

# 磁流变阻尼器驱动的智能车辆悬挂控制及实验

王恩荣<sup>1</sup>, 汪自虎<sup>2</sup>, 苏春翌<sup>3</sup>, Rakheja Subhash<sup>3</sup>

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042; 2 江苏南京供电公司, 江苏 南京 210037

3 康考迪亚大学 机械与工业工程系, 蒙特利尔 加拿大 H3G 1M8)

**[摘要]** 针对由新型的磁流变阻尼器驱动的智能车辆悬挂设计要求, 提出了一种基于天棚阻尼律实现不对称阻尼特性的半主动控制方案, 能有效地抑制驱动电流的 开-关 冲击特性和磁流变阻尼器滞环特性产生的不良影响. 将该控制器与四分之一车辆模型相结合, 在变幅度谐波、平滑脉冲和随机信号激励下, 对该半主动控制器的性能进行了仿真分析, 并通过设计的硬件在环测试系统进行了系统的实验研究. 结果验证了所提出的智能车辆悬挂设计能理想地实现车辆驾乘舒适性、与路面可靠接触、悬挂空间等多目标悬挂性能, 以及对簧载质量变化的鲁棒特性.

**[关键词]** 磁流变阻尼器, 半主动控制, 车辆悬挂, 硬件在环仿真测试

**[中图分类号]** TH703.62 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2007)01-0001-07

## Control and Experimental Validation of Intelligent Vehicle Suspension With Magneto-rheological Dampers

Wang Enrong<sup>1</sup>, Wang Zhi<sup>2</sup>, Su Chunyi<sup>3</sup>, Rakheja Subhash<sup>3</sup>

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China

2. Jiangsu Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210037, China

3. Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, Montreal H3G 1M8, Canada)

**Abstract** A modified skyhook-based semi-active controller is proposed for implementing an asymmetric control suspension design with symmetric MR dampers. The controller has potential to effectively minimize the switching and hysteretic effects from the semi-active control and the MR-damper. The proposed controller is constructed with the quarter-vehicle MR-suspension model and its relative response characteristics are thus evaluated in terms of defined performance measures under varying amplitude harmonic, rounded pulse and random excitations. The sensitivity of the semi-active suspension performance to variations in controller parameters is further evaluated. The results illustrate that the proposed skyhook-based asymmetric semi-active MR-suspension has superior robustness on the controller parameter variations and can achieve desirable multi-body suspension performances.

**Key words** magneto-rheological (MR) fluids damper; semi-active control; vehicle suspension; hardware-in-the-loop test

## 0 引言

车辆悬挂系统主要分为传统的被动悬挂和智能悬挂两种类型. 半主动可控的磁流变 (MR) 阻尼器已广泛地用于智能车辆悬挂设计的研究, 目前已提出了若干半主动控制方法用以改善车辆悬挂减振性能<sup>[1-2]</sup>. 但是, 已发表的控制方法还没有涉及下面几个难点问题: 对称 MR 阻尼器的不对称运行方式、电流不连续特性引起的瞬时冲击和 MR 阻尼器的滞环影响. 产生上述 3 个问题的原因是: (1) 目前研发的 MR 阻尼器大多数是产生对称的压缩和延伸阻尼特性, 需要产生不对称的力-速度阻尼特性来改善车轮与路面可靠接触和驾乘舒适悬挂性能; (2) 对于 MR 阻尼器的半主动控制, 控制电流存在不连续的 开-关 特

收稿日期: 2006-09-25

基金项目: 江苏省 六大人才高峰 (苏机联[2006]026) 资助项目.

作者简介: 王恩荣 (1962-), 教授, 博士, 主要从事电气自动化等方面的教学与研究. E-mail: ewang@njnu.edu.cn

性,这在动态响应中会产生严重的瞬时冲击,从而影响系统硬件的可靠性和控制特性; (3)MR 阻尼器在屈服前后阶段表现出很强的滞环和力饱和非线性特性,该非线性特性会引起系统的 颤动 震荡,从而影响系统的稳定性与性能<sup>[3]</sup>. 此外,已发表的研究成果很少进行实验验证研究,硬件在环(HIL)测试和仿真技术可提供与整个系统相连的器件层面的实验评价<sup>[4]</sup>.

本文提出了一种基于改进型天棚阻尼律的半主动控制器,用于对称 MR 阻尼器来实现不对称阻尼控制的智能车辆悬挂设计. 该控制器用带有指数律的电流形式来描述,并由连续调制(CM)和不对称阻尼力产生(ADFG)函数加以调制,能有效地抑制控制电流开-关的不连续性和由对称型 MR 阻尼器产生压缩与延伸不对称的阻尼特性. 将所提出的控制器与四分之一 MR 车辆悬挂模型相结合,在变幅度谐波、平滑阶跃和随机信号激励下,对系统的驾乘舒适性、与路面可靠接触、悬挂空间等多目标悬挂性能进行了仿真评价. 为验证所提出的控制器设计的有效性,在实验室研发了一套 HIL 测试平台,在变幅度谐波、平滑阶跃和随机信号激励下,对带有对称(SCM)和不对称(ACM)半主动控制器的四分之一 MR 车辆模型进行了系统的实验验证研究<sup>[3]</sup>.

