 2.0 A 时磁流变液悬置结构内部的磁感线和环形通道截面内的磁感应强度分布情况. 如图 2(a)所示,结构内部的磁感线基本沿着预先设计的磁路形成闭合回路. 如图 2(b)所示,磁场在工作间隙内的分布并不均匀,以线圈为分界,上工作间隙和下工作间隙内磁感应强度关于线圈对称.

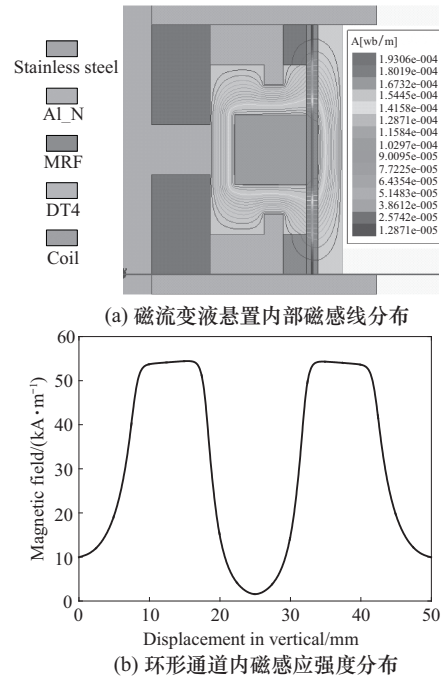


图 2 励磁电流为 2.0 A 时磁路仿真结果

Fig. 2 Magnetic analysis of the MR fluid mount with a 2.0 A applied current

3 磁流变液悬置的数学模型

磁流变液悬置的可控阻尼力 F 可表示为

$$F = \Delta P A_p, \quad (1)$$

$$\Delta P = \Delta P_\tau + \Delta P_\eta + \Delta P_1, \quad (2)$$

式中: ΔP_τ 为由磁流变效应引起的压力差; ΔP_η 为由流体粘性效应引起的压力差; ΔP_I 为由流体的惯性效应引起的压力差; A_p 为活塞盘的作用面积. 由磁流变效应引起的压力差为

$$\Delta P_\tau = \frac{2L\tau_y}{\Delta R} \text{sgn}(\dot{x}_r). \quad (3)$$

式中: L 和 ΔR 分别为工作间隙的长度和宽度; τ_y 为磁流变液的屈服应力. 由粘性效应引起的压力差为

$$\Delta P_\eta = \frac{6(L + \Delta L)\eta}{\Delta R^2} \dot{x}_r. \quad (4)$$

式中: ΔL 为线圈长度; η 为磁流变液的粘度; $\dot{x}_r$ 为工作间隙内流体的流动速度. 由惯性效应引起的压力差为

$$\Delta P_I = (L + \Delta L)\rho \ddot{x}_r. \quad (5)$$

式中: ρ 为磁流变液的密度; $\ddot{x}_r$ 为工作间隙内流体的流动加速度.

工作间隙内的流体受上、下腔体内流体的可压缩性影响而不产生流动, 当给悬置施加连续的位移激励 x 时, 可以得到下式:

$$C_1 \dot{P}_1 = A_p \dot{x} - A_f \dot{x}_r, \quad (6)$$

$$C_2 \dot{P}_2 = -(A_p \dot{x} - A_f \dot{x}_r), \quad (7)$$

式中: $\dot{P}_1$ 、 $\dot{P}_2$ 分别为上、下腔体内流体的压力变化率; C_1 、 C_2 分别为上、下腔体内流体的容量; A_f 为工作间隙面积; $\dot{x}$ 为激励速度.

4 磁流变液悬置力学特性测试

4.1 零场状态频率响应特性

如图 3 所示, 激励频率的改变对悬置零场状态下的力学特性影响较小, 说明该结构在高频激励下可以维持较小的零场动刚度.

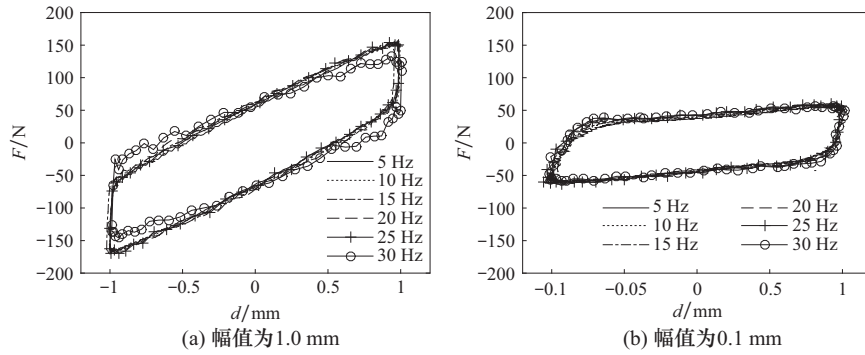


图 3 不同幅值正弦位移激励下磁流变液悬置的力-位移特性曲线:

Fig. 3 Field-off damping force versus displacement when the MR fluid mount under the sinusoidal displacement excitations with different amplitudes

4.2 阻尼力可控特性

如图 4(a) 所示, 随着励磁电流的增加, 磁流变液悬置输出的力峰值和力-位移迟滞环的面积都有明显

的增加, 验证了磁流变液悬置结构和磁路设计的有效性. 同时, 在施加位移激励的过程中, 由于受到磁流变液磁滞特性的影响, 磁流变液悬置输出力也表现出明显的磁滞现象. 对比图 4(a) 与图 4(b), 在小位移

