

# 新型可控磁流液阻尼器的应用研究

王恩荣<sup>1,2</sup>, Su Chunyi<sup>2</sup>, Rakheja Subhash<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学电气与电子工程学院, 210042, 南京) (2. 肯戈迪亚大学机械与工业工程系, H3G 1M8, 加拿大)

[摘要] 可控磁流液(MR)阻尼器具有半主动控制、快恢复、体积小、输入功率低、易安装、安全、可靠、静音、商品化等优点,是近年来国际工程振动抑制领域广泛研究的热点问题,可望取代普通的无源液压阻尼器,成为新一代工程振动抑制阻尼器件,对工程结构性系统减振性能提高带来革命性的突破. 论文重点介绍该智能驱动器件的基本工作原理和主要的性能特点,以及描述其阻尼力对相对速度( $f-v$ )工作特性的滞环非线性模型,并结合路面汽车的性能要求,对该类滞环非线性系统的控制问题提出了若干研究方向,有助于加速该新智能驱动器件在实际工程系统中的应用研究.

[关键词] 磁流液阻尼器, 振动抑制, 滞环非线性模型, 非线性控制

[中图分类号] TH703.62, [文献标识码] A, [文章编号] 1672-1292-(2003)02-0035-06

## 0 引言

迄今为止,普通的液压式阻尼器件一直广泛地应用于各种需要抑制振动的工程结构系统,但由于该器件是无源的且不可控,对应用系统性能的进一步提高带来了限制.为此,从上个世纪50年代起,工程科学家们就一直致力于开发研制能代替普通液压式阻尼器件的新一代可控阻尼器件.人们发现,利用磁场和电场的可控制特性可以改变特殊液体的流变特性,这就是著名的由Rabinow<sup>[1]</sup>和Winslow<sup>[2]</sup>几乎同期首次提出的可控磁流液(MR)和可控电流液(ER)概念,它们都是含有微米数量级可极化颗粒的非胶状特殊液体,对可控电流液及其器件的研究在较长时间内远胜于对磁流液及其器件的研究<sup>[3,4]</sup>.此外,人们还着力开发研制用于汽车工业的能实现完全主动和半主动控制的新型可控液压阻尼器件<sup>[5,6]</sup>,其基本思想是基于改造普通的液压阻尼器结构实现阀调节控制.经过数十年来的研究,尽管在对ER和可控液压阻尼器件的研究方面已取得了重大进展,但是发现这两种器件在实际工程应用中均存在致命的弱点:ER阻尼器件需要能产生3~5MV/m电场的外部强控制电压;而可控液压阻尼器件结构复杂、体积庞大,且需要正常难以承受的高额成本.因此,目前对两种器件的进一步研究已基本处于停滞状态.

近几年来磁流液及其器件的研究方面已经取得了突破性进展<sup>[7]</sup>.由美国Lord公司率先推出了系列化MR阻尼器件商业化产品,从而掀起了对MR阻尼器件性能及控制应用的研究热潮.该器件具有半主动控制、快恢复、体积小、输入功率低、易于工程安装、安全可靠、噪声低、性价比高等优点,可望取代普通的无源液压式阻尼器件,成为新一代工程振动抑制阻尼器件,将给所有需要抑制振动的工程结构性系统(如武器平台、飞机、车辆、房屋、桥梁、洗衣机、健身器等)的性能提高带来革命性的突破.如:文献[8]、[9]和[10]的作者分别提出了用该器件进行房屋抗地震、车辆悬架振动抑制和洗衣机减振的应用研究.

然而,有关MR阻尼器的实际工程应用成果尚没有任何报道,已发表的成果仍限于理论和实验研究成果.该器件之所以还没有投入实际的工程应用,原因在于磁流液同其它智能材料一样,具有严重的滞环及饱和非线性特性.因此,对MR阻尼器的性能建模是首先要解决的挑战性工作,目前已有数种滞环非线性模型被相继提出<sup>[8,9,11~15]</sup>.另一要解决的挑战性工作是对滞环及饱和非线性应用系统的控制器

收稿日期: 2003-03-27.