1 四分之一 MR 车辆悬挂模型的描述

对于 MR 悬挂控制研究,对有效的 MR 阻尼器和 MR 车辆悬挂动力学模型是十分重要的. 本文提出的 MR 车辆悬挂模型,由四分之一车辆模型和作者所提出的 MR 阻尼器通用滞环模型组成<sup>[5]</sup>. 2-自由度的四分之一车辆模型,由图 1 所示. 图中车厢,车轮及相关组成部分由簧载质量( $m_s$ ) 和非簧载质量( $m_u$ ) 来分别表示; 轮胎由线性弹性系数( $k_t$ ) 和阻尼系数( $c_t$ ) 来描述;  $k_s$  表示悬挂弹簧的弹性系数. 典型重型车辆的四分之一车辆模型参数为:  $m_s = 562.5 \text{ kg}$ ,  $m_u = 90 \text{ kg}$ ,  $k_s = 57 \text{ kN/m}$ ,  $k_t = 285 \text{ kN/m}$ ,  $c_t = 100 \text{ N/s/m}$ . 簧载和非簧载质量的静态偏移量分别估算为:  $x_s = m_s g / k_s = 0.0967 \text{ m}$ ;  $x_u = (m_s + m_u) g / k_t = 0.0224 \text{ m}$ . 无阻尼固有频率分别估算为:  $f_{n-s} = 1.46 \text{ Hz}$  和  $f_{n-u} = 9.8 \text{ Hz}$ . 车辆模型的动力学方程表示为<sup>[3]</sup>:

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + F_k + F_d - m_s g = 0 \\ m_u \ddot{x}_u + F_T - F_k - F_d - (m_s + m_u)g = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x_s$  和  $x_u$  分别表示簧载和非簧载质量的位移;  $F_k = k_s(x_s - x_u + x_s)$  表示悬挂弹簧所产生的恢复力;  $F_T$  表示轮胎产生的力  $X$ , 即:

$$F_T = \begin{cases} k_t(x_u + x_u - x_i) + c_t(x_u - x_i) & x_u + x_u - x_i > 0 \\ 0 & x_u + x_u - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $x_i$  表示轮胎与路面接触的激励位移.

在 (1) 式中,  $F_d$  通常表示由 MR 阻尼器产生的阻尼力, 作者提出了一种基于对称 MR 阻尼器的通用滞环特性的  $F-v$  解析模型. 该模型描述了阻尼力的变化与驱动电流、活塞的位移和速率, 以及激励的特性(幅值和频率)之间的函数关系. 非线性控制特性的电流与阻尼力之间的关系由基于不对称 Sigmoid 函数的非线性增益  $C_i(i_d)$  来表示. 而被动( $i_d = 0$ )滞环算子力  $F_h(v_r)$  由对称的 Sigmoid 函数来描述. 作者提出的 MR 阻尼器解析模型为<sup>[5]</sup>:

$$F_d(i_d, v_r) = C_i(i_d)F_h(v_r), \quad (3)$$

$$C_i(i_d) = 1 + \frac{k_2}{1 + e^{-a_2(i_d + I_0)}} - \frac{k_2}{1 + e^{-a_2 I_0}} \quad C_i(i_d) \leq 1 \quad (4)$$

$$F_h(v_r) = F_0 \left(1 + e^{a_1 v_m}\right) \frac{1 - e^{-\frac{(v_r + v_h)}{v_m}}}{1 + e^{-\frac{(v_r + v_h)}{v_m}}} (1 + k_v |v_r|). \quad (5)$$

其中,  $c_e$ 、 $v_h$ 、 $k_v$  分别是模型参数对于  $v_m$  的函数,  $v_m$  表示阻尼器的峰值速度. 模型参数函数的关系如下:

$$c_e = 1 + e^{a_1 v_m}, \quad v_m = \sqrt{(x_r)^2 - x_{r_s}} = a_0 / (1 + k_0 v_m),$$

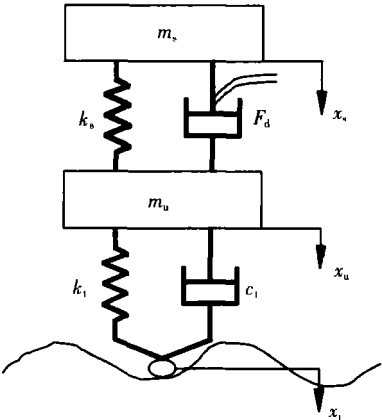


图 1 2-自由度四分之一 MR 车辆悬挂模型  
Fig.1 Schematic diagram of 2-DOF quarter-vehicle MR-suspension

$$k_v = k_1 e^{-a_d x}, \quad v_h = \operatorname{sgn}(x) k_4 v_m \left[ 1 + \frac{k_3}{1 + e^{-a_3(i_d + I_1)}} - \frac{k_3}{1 + e^{-a_3 I_1}} \right].$$