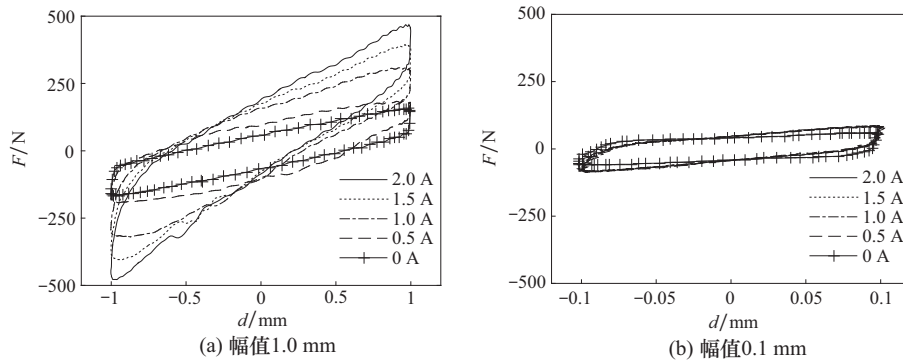


图 4 频率 10 Hz 正弦位移激励下不同励磁电流时磁流变液悬置力-位移特性

Fig. 4 Damping force versus displacement when the MR fluid mount under 10 Hz sinusoidal displacement excitations with different amplitudes

激励幅值工况下,磁流变效应产生的可控阻尼力的峰值将减小.同时由于该悬置的工作模式为流动模式,当激励幅值为小位移且因励磁电流的增大引起流体压力差增大时,环形通道中的流体流动幅度减小,进而导致该悬置的阻尼力可控性能下降.

4.3 可控动刚度

如图 5(a)所示,磁流变效应使得悬置动刚度随励磁电流的变化具有较大的可控范围,并且悬置的可控动刚度受激励频率的变化影响较小.图 5(b)与图 5(a)的试验结果相比,相同励磁电流作用时,小位移激励下磁流变液悬置对应的动刚度更大,主要由于摩擦力大小近似不变,小位移激励时,其对应的动刚度将增加.随位移激励幅值的减小,大电流作用下由于 MR 液磁滞特性使得在小幅值激励下没有足够的激励位移产生较大的阻尼力,因此 MR 效应引起的动刚度增幅低于小电流作用下的增幅.

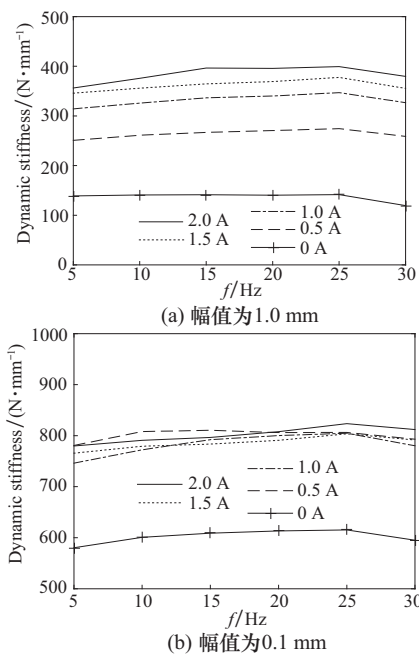


图 5 不同幅值正弦位移激励工况下磁流变液悬置动刚度测试结果

Fig. 5 Dynamic stiffness of the MR fluid mount under sinusoidal displacement excitations with different amplitudes

5 结束语

提出、设计并试验测试了一种内旁通道阀式磁流变液悬置,进行了电磁有限元仿真分析、建立了其数学模型并进行了性能测试试验.研究表明:高频激励下磁流变液悬置可以提供较小的零场动刚度,有利于悬置系统的高频隔振;在低频、大位移激励下,磁流变液悬置呈现良好的动刚度、可控阻尼性能,满足动力总成悬置低频隔振的要求;摒弃了传统的电磁线圈-活塞结构,活塞结构较简单,实现了磁流变液悬置具有较大的运动行程.

参考文献:

- [1] 刘福水,葛蕴珊.半主动控制液力悬置的模拟和实验研究[J].北京理工大学学报,2000,30(5):570-575.
- [2] Liu Fushui, Ge Yunshan. Simulation and experimental study of semi-active control hydraulic mount [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2000, 30(5): 570-575. (in Chinese)
- [3] Chen P, Bai X X, Qian L J, et al. Velocity-dependent characteristics of magnetorheological fluids in squeeze mode considering the hydrodynamic and the magnetic field interactions [J]. Journal of Rheology, 2017, 61(3): 455-465.
- [4] Chen P, Bai X X, Qian L J. A magneto-rheological fluid mount featuring squeeze mode: analysis and testing [J]. Smart Materials and Structures, 2016 25(5):055002.
- [5] Chen P, Bai X X, Qian L J. Magnetorheological fluid behavior in high-frequency oscillatory squeeze mode: experimental tests and modelling [J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(10):555-569.
- [6] Bai X X, Wereley N M, Choi Y T, et al. A bi-annular-gap magnetorheological energy absorber for shock and vibration mitigation[J]. In Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, 2012, 8341(1):834123.
- [7] Ahmadian M, Ahn Y K. Performance analysis of magnetorheological mounts [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 10(10):248-256.
- [8] Nguyen T, Elahinia M, Wang S. Hydraulic hybrid vehicle vibration isolation control with magneto-rheological fluid mounts [J]. International Journal of Vehicle Design, 2013, 63(2-3):199-222.

(责任编辑:孙竹凤)