基金项目: 国家留学基金委“高访项目”基金(20H05002)、南京师范大学“跨世纪学术带头人”青兰工程基金(1113200BL11)和留学回国人员科研启动基金(2002DQYX1H1704)以及加拿大肯戈迪亚大学博士研究生奖学金联合资助.

作者简介: 王恩荣,1962-,南京师范大学电气与电子工程学院副教授,加拿大Concordia University在职博士研究生,主要从事电气工程与自动化的教学与研究.

设计问题,这一工作也是控制界研究的热点课题之一,目前也有一些相关的研究成果报道<sup>[16~18]</sup>,但还没有一般性的成熟方法.而且,关于MR阻尼器的滞环及饱和非线性应用控制问题还没有专门的成果发表.因此,对于MR阻尼器的滞环及饱和非线性性能建模和应用控制问题的研究具有广阔的空间,不仅对现代控制理论的非线性控制方法的发展具有积极的推动作用,而且对将MR阻尼器产品尽早推向实际工程应用具有极重要的军工和民用价值.

## 1 工作原理

MR阻尼器是基于磁流液中非胶态悬浮的铁磁颗粒在外加磁场作用下产生极化、形成并行于磁场方向的链状结构、改变磁流液的载体浓度和可极化铁磁颗粒的密度这一基本原理研制而成的.磁流液的组成成分有水(或油类)载体、微米级可极化铁磁颗粒和防颗粒沉积添加剂等,载体浓度和可极化颗粒的密度随着磁场变化的特性称为磁流液的流变特性.在外加磁场强度不断增加的情况下,磁流液的状态可以从正常的液态变化到半固态,这样,其依赖于剪切速度的粘度也就可以随着受控磁场强度的变化得以变化,从而可以控制调节磁流液流动阻尼力的大小.MR阻尼器在控制电流为零的情况下表现为一般的流体特性,在施加控制电流时还受磁场力的调节作用.

图1示出了一种根据上述MR工作原理研制成的MR阻尼器的内部结构示意图,由Lord公司专门为车辆座椅减振系统而设计,型号是RD-1005-3<sup>[13,14]</sup>.其内部由一个蓄压室和两个被活塞分开的储液室组成.蓄压室中储藏了高压氮气,在活塞作上下运动时起缓冲作用,保证储液室不产生局部真空,蓄压室和下储液室之间有塑料隔板分开,起到对阻尼器缸底的保护作用;缸体顶部有密封圈密封;储液室充有大约50 mL的磁流液;在活塞作上下运动时,储液室通过活塞中环状节流孔而产生阻尼作用,通过引出到外部的信号端给活塞中线圈施加控制电流,在节流孔周围产生磁场,从而使得阻尼力得以可控.控制电流的最大容量为2 A.

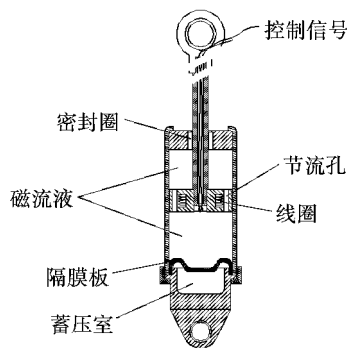
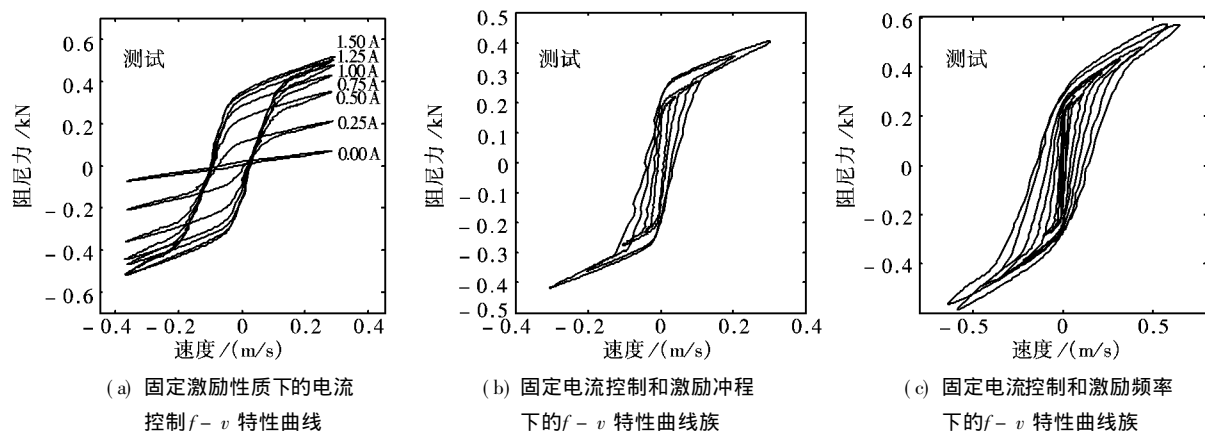