本研究使用了一种 MR 阻尼器样品<sup>[3]</sup>. 该阻尼器在 12 V 工作电压下允许的最大控制电流为 0.5 A. 通过在大范围的控制电流 ( $i_d = 0.0 \sim 0.4$  A)、谐波激励频率 ( $f = 0.1 \sim 15$  Hz) 和激励振幅 ( $a_m = 2.5 \sim 75$  mm) 下进行实验测试, 并根据所测数据对模型参数进行辨识, 得到:  $a_0 = 992.9845$ ,  $a_1 = 5.1968$ ,  $a_2 = 7.2575$ ,  $a_3 = 6.6345$ ,  $a_4 = 7.5039$ ,  $I_0 = 0.0788$ ,  $I_1 = 0.2670$ ,  $k_0 = 125.9870$ ,  $k_1 = 11.2001$ ,  $k_2 = 9.2443$ ,  $k_3 = 9.1856$ ,  $k_4 = -0.1192$ ,  $F_0 = 68.5056$ . 图 2 表示了在 12.5 mm、1.5 Hz 的谐波激励和不同控制电流 (0.0 ~ 0.4 A) 下, 以及 0.2 A 控制电流和 12.5 mm、0.5 ~ 15 Hz 谐波激励下, 该 MR 阻尼器  $F-v$  特性模型计算结果与测量结果的比较. 结果表明所提出模型在很宽的工作条件下能准确地描述 MR 阻尼器的特性.

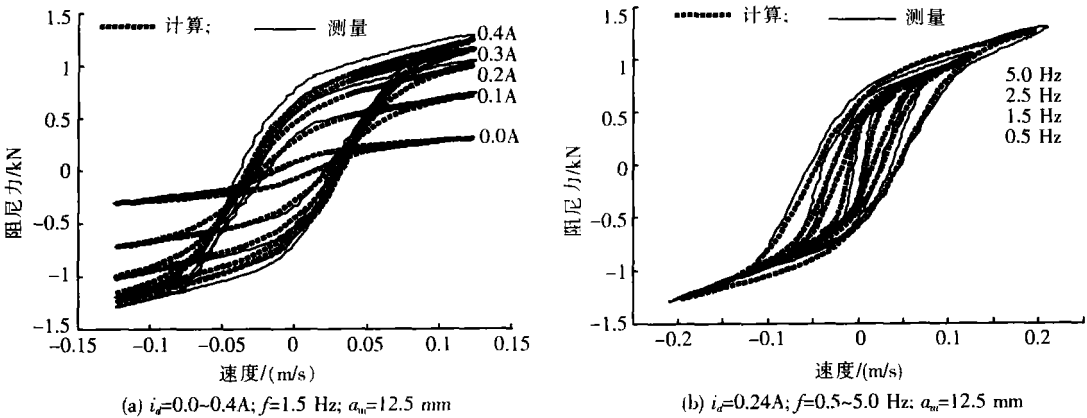


图 2  $F-v$  特性的模型计算与测量结果的比较  
Fig.2 Result comparisons of calculated and measured  $F-v$  characteristics

## 2 基于改进型天棚阻尼律的半主动控制器设计

最初的天棚阻尼律由 Kamopp 等提出<sup>[6]</sup>. 该控制策略表明: 当簧载质量的速度 ( $x_s$ ) 与阻尼器相对速度相位不一致时, 簧载质量的加速度可以通过减小阻尼力来降低. 天棚阻尼控制策略可表示为:

$$F_d = \begin{cases} c_s x_s & \text{如果 } x_s(x_s - x_u) > 0 \\ 0 & \text{如果 } x_s(x_s - x_u) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中  $c_s$  是较大数值的阻尼系数.

天棚阻尼控制策略在改善车辆多目标悬挂性能控制方面有非常大的潜力. 但由于下面 4 个方面的原因, 该控制策略不能直接应用于 MR 悬挂控制: (1) 产生的阻尼力存在不连续特性; (2) 忽略了  $v_s v_r = 0$  的控制状态; (3) 受到对称控制模式的限制; (4) 忽略了滞环特性的影响. 为克服这些缺陷, 本文提出了基于改进型天棚阻尼律的半主动控制方案, 表示为电流形式:

$$i_z(z_c) = k_c |x_s|^n; \quad z_c = -x_s x_u \quad (7)$$

式中,  $i_z$  是控制电流, 驱动电流  $i_d$  由控制电流通过 CM、ADFG 和条件函数  $z_c$  产生.

