

# Co-simulation of Magnetorheological Semi-active Suspension Based on ADAMS & SIMULINK

Shi-Xing Zhu, Hai-Jun Wang, Peng Wang

(Civil Aviation University of China, College of Aeronautical engineering, Tianjin, 300300)

Email: navy226@126.com

**Abstract:** Based on researching the multiring structure of Magnetorheological (MR) damper developed independently by Civil Aviation University of China and the fundamental performance parameter of MR fluid (MRF), the damping force of the calculating formula was formulated by using the experiments. A multi-body dynamic model of the 1/4 vehicles' suspension was built by using virtual prototype model, and the fuzzy control system for the semi-active suspension was designed under the MATLAB/SIMULINK environment. The co-simulation of ADAMS and MATLAB were carried out. The results of simulation shows that the semi-active suspension made up of the virtual prototype model and fuzzy control strategy can reduce the vehicle's vibration and improve the ride comfort characteristics. The Co-simulation method also offers a new way to the simulation of complex dynamic system and control strategy.

**Key words:** Magnetorheological(MR) fluid; MR damper; co-simulation; semi-active suspension

## 基于磁流变减振器的车辆半主动悬架的联合仿真

祝世兴, 王海军, 王鹏

(中国民航大学 航空工程学院 天津 300300)

Email: navy226@126.com

**摘要:** 本文在研究了自行研制的多环形槽式磁流变减振器及磁流变液的基本性能的基础上, 利用实验数据所拟合的阻尼力模型, 建立了基于磁流变减振器的四分之一车辆半主动悬架的虚拟样机。根据车身的运动状态和磁流变减振器的工作原理设计了半主动悬架的模糊控制策略。应用机械系统动力学分析软件 MSC.ADAMS 及控制系统仿真软件 MATLAB/SIMULINK 模拟四分之一车辆半主动悬架在正弦激励输入下的响应, 研究结果表明基于磁流变减振器的车辆半主动悬架可以大幅减缓车身的振动, 有效的改善整车平顺性及提高乘坐舒适性。复杂机电系统的联合仿真方法对提高半主动悬架减振性能的设计研究有一定的参考价值。

**关键词:** 磁流变液; 磁流变减振器; 联合仿真; 半主动悬架

### 1 引言

磁流变液(magnetorheological fluid, MRF)是一种在磁场的作用下其黏性、塑性等流变特性发生急剧变化的新型智能材料,它是一种悬浮液体<sup>[1]</sup>。

悬架系统是由弹簧、减振器和导向机构三部分组成的连接车身和车轮的汽车的一个重要组成部分。它不仅能通过缓冲和吸收来自车轮的振动来提高汽车的减振性能、提高乘坐的舒适性,而且能承受来自车身的侧倾力、俯仰等<sup>[2]</sup>。磁流变阻尼器(MR fluid damper)是一种阻尼可控器件,磁流变阻尼器具有调节范围宽、功耗低、响应速度快、结构简单等特点,在汽车、建筑、

航空航天等领域具有应用广阔前景。基于磁流变减振器的控制性能接近主动控制技术,综合了被动控制和主动控制的优点:仅需要较小的外部能源输入;能耗低、装置简单、不易失稳且适用范围广。目前,基于磁流变液的减振器在半主动悬架上的应用及其智能控制策略的研究已经逐渐成为热点<sup>[3]</sup>。

虚拟样机技术是现代设计制造领域的一项新技术。本文利用在 ADAMS 中建立的汽车悬架的虚拟样机模型和在 MATLAB/SIMULINK 中建立的模糊控制子系统模型进行联合仿真,为提高悬架的减振性能的设计及其制造提供依据。从而大大减少了昂贵的物理样机制造及试验次数,提高了产品设计质量,大幅度地缩短产品研制周期和费用。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60572163)

## 2 基于磁流变液的多环形槽式减振器

### 2.1 磁流变液的流变机理

磁流变液是由在磁场中可极化的软磁性粒子、母液和稳定剂三部分组成。当在无磁场作用时，磁流变体为牛顿流体，如图 1(a)所示；当有磁场作用时，磁流变体可在几毫秒内变为粘塑性体，如图 1(b)所示。产生磁流变效应后的磁流变液在外力作用下可分为三个阶段，即屈服前区、屈服区和屈服后区。本文所用的磁流变液是北京钢铁研究总院功能材料研究所研制，该磁流变液性能比较稳定，剪切强度高，初始粘度适中等优点<sup>[4]</sup>。