图1 MR阻尼器的内部结构示意图

## 2 性能特点

同普通的液压阻尼器一样,MR阻尼器的特性也用阻尼力对其活塞相对运动速度( $f-v$ )来描述.实验研究表明<sup>[13,14]</sup>, $f-v$ 特性不仅受外加磁场的控制,还受激励信号的频率和活塞运动冲程的影响,并表现出严重的非线性特性,且在周期性工作状态下还表现为严重的滞环特性.

图2示出了在周期性单谐波强迫激励下的部分稳态实验结果,其中图2(a)是在频率7.5 Hz和幅度6.35 mm正弦信号激励下,以及控制电流分别为0、0.25、0.50、0.75、1.00、1.25和1.50 A激励下的 $f-v$ 特性曲线.不难看出,只要阻尼器活塞的压缩和延伸运动性质对称,那么所产生阻尼力的性质也对称,而且是非线性对称,这是因为目前所研发的MR阻尼器都具对称的工作特性.非线性则表现为 $f-v$ 特性曲线存在明显的突变特性和滞环特性.阻尼力突变特性是指在某相对速度和阻尼力点,阻尼力对于相对速度的变化率发生了明显的量的变化.在阻尼力突变点前即速度较小时,特性曲线呈粘弹性特性,具有较大的阻尼力对于相对速度的变化率即阻尼系数,在阻尼力突变点后即速度较大时,特性曲线呈粘塑性特性,具有较小的阻尼系数,且阻尼力对速度呈现接近饱和的线性增加关系.同其它智能材料器件和结构性系统一样,MR阻尼器在周期性工作状态下存在类似磁场饱和的滞环现象,这是因磁流液粘滞摩擦能量损耗和存储而引起,所损耗的能量转化为热量.当阻尼器工作在粘弹性状态时,滞环现象比较严重,具体表现在速度不断增加和减小时, $f-v$ 特性曲线不重合,亦即特性曲线始终不会通过平面坐标轴的原点,且按逆时针方向变化.在速度变化率小于零时,特性曲线是其滞环曲线的下分支曲线,而在速度变化率大于零时,是滞环曲线的上分支曲线.

图2 MR 阻尼器的测试  $f-v$  特性曲线

MR 阻尼器所产生的阻尼力受直流磁场(或直流电流)的控制,且随着控制电流的增加而呈明显的非线性增加且趋于饱和。从图 2(a) 中可看出,控制电流对阻尼力的控制作用可看成为一个控制增益,在控制电流较小时,控制增益较大,特性曲线族比较疏,且呈线性增量关系;在控制电流较大时,特性曲线族比较密,呈现出较明显的非线性增量关系;当控制电流大到一定量时,特性曲线族几乎重合,这正是磁场饱和特性的具体体现。此外,应注意到控制电流对滞环区域宽度的影响可以忽略不计,且 MR 阻尼器的控制特性不属于真正意义上的有源或主动型类,因为阻尼器基本上不从外部吸收能量,主要是耗散能量。为区别于单纯的无源(或被动)和有源(或主动)阻尼器的定义,一般将 MR 阻尼器定义为半有源(或半主动)阻尼器。此外,在控制电流绝对为零的情况下,MR 阻尼器仍可象普通的液压阻尼器一样正常工作,表现出纯粹的无源(或被动)阻尼器的特性,这正是 MR 阻尼器安全可靠性高的原因所在。在系统正常运行时,即使控制器因故障而停止工作,但整个系统仍能继续工作,不会造成整个系统运行瘫痪。