对于对称控制模式, 控制电流直接作为驱动电流 ( $i_d = i_z$ ), 但在  $z_c = 0$  附近将产生不连续性, 并导致悬挂性能响应的瞬时冲击. 不对称控制模式的连续驱动电流的控制可通过  $M_p$  乘积函数来实现, 可以有效地抑制由  $i_z$  突变引起的暂态振荡<sup>[7]</sup>. 此外, 除了  $i_z$  的变化, 还可有效地抑制控制器中条件函数的不连续性, 引起系统响应的暂态振荡. 应用类似于 ADFG 的算法函数, 式 (9) 表示的连续调制函数 (CM) 可实现对条件函数的连续控制<sup>[8]</sup>.

$$M_p(p, v_r) = \frac{1+p}{2} + \frac{2}{\pi} \left[ p(v_r > 0) - (v_r < 0) - \frac{1+p}{2} \right] \left| \tan^{-1} \left( \frac{v_r}{v_m} \right) \right|, \quad (8)$$

$$M_c(p_c, z_c) = \frac{1+p_c}{2} + \frac{2}{\pi} \left[ p_c(z_c > 0) - (z_c < 0) - \frac{1+p_c}{2} \right] \left| \tan^{-1} (z_c) \right|. \quad (9)$$

在上述的表达式中,  $p_c$  选 0 可实现最小的驱动电流 ( $i_d = 0$ ), 而当条件函数  $z_c$  为负值时产生较大的控制电流. 电流的对称与不对称控制模式可分别选  $p = 1$  和  $p = 0$  来实现.  $\zeta_c$  和  $\gamma_c$  分别是消除瞬时冲击的平滑参数. 选较大的指数值 ( $n = 2$ ) 可进一步抑制在  $z_c = 0$  时的不连续影响, 并可有效地拓宽阻尼力的频带. 图 3 表示了控制电流  $i_c$  变化的一个例子. 控制电流由 开-关 控制策略与 CM 函数调制  $M_c$  结合产生, 其中条件函数按照谐波方式变化<sup>[58]</sup>. 结果表示了不对称因子  $p_c$  和平滑因子  $\zeta_c$  的作用. 较小的  $\zeta_c$  值可使  $i_c$  更加平滑, 但会导致控制电流产生大的误差.  $p_c = 0$  使控制电流在极限的范围  $0 \sim i_z$  之间变化, 而较大的  $p_c$  值可实现控制电流的高-低调制. 对于 开-关 型半主动控制,  $\zeta_c$  取较大值和  $p_c$  取 0 是比较理想的. 驱动电流  $i_d$  可以通过 ADFG 和 CM 函数与  $i_c$  相乘获得.

$$i_d = M_p(p_c, v_r)M_c(0, z_c)i_c, \quad 0 \leq i_d \leq i_z. \tag{10}$$

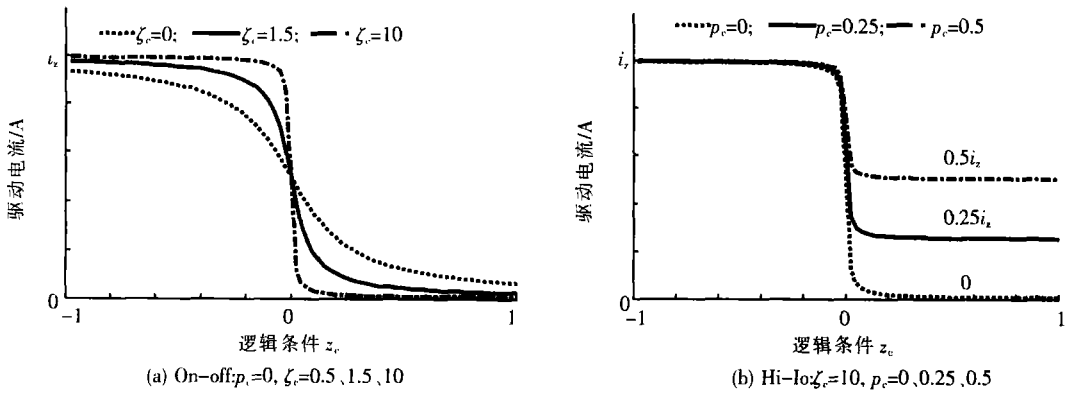


图 3 “开-关”或“高-低”控制策略下平滑和不对称因子对控制电流连续变化的影响  
Fig.3 Continuous variations in the controller current of on-off or hi-lo control algorithm and the effects of smoothing and asymmetry factors

3 HIL测试系统

HIL 仿真技术可通过相对小功率的液压激振器来提供一种真实的和可重复的测试环境<sup>[4]</sup>. 本研究中设计的 HIL 测试平台原理框图如图 4 所示. 该平台包含 3 类主要器件: (1) 阻尼器硬件; (2) 四分之一车辆仿真模型; (3) 硬件和仿真模型间的接口电路. 所使用的 MR 阻尼器安装在自伺服液压激振器上, 其顶端安装在惯性框架上, 并通过一种力传感器 (容量是 8.8 kN) 来测量阻尼力. 不包含 MR 阻尼器的四分之一车辆仿真模型建立在 Matlab-simulink 环境中, 力传感器实时测量出由阻尼器硬件根据瞬时速度和激励电流产生的阻尼力响应. 该阻尼力通过 A/D 转换器形成闭环施加到车辆模型的簧载和非簧载质量上, 用以分析整个带有 MR 阻尼器的四分之一车辆模型. 接口部件包含自伺服控制器来产生理想的激振器运动, A/D 和 D/A 转换产生驱动电路所需要的电压以获得 MR 阻尼器的激励电流, 测量数据通过 Dynamic Data Exchange 同步下载到 Excel 工作簿. 此外, 还设计了一个实时监控器对 HIL 平台中四分之一车辆系统的响应进行评价和监控, 并可以选择所需的激励信号、控制器和输出显示. 图 5 表示了一个设计监控器的例子, 包含 3 部分内容: (1) 控制器选择; (2) 激励信号选择; (3) 有关的控制开关. 控制器选择可灵活选用不同的控制律, 可实现 3 种控制方法: 被动阻尼 ( $i_d = 0$ )、恒定控制电流阻尼 ( $i_d = 0$ ) 和基于天棚律的半主动控制阻尼. 激励信号选择允许选择带参数的不同激励信号  $x_i(t)$ : 实验开始和结束时的零激励输入 ( $x_i = 0$ )、谐波激励 (频率和幅度)、瞬时冲击激励和随机路面激励. 有关的控制开关允许选择不对称率因子 ( $p$ ) 以实现对称和不对称阻尼模式的切换 (SCM 或 ACM)、簧载质量 ( $m_s$ ) 以改变车辆负载、对于基于天棚阻尼律半主动控制器的增益 ( $k_c$ ).