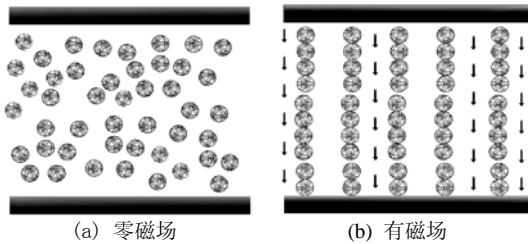


Figure 1. Granulometric distribution of MRF  
图 1. MRF 颗粒随机分布

### 2.2 磁流变减振器结构

磁流变减振器是基于磁流变液在磁场作用下其阻尼力可控的一种新型减振器<sup>[5]</sup>，其工作原理是利用线圈产生的磁场来控制磁流变液在阻尼通道中的流动特性，从而改变阻尼器上下腔之间的压力差，实现阻尼力控制。

本文采用自行设计的基于磁流变液多环形槽时双出杆减振器的结构如图 2 所示。多环槽式磁流变减振器的活塞上开有若干个矩形齿状环形槽（已申请国家实用新型专利：ZL 2004 2 0085234 2），其结构如图 3 所示。在外加磁场下的磁流变液流经环形通道时，由于环形槽的阻滞作用，减振器的阻尼力随磁流变液粘度的变化会产生较大的变化。导线由中空的活塞杆引出，有良好的磁效应；在运动过程中活塞内部的线圈与活塞相对静止，降低了导线磨损的可能性。双出杆结构有良好的定位效果，保证了减振器的同轴度，能有效降低运动过程中活塞与端盖之间的磨损和防止卡死现象的发生。该减振器内部结构简单，拆装方便。活塞和弹簧便于更换，可以方便的改变缝隙大小和弹

簧的刚度，以便于重复试验和在不同要求下的使用。



Figure 2 MR shock absorber developed independently  
图 2 自行研制的双出杆磁流变减振器

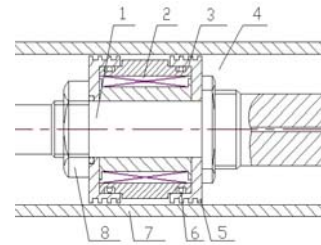


Figure 3 the multiring structure of MR shock absorber  
图 3 多环槽式磁流变减振器的活塞结构  
1 活塞杆 2 线圈 3 活塞 4 磁流变液  
5 环形锯齿 6 密封圈 7 减振器外筒 8 螺母

### 2.3 磁流变减振器的力学模型

根据减振器器的结构和工作原理可知，磁流变液在阻尼器内的运动形式可以分为：压差流动；剪切流动。所以，对减振器的总的阻尼力将由压差阻尼力和剪切阻尼力合成<sup>[6]</sup>。对于压差流动，其阻尼力计算公式为

$$F_p = \frac{12hLA_p^2}{\pi Dh^3} u(t) + \frac{CLA_p}{h} \tau_y \operatorname{sgn}[u(t)] \quad (1)$$

对于剪切流动，其阻尼力计算公式为

$$F_s = \pi DL \tau_y + \frac{\pi DL \mu}{h} u(t) \quad (2)$$

将（1）式和（2）式叠加得出：

$$F(v, I) = \left( \frac{12\eta LA_p^2}{\pi Dh^3} + \frac{L\pi D\eta}{h} \right) u(t) + \left( \frac{CLA_p}{h} + L\pi D \right) \tau_y \operatorname{sgn}[u(t)] \quad (3)$$

其中：

$A_p$  为活塞受到压力的有效面积； $u(t)$  为活塞与缸体的相对流速； $D$  为活塞的直径； $L$  为活塞的长度； $h$  为工作间隙； $\eta$  是流体的动力粘度（磁流变液的零场粘度）； $\tau_y$  为屈服应力； $\tau_y$  和  $\eta$  都与磁流变液的磁感应强度  $B$

有关； $c$ —与结构有关的修正系数，本文选取 $c=3$ 。  
 (3)式是在没有考虑到磁流变液粘滞性的情况下得出的，(4)式为既有滞后环但参数又比双粘性滞后模型少的粘性滞后模型。

$$F = \begin{cases} c_0 u + f_0 & (a) \\ c_0 u - f_0 & (b) \end{cases} \quad (4)$$

其中： $c_0$ 为粘性阻尼系数，与阻尼器的结构及磁流变液动力粘度 $\eta$ 有关； $f_0$ 为屈服力，它与阻尼器的结构及磁流变液屈服应力 $\tau_y$ 有关； $x$ 、 $u$ 和 $a$ 分别为活塞相对于缸筒的位移、速度和加速度<sup>[7]</sup>。