图 2(b) 是在控制电流为 0.75 A, 正弦信号幅度为 6.35 mm 和频率分别为 0.5、1.5、2.5、5.0、7.5、10.0、12.5 和 15.0 Hz 激励下测得的  $f-v$  特性曲线;图 2(c) 是在控制电流为 0.75 A, 正弦信号频率幅度为 2.5 Hz 和幅度分别为 2.54、6.35、12.5 和 18.75 mm 激励下测得的  $f-v$  特性曲线。激励信号的频率和幅度(或冲程)对 MR 阻尼器的工作性能存在明显的影响,且主要反映在对滞环区域宽度的影响上。从图 2(b) 和(c) 中不难发现,随着激励信号幅度和频率的增加,滞环区域的宽度也明显地增加,且在低速粘弹性工作状态下的阻尼系数变化明显,而在高速粘塑性工作状态下的阻尼系数几乎不变。

### 3 模型构建

MR 阻尼器的特性不仅取决于铁磁颗粒的浓度、密度、大小和分布,以及载流体液体、添加剂、施加的磁场、温度等因素,而且还受系统工作状态下阻尼器所受激励信号的频率和冲程以及控制电流的影响。因此,对 MR 阻尼器的建模是件挑战性的工作。众所周知,系统模型应尽量准确和简化,把那些影响系统性能的次要因素尽量舍去,这样可以方便控制器的设计和提高系统的控制效果。对于 MR 阻尼器,由于系统存在滞环特性,因此其阻尼力不仅与相对速度和控制电流有密切关系,而且还与系统过去的历史量有关,一般将 MR 阻尼器的  $f-v$  特性方程表示为:

$$f_d = g(i, x, \dot{x}, \ddot{x}) \quad (1)$$

式中:  $f_d$  表示阻尼力;  $i, x, \dot{x}$  和  $\ddot{x}$  分别表示控制电流、阻尼器的相对位移、速度和加速度;  $g(\cdot)$  表示某滞环非线性的函数关系。应准确描述图 2(a) 所示的稳态滞环的粘弹-塑性特性和非线性饱和的电流控制特性,以及图 2(b) 和(c) 所示的对激励冲程和频率的依赖特性。

值得注意的是,控制电流对滞环区域宽度的影响一般可以忽略,这样表达式(1)可进一步简化为滞环算子和电流控制增益相分离的函数关系<sup>[13,14]</sup>:

$$f_d = g_h(x, x, \dot{x}) \cdot g_i(i) \quad (2)$$

式中:  $g_h(\cdot)$  和  $g_i(\cdot)$  分别表示滞环算子和非线性饱和电流控制增益的子函数关系。

目前, 所提出的 MR 阻尼器模型只解决了在单谐波激励下稳态  $g(\cdot)$  函数的构建问题, 但对模型瞬态性能和实验验证的研究还不够深入, 在精度上还存在不足, 且对在随机信号激励下的瞬态和稳态工作特性的研究尚无专门报道。文献[11]提出的滞环非线性双粘滞模型采用了分段线性化技术, 构建了能反映 MR 阻尼器基本稳态特性的  $g_h(\cdot)$  函数, 该模型的不足之处是只能描述固定激励性质下的阻尼器特性, 一旦激励性质改变, 模型参数就需在线更新, 且缺少  $g_i(\cdot)$  函数; 文献[8]提出了用等效的阻尼器线性机械结构动力学模型和通用的 Bouc-Wen 滞环算子模型相结合的方法来构建  $g_h(\cdot)$  函数, 以及用一个线性表达式来近似描述  $g_i(\cdot)$  函数, 其优点是能基本反映阻尼器的瞬态和稳态工作特性, 以及对激励性质的依赖特性, 不足之处是模型参数的辨识十分困难和  $g_i(\cdot)$  函数的近似程度太大; 文献[9, 15]提出了用两个多项式构建了能描述 MR 阻尼器基本稳态特性的  $g_h(\cdot)$  函数, 以及用一个线性表达式来近似描述  $g_i(\cdot)$  函数, 其不足之处也是只能描述固定激励性质下 MR 阻尼器的特性, 以及  $g_i(\cdot)$  函数的线性描述近似程度太大; 文献[13, 14]提出了用对称的 Sigmoid 函数构建了能反映阻尼器滞环非线性瞬态和稳态特性的  $g_h(\cdot)$  函数, 以及用不对称的 Sigmoid 函数构建了能反映阻尼器的非线性饱和电流控制增益特性的  $g_i(\cdot)$  函数, 其优点是能反映阻尼器的瞬态和稳态工作特性, 以及对激励性质的依赖特性, 模型精度较高, 且可作为车辆悬架减振系统用的不对称 MR 阻尼器的滞环非线性模型, 以及对称或不对称 MR 阻尼器的均值模型, 因此, 该模型被称为通用的 MR 阻尼器模型。

上述几种模型比较有代表性, 也都经过了在单谐波强迫激励下的实验验证研究。然而, 在实际应用中, 系统的激励信号往往不是标准的正弦信号, 而是含多次谐波的任意或随机信号, 即使应用系统的激励信号是标准的正弦信号, 但由于 MR 阻尼器的非线性特性, 因此反映出来的实际工作信号也是含多次谐波的非线性信号。因此, 所提出的 MR 阻尼器的滞环非线性模型尚需结合具体应用系统在随机信号激励下进行全面的理论和实验验证研究。

## 4 滞环非线性控制

MR 阻尼器在实际工程应用中, 即使原始应用系统可以用基本的线性化模型加以表示, 但由于 MR 阻尼器严重的滞环非线性特性, 实际的应用系统也将表现出严重的滞环非线性特性。对于一般的非线性系统, 其非线性现象表现在会出现多孤立平衡点、极限环、跳跃、混沌等特性, 而对于滞环非线性系统, 上述非线性现象无疑会更加明显。因为, 滞环特性必然会造成系统的稳态特性具有多值性, 从而系统会产生周期或似周期性的自振, 对系统的稳定性和性能提高带来严重的危害。然而, 对于非线性系统的控制研究, 尤其是对滞环非线性系统的控制研究还远不象对线性系统的控制那样成熟, 尚缺乏系统的理论方法, 著名的滑模控制、李亚普诺夫方法、基于无源性控制、变结构控制等方法虽已证明能有助于解决特定类非线性系统的控制器设计问题, 但是这些方法均具有局限性<sup>[20]</sup>, 一般仅适合特定类单输入单输出非线性系统。目前, 对滞环非线性系统的控制研究具有很强的挑战性, 已发表的有关研究成果基本上都针对鲁里叶类非线性系统的控制研究, 该类系统的特点是原始系统是线性的, 但其执行结构(或驱动器)一般均存在滞环非线性特性, 而且是完全有源(或主动)控制的, 即执行结构的输出仅仅取决于系统的控制输入, 而与系统的状态变量无关。

文献[16]提出了对于压电陶瓷驱动器的响应位移的跟踪控制技术, 采用了前馈补偿的方法来消除其滞环非线性的影响, 并用传统的 PID 控制方法有效地对其位移响应进行跟踪控制; 文献[17]也是针对上述鲁里叶系统, 如死区或间隙类滞环非线性存在于系统的输入部分, 采用了不同的分段线性化方法对滞环非线性特性进行建模, 且模型都可求逆, 据此提出了自适应参数未知滞环逆模型与系统串级的控制方法来有效地消除滞环非线性对系统的影响; 文献[18]提出了对执行结构具有似间隙滞环非线性鲁里叶系统的自适应控制研究, 似间隙滞环特性用连续时间动力学模型加以表示, 而且可以求得该模型的