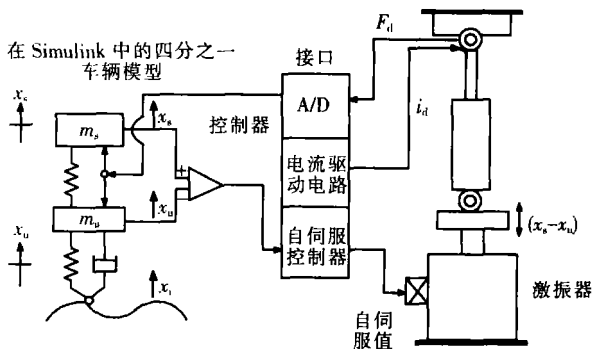


图 4 HiL 测试平台原理框图  
Fig.4 Schematic diagram of the HiL test platform

监控器显示了所选择悬挂性能的动力学响应和测量, 包括: 测量和计算的驱动电流 ( $i_{dm}$ ,  $i_d$ ) 和阻尼 ( $F_{dm}$ ,  $F_d$ )、测量的轮胎动力 ( $F_t$ )、簧载和非簧载质量的位移和加速度响应 ( $x_s$ ,  $a_s$ ,  $x_b$ ,  $a_b$ )、悬挂相对位移 ( $x_r$ )、路面激励信号的位移和加速度 ( $x_s$ ,  $a_s$ )。悬架性能包括: 簧载和非簧载质量的位移和加速度响应的传输率 ( $T_{ds}$ ,  $T_{as}$ ,  $T_{db}$ ,  $T_{ab}$ )、悬挂空间传输率 ( $T_{dr}$ ) 和与轮胎动力有关的动态负荷系数 (DLC)。在进行实验前, 需将液压驱动器复位到其理想的平衡位置, 将力信号清零, 将驱动电流定为零以防止偶然的损坏。平衡位置选择当阻尼器在压缩状态下的中间位置, 再将仿真模型加载, 对自伺服控制器进行设置和启动。此外, 在 MR 阻尼力上并联一个附加的小粘滞阻尼以消除在系统启动时的瞬时噪音, 该粘滞阻尼在系统启动后及时撤除<sup>[3]</sup>。

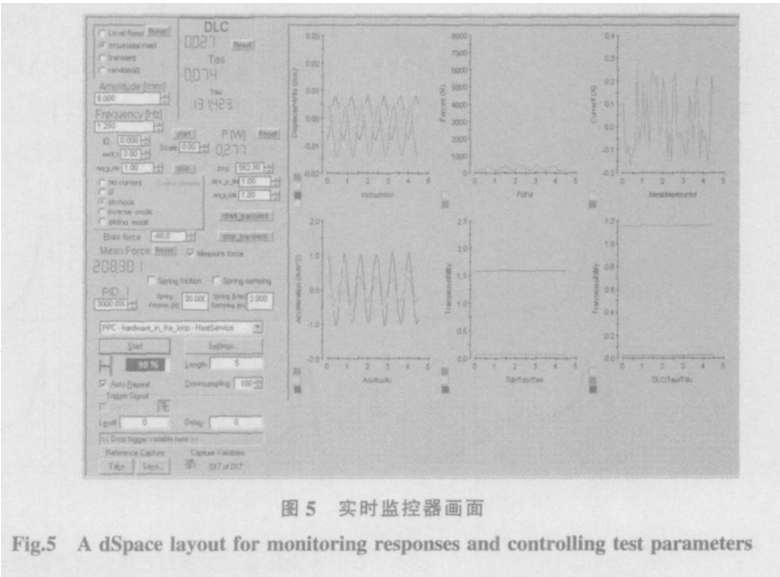


图 5 实时监控器画面  
Fig.5 A dSpace layout for monitoring responses and controlling test parameters