由(3)式、(4)式并由实验拟合曲线得出式(5)

$$F(v, t) = \begin{cases} (218531t^3 - 30475t^2 + 14634t + 380)u(t) + (-319.3381t^3 + 505.01t^2 + 71.4t + 73.748)\text{sgn}[u(t)] & (a) \\ (218531t^3 - 30475t^2 + 14634t + 380)u(t) - (-319.3381t^3 + 505.01t^2 + 71.4t + 73.748)\text{sgn}[u(t)] & (b) \end{cases} \quad (5)$$

其中：(a)  $x > 0, u > -u_1, a < 0$  或  $x < 0, u > -u_1, a > 0$

(b)  $x > 0, u < -u_1, a < 0$  或  $x < 0, u > -u_1, a > 0$

将实验所得图像与应用式(5)拟合所得数据的图像画在一个窗口中。

图4和图5为输入电流1.0A，激励3Hz、2mm时的实验数据与模型拟与实验数据的阻尼力均比较吻合。由此可见，该模型的拟合精度比较高。该模型有一定的通用性。

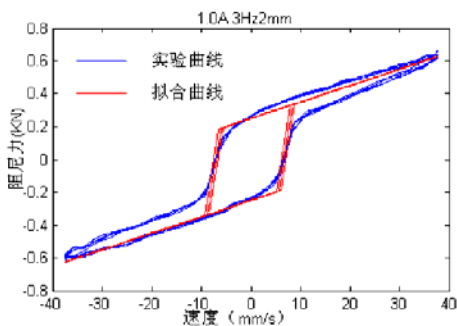


Figure 4 Curve of damping force vs velocity  
 图4 磁流变减振器阻尼力-速度曲线

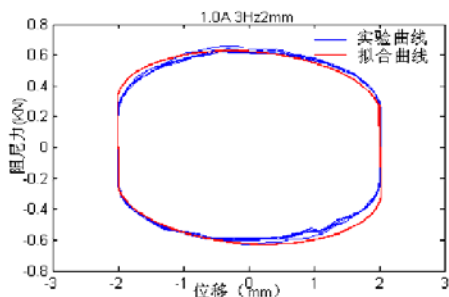


Figure 5 Curve of damping force vs displacement  
 图5 磁流变减振器阻尼力-位移曲线

### 3 基于磁流变的半主动悬架仿真模型

#### 3.1 半主动悬架的虚拟样机

本文应用机械系统多体动力学软件 ADAMS 根据某型车辆的悬架参数(如表 1 所示)建立 1/4 车辆悬架的虚拟样机模型，包括主销(kingpin)，上横臂(UCA)，下横臂(LCA)，拉臂(pull\_arm)，转向拉杆(Tie\_rod)，转向节(Knuckle)，车轮(wheel)及测试平台(Test\_patch)，虚拟样机模型如图 6 所示。建立的 1/4 汽车悬架做如下假设：忽略各运动副摩擦力、内部间隙；运动副均为刚性连接；零部件均为刚性。

Table 1. the parameter of suspension  
 表 1. 车辆悬架参数

名称	参数
车身质量 M1(kg)	330
悬架弹簧刚度 k(N/m)	35000
车轮质量 M2(kg)	25
轮胎刚度 k1(N/m)	170000
车轮前束角(°)	0.2
上横臂在横向平面的倾角(°)	11
主销内倾角(°)	10
下横臂在横向平面的倾角(°)	9.5
下横臂的水平斜置角(°)	10
主销后倾角(°)	25
上横臂的水平斜置角(°)	-5

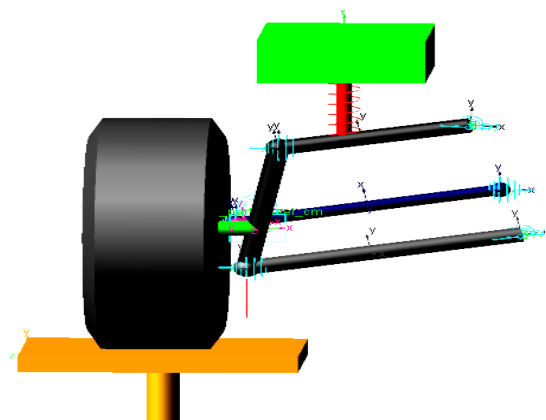


Figure 6 dynamic model of the suspension in ADAMS  
 图 6 ADAMS 中四分之一汽车的悬架模型

#### 3.2 模糊控制系统

控制策略的制定是研究基于磁流变减振器的半主动悬架的关键问题。汽车悬架在实际中是一个复杂的非线性系统,很难建立一个精确的数学模型,因此经典的控制理论很难进行有效地控制。基于专家经验的模糊控制理论具有以下优点:模糊控制器的设计不依赖于被控对象的精确数学模型;模糊控制易于被操作人员接受;便于用计算机软件实现;鲁棒性和适应型好<sup>[8]</sup>。