4 实验验证结果

实验重点验证所提出的 SCM 和 ACM 半主动 MR 阻尼悬挂系统在确定性和随机路面信号激励下的有效性, 以及研究簧载质量的变化对阻尼力和悬挂系统响应的影响。标称簧载质量选为 563 kg 变化的簧载质量选为 703 kg 将两者测试结果进行比较。控制器参数选择为:  $n = 2$   $k_c = 3$   $p_c = 0$   $c = 10$   $\gamma = 4$   $\delta = 5$   $p = 1$  (SCM) 和  $p = 0$  (ACM)。实验在 Simulink 中的变幅度谐波、平滑脉冲和随机信号激励下进行。

4.1 谐波激励响应

实验首先在 1.5 Hz 和幅度为 2 cm 谐波位移信号激励下进行, 以研究基于天棚阻尼半主动 MR 阻尼悬挂系统的簧载质量共振抑制性能, 再测试在不同离散频率谐波 (0.75, 1, 1.25, 1.75, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 Hz) 激励下的频率响应特性, 选用标称簧载质量 563 kg 图 6(a) 和图 6(b) 分别表示了 SCM 和 ACM 半主动 MR 阻尼悬挂系统在 1.5 Hz 和幅度为 2 cm 谐波位移信号激励下实测与模型计算结果的比较, 具有很好的一致性。ACM 控制模式在阻尼器延伸状态较之压缩状态将产生较大的阻尼力, 有助于改善车轮与路面可靠接触的悬挂性能。结果说明所设计的半主动 MR 阻尼悬挂系统很好地抑制了簧载质量的共振, 且 MR 阻尼器的滞环、力饱和和非线性特性也得到了很好的补偿, 所使用的连续 (CM) 和不对称阻尼力产生 (ADFG) 函数有效地抑制了驱动电流的开关冲击。

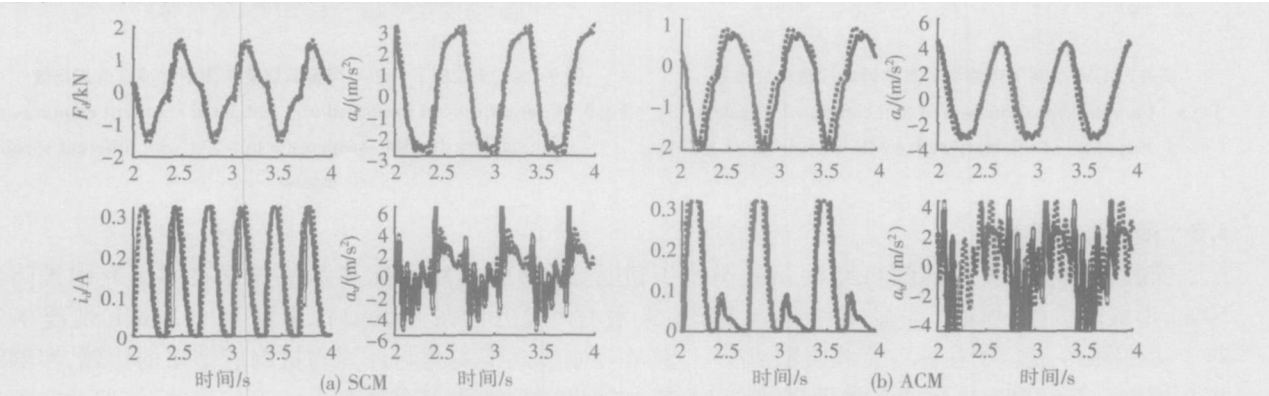
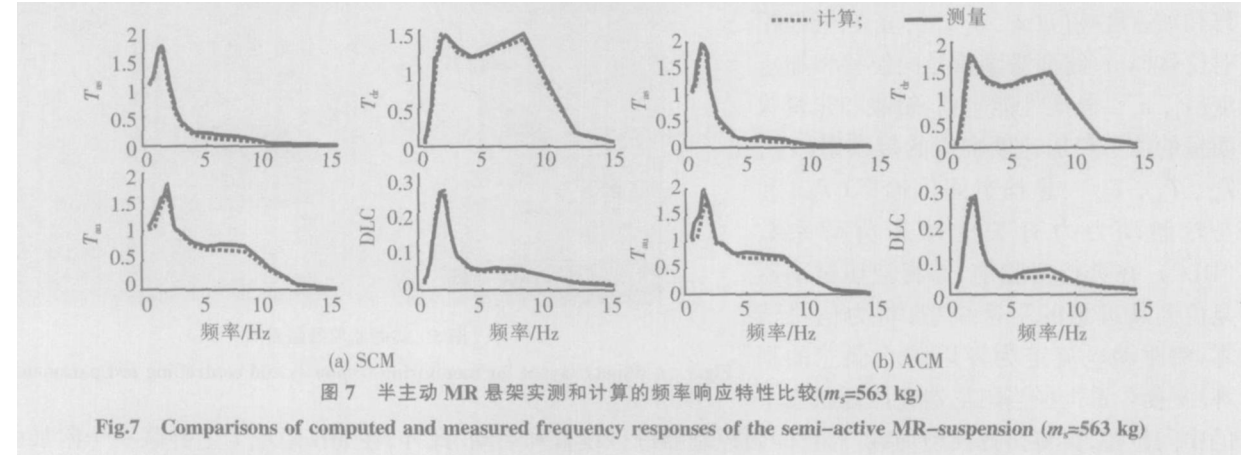