本文将模糊控制理论应用于磁流变减振器半主动悬架的控制,根据车身的运动和磁流变减振器的工作原理设计了磁流变减振器的模糊控制策略。依据实际控制对象选用二维模糊控制器,以车身(簧载质量)的速度及速度的变化率(加速度)作为模糊控制系统的输入,以控制电流作为输出建立基于磁流变减振器的四分之一汽车悬架的模糊控制系统,其结构如图7所示。分别将模糊控制器的输入取五个语言值(负大,负小,中,正小,正大);输出选五个语言值(较小,小,中,大,较大)。去模糊化采用重心法。在对基于磁流变减振器的汽车悬架的力学分析及参考有关文献的基础上<sup>[9][10]</sup>,通过仿真调试得出模糊控制规则。

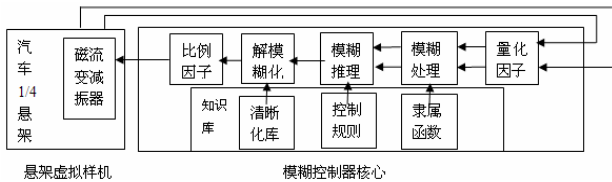


Figure 7 Schematic of fuzzy control system  
图7 模糊控制系统示意图

### 4 联合仿真及结果分析

通过3.1中建立的半主动悬架的虚拟样机模型和3.2中建立的磁流变减振器的控制子系统模型进行联合仿真(如图8所示)。双击ADAMS\_Suspension模块,便可以清楚的看到其内部的具体组成(如图9所示)。

设置激励振幅为10mm,频率为4Hz的正弦波。运行仿真可以得出半主动和被动悬架在相同激励的情况下的响应曲线(如图10和图11所示)。

仿真结果曲线显示,磁流变阻尼器的模糊控制能够较好的完成对磁流变减振器的半主动控制并有较好减震效果。性能明显优于被动式悬架。这对于提高汽车的减振性能和改善行驶平顺性及乘坐的舒适性,减少机械设备疲劳载荷有较大的作用。