图 6 半主动 MR 悬挂实测和计算的谐波响应特性比较 ( $m_s=563$  kg)  
Fig.6 Comparisons of computed and measured responses of the semi-active MR-suspension ( $m_s=563$  kg)

图 7(a) 和 (b) 分别示出了 SCM 和 ACM 半主动 MR 阻尼悬挂系统实测与计算频率响应结果的比较, 使用了变幅度谐波激励信号, 在低频  $f < f_r$  时产生恒定幅度激励信号, 在高频  $f > f_r$  时产生恒定加速度激励

信号,  $f_r$  选为 2 1 Hz 结果表明 ACM 控制在高于簧载质量自然频率处产生较小的 DLC 和  $T_{as}$  幅值, 但会导致  $T_{as}$  和  $T_{dr}$  的数值在簧载质量自然频率附近有所上升, 说明 ACM 控制可通过限制高频段的非簧载加速度和轮胎动力力的变化来提高车轮与路面可靠接触的悬挂性能, 但要牺牲一小部分簧载共振抑制悬挂性能. 无论是对称还是不对称控制模式, 实测数据与模型计算结果均有很好的 consistency.



4 2 平滑脉冲激励响应

半主动 MR 阻尼悬挂系统的瞬时冲击响应特性的实验验证在平滑脉冲信号激励下进行. 平滑脉冲信号由  $x_i = 0.25a_m e^{-(t-t_0)^2/\tau^2}$  产生<sup>[9]</sup>. 其中,  $a_m$  是平滑脉冲信号的峰值;  $\omega_0$  是基波频率;  $\tau$  是脉冲刚度参数, 选为  $\tau = 3$ ,  $\omega_0 = 10.4$  rad/s 和  $a_m = 2$  cm. 由于在瞬时冲击信号激励下, 系统会遇到偶然的高速, 因此最大控制电流限制在  $i_d = 0.05$  A, 以确保阻尼器和系统的安全性. 图 7 表示了标称簧载质量情况下, SCM 控制模式下实测与计算频率响应结果的比较, 实测结果与模型计算结果有一致的趋势, 但在冲击响应峰值上有较大的差别, 实测冲击响应峰值的减小是由于自伺服控制器的带宽有限. 图 8 进一步表示了所设计 ACM 半主动 MR 阻尼悬挂系统, 在簧载质量为 563 kg 和 703 kg 情况下实测瞬时冲击响应结果的比较, 结果表明所设计的 ACM 半主动 MR 阻尼悬挂设计对车辆负载的变化具有很好的鲁棒特性.

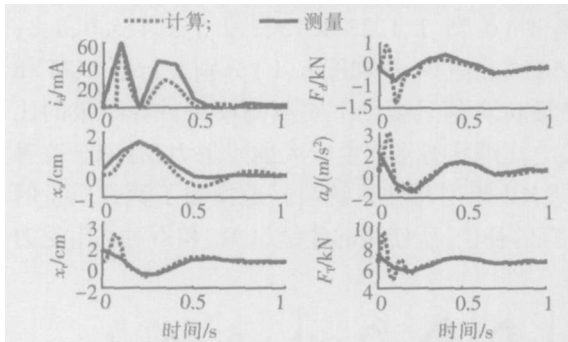


图 8 SCM 控制下实测和计算的瞬时冲击响应比较  
Fig.8 Comparisons of measured and computed transient responses of the semi-active MR-suspension in SCM

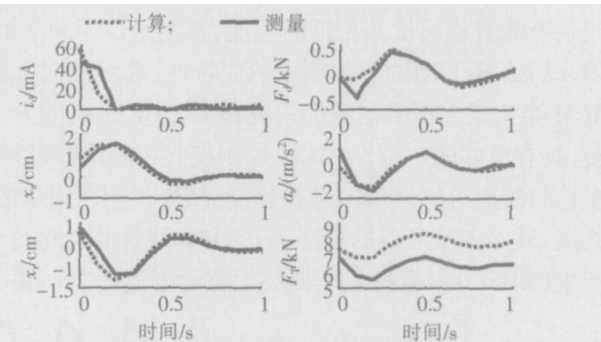


图 9 ACM 控制下对于不同簧载质量实测瞬时冲击响应比较  
Fig.9 Comparisons of measured and computed transient responses of the semi-active MR-suspension in ACM with different sprung masses

4 3 随机激励响应

实验进一步在实测的随机路面信号激励下进行, 所测的粗路面标高随机数据在本研究中被降低 50%, 形成随机激励输入信号文件存到 Simulink 程序中, 仿真在假设前行车速为 50 km/h 情况下进行<sup>[11][2]</sup>. 图 10 表示了标称簧载质量情况下, SCM 控制模式下实测与计算随机响应结果的比较, 实测结果与模型计算结果有一致的趋势, 但在低频时, 在加速度响应结果上明显存在较大的偏差, 该偏差在被动 MR 悬挂系统响应中也明显能看到, 这是由于低频时加速度的干扰较大的缘故. 图 11 进一步表示了所设计 ACM 半主动 MR 阻尼悬挂系统, 在簧载质量为 563 kg 和 703 kg 情况下实测随机响应结果的比较, 结果进一步验证了所提出的不对称半主动 MR 阻尼悬架设计对车辆负载的变化具有很好的鲁棒特性.

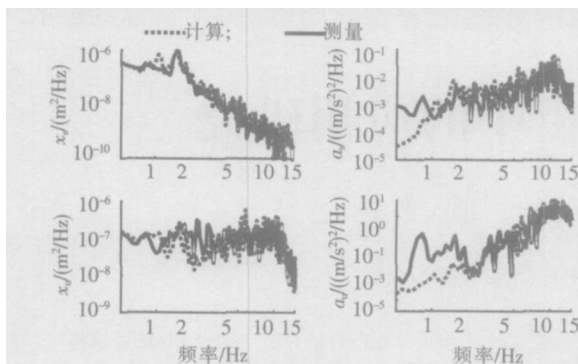


图 10 SCM 控制下实测和计算随机响应比较

Fig.10 Comparisons of measured and computed random responses of the semi-active MR-suspension in SCM

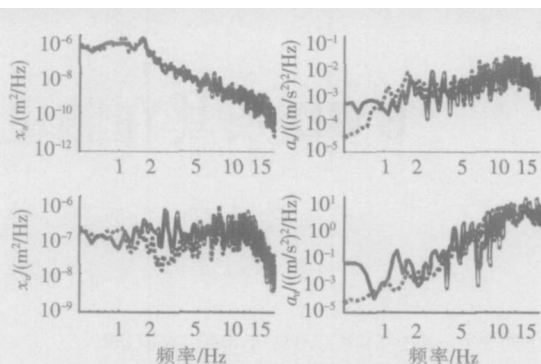


图 11 ACM 控制下对于不同簧载质量实测随机响应比较

Fig.11 Comparisons of measured and computed random responses of the semi-active MR-suspension in ACM

## 5 结论

本文提出了基于天棚阻尼律、可实现对称和不对称半主动控制特性的 MR 智能车辆悬挂设计. 所设计的控制器结合提出的连续调制和不对称阻尼力发生函数, 可有效地抑制电流 开-关 和 MR 阻尼器滞环特性的影响. 不对称控制方式可使对称型 MR 阻尼器工作在不对称阻尼力特性, 以有效地改善车轮与路面可靠接触的悬挂性能. 该控制器的性能通过设计的 HIL 测试平台, 在谐波、平滑脉冲和随机信号激励下进行了全面的实验验证, 实测数据与模型计算结果均有很好的 consistency, 表面所提出的半主动 MR 阻尼悬挂设计可实现驾乘舒适性、与路面可靠接触、悬挂空间等多目标车辆悬挂性能. 实验还针对簧载质量的变化进行了研究, 表面所提出的半主动 MR 阻尼悬挂设计对车辆负载的变化还具有很好的鲁棒特性.

## [参考文献] (References)

- [1] Choi S B, Lee B K, Hong S R, et al. Control and response characteristics of a magneto-rheological fluid damper for passenger vehicle [J]. Smart Structure and Materials 2000 Smart Structures and Integrated System, Proc of SPIE, 2000 3(2): 438-443.
- [2] Guo D L, Hu H Y, Yi J Q. Neural network control for a semi-active vehicle suspension with a magneto-rheological damper [J]. J of Vibration and Control, 2004, 10(3): 461-471.
- [3] Wang E R. Syntheses and analyses of semi-active control algorithms for a magneto-rheological damper for vehicle suspensions [D]. Canada Concordia University, 2005.
- [4] Hwang S, Heo S, Kim H, et al. Vehicle dynamic analysis and evaluation of continuously controlled semi-active suspension using hardware-in-the-loop simulation [J]. Vehicle System Dynamics, 1997, 27(5/6): 423-434.
- [5] Wang E R, Ma X Q, Rakheja S, et al. Modeling hysteretic characteristics of an MR-fluid damper [J]. J of Automobile Engineering, 2003, 217(D7): 537-550.
- [6] Kamopp D C, Crosby M J, Hawood R A. Vibration controlling semi-active generators [J]. J of Engineering for Industries, 1974, 96(B2): 619-626.
- [7] Wang E R, Lu F X, Rakheja S, et al. Skyhook based semi-active control of vehicle suspension with symmetric MR-damper [C] // Proc of the International Conference on Sensing Computing and Automation (ICSCA 2006). ChongQing, 2006 1797-1802.
- [8] Wang E R, Ye B, Liang M, Chen Y S, et al. Research on generation of asymmetric  $F-v$  characteristics from symmetric MR-damper [J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2006, 19(2): 239-244.
- [9] Rakheja S, Sanker S. Vibration and shock isolation performance of a semi-active on-off damper [J]. Transactions of the ASME, J of Vibration Acoustics Reliability in Design, 1985, 107: 398-403.
- [10] Dallen T M. Pavement profiling various pavements. Ottawa/Snith Falls [R]. John Emery Geotechnical Engineering, 1992.

[责任编辑: 刘 健]