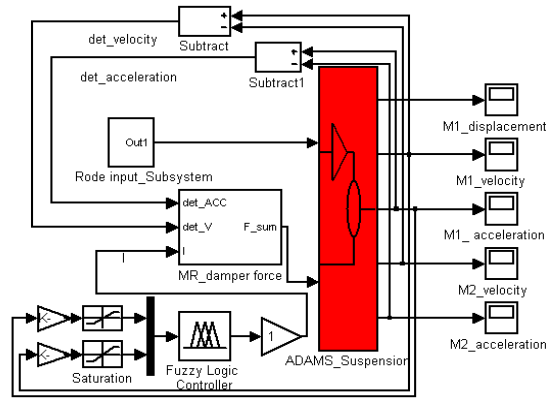


Figure 8 Schematic of co-simulation  
图8 ADAMS与SIMULINK联合仿真框图

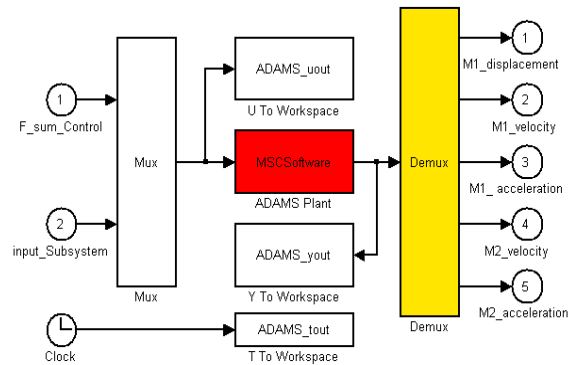


Figure 9 internal structure of ADAMS\_Suspension  
图9 ADAMS\_Suspension模块的内部结构

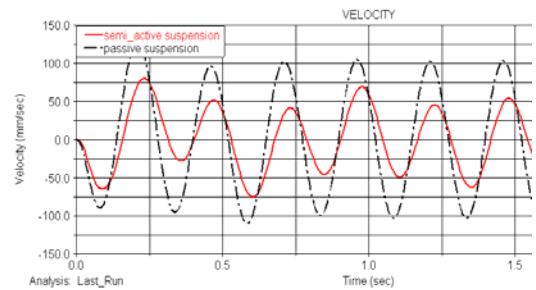


Figure 10 Curve of velocity vs time  
图10 簧载质量的速度随时间变化曲线

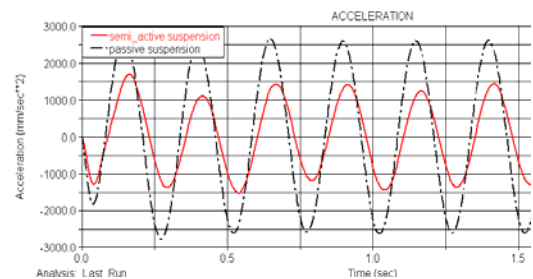


Fig 11 Curve of acceleration vs time  
图11 簧载质量的加速度随时间变化曲线



## 5 结论

根据实验数据拟合所得的阻尼力与控制电流之间的关系,建立了基于多环形槽式结构磁流变阻尼器的四分之一汽车的半主动悬架的虚拟样机模型。在 ADAMS 与 MATLAB/SIMULINK 中完成了动力学模型与模糊控制系统模型的联合仿真。结果表明:半主动控制悬架能够有效的减缓车身振动,提高悬架系统的减振性能并改善乘坐的舒适性。将 ADAMS 虚拟样机技术和 SIMULINK 控制系统的联合仿真技术结合的方法避免了繁琐数学公式的推导,既节约了设计时间又增加了设计的可靠性,对提高半主动悬架减振性能的设计研究有一定的参考价值。

## References (参考文献)

- [1] Tu Fengchen, Chen Zhaobo, Li Hua, Jiao Yinghou, Fang Bo. Research on Passive Isolation Characteristics and Rocket-spacecraft Coupling of a New Whole-spacecraft Isolation Platform[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(3): 538-545(Ch).  
涂奉臣, 陈照波, 李华, 焦映厚, 方勃. 新型整星隔振平台的被动隔振性能及星箭耦合特性分析[J]. *航空学报*, 2010, 31(3): 538-545.
- [2] Wang Anliu, Nie Hong, Chen Jinbao. State-jump Semi-active Control of Lunar Lander Soft Landing [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(11): 2218-2223(Ch).  
汪岸柳, 聂宏, 陈金宝. 月球着陆器软着陆状态跳跃半主动控制[J]. *航空学报*, 2009, 30(11): 2218-2223.
- [3] LU Jia, ZHANG Deng-you, YANG Bai-lian, DUAN Ning, TAN He-ping. Mechanical design and experimental study on magnetorheological fluid dampers [J]. *Journal of Functional Materials*, 2009, 40(5): 742-744(Ch).  
鲁嘉, 张登友, 杨百炼, 段宁, 谭和平. 磁流变阻尼器的力学设计及试验研究 [J]. *功能材料*, 2009, 40(5): 742-744.
- [4] Xiao-min Dong, Miao Yu, Chang-rong Liao, Wei-min Chen. Comparative research on semi-active control strategies for magneto-rheological suspension[J]. *Nonlinear Dyn*, 2010, 59:433-453
- [5] Tran Hai NAM, Kyoung Kwan AHN. New approach to designing an MR brake using a small steel roller and MR fluid[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, 23:1911-1923
- [6] Grum T. Ngatu, Wei Hu, Norman M. Wereley. Adaptive Snubber-Type Magnetorheological Fluid-Elastomeric Helicopter Lag Damper [J]. *AIAA Journal*, 2010 48 (3) :600-609
- [7] XU Jianhai. Research of two-way pusher-over bar MRF absorber and damping system[D]. Tianjin: Civil Aviation University Of China, 2008(Ch).  
薛建海. 双出杆磁流变减震器及减震系统研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2008.
- [8] Wei Hu, Norman M. Wereley. Semi-Active Linear Stroke Magnetorheological Fluid-Elastic Helicopter Lag Damper[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2007, 30(2):565-575.
- [9] WANG Qiming. The study of SASS with MR damper control simulation & experiment[D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2009(Ch).  
王祺明. 磁流变减振器半主动悬架控制仿真及试验研究 [D]. 安徽: 合肥工业大学, 2009.
- [10] JiaYuhong, Wu Xiaojuan. Fuzzy control of landing gear based on MR damper[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(11):1264-126(Ch).  
贾玉红, 武晓娟. 基于磁流变缓冲器的飞机起落架模糊控制[J]. *北京航空航天大学学报*, 2007, 33(11):1264-126