解, 这样系统动力学模型的输入部分可简化为线性部分和具有边界约束的非线性部分的迭加, 从而一般性的鲁棒自适应控制方法得以成功地应用于该类系统的控制器设计, 并使得控制系统具有全局稳定性和理想的输出跟踪性能; 文献[19]也是针对驱动器存在如死区或间隙类滞环非线性特性的控制的, 滞环非线性特性也是用分段线性化方法加以建模表示的, 并采用滑模控制方法对系统进行了鲁棒稳定控制器设计。

图3是常用的由MR阻尼器驱动的二自由度“四分之一”汽车悬架系统模型, 其中  $m_s$ 、 $m_u$ 、 $k_s$  和  $c_t$  分别表示汽车车厢和底盘的质量、悬架弹簧的弹性系数, 以及轮胎的弹性系数和阻尼系数,  $f_d$  表示减振用的MR阻尼器,  $x_{in}$ 、 $x_u$  和  $x_s$  分别表示在汽车运动时来自地面的输入, 以及汽车车厢和底盘的纵向位移信号。该非线性系统的控制目标是使悬架系统加速度传输率  $\ddot{x}_s/\ddot{x}_{in}$  和  $\ddot{x}_u/\ddot{x}_{in}$  等性能指标为最优<sup>[6]</sup>, 其开环系统的动力学运动方程表示为:

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + k_s(x_s - x_u) + f_d = 0 \\ m_u \ddot{x}_u + c_t(\dot{x}_u - \dot{x}_{in}) + k_t(x_u - x_{in}) - k_s(x_s - x_u) - f_d = 0 \end{cases} \quad (3)$$

对该类非线性系统的控制问题, 也不例外于分析和综合两大方面的问题: 分析是研究已知非线性控制系统的诸如稳定性、鲁棒性、稳定度等重要特性; 综合是根据控制系统的性能要求来设计出相应的诸如调节、最优、自适应等反馈控制器。目前, 所提出的有关滞环非线性系统的控制方法仍是基于非线性系统的线性化和滞环非线性补偿等基本思想, 成熟的线性系统控制方法仍是研究滞环非线性系统控制问题的重要基础。在未来该课题的研究中, 应注意以下几个方面的问题:

- (1) 应根据具体系统的性能要求, 首先确定该系统的基本控制方法。
- (2) 应提出有效的对所控制系统的滞环非线性进行补偿的合适方法。
- (3) 应对系统模型的欠精确性等提出相应的自适应修正控制方法。
- (4) 在对控制系统稳定性分析的基础上, 进一步提出改善系统鲁棒性能的修正控制方法。
- (5) 应根据实际工程振动场合激励信号的随机性特点, 进一步提出相应的修正控制方法。

目前, 对含MR阻尼器非线性系统的控制器设计还没有成熟的成果报导, 其解决将有助于该智能新器件的实际工程应用推广, 具有重要的理论价值和工程应用前景。

## 5 结论

MR阻尼器是近年来刚问世的新型智能驱动器件。本文系统地介绍了该新器件的工作原理和性能特点, 以及描述其  $f-v$  特性的滞环非线性模型, 并结合路面汽车的性能要求, 对该类滞环非线性系统的控制问题提出了若干研究方向, 有助于加速该新智能驱动器件在实际工程系统中的应用研究。

### [参考文献]

- [1] Winslow W M. Induced fibrillation of suspensions[J]. J of Applied Physics, 1949, 20: 1137~ 1140.
- [2] Rabinow J. The magnetic fluid clutch[J]. AIEE Transactions, 1948, 67: 1308~ 1315.
- [3] Klingenberg D J, Van Swol F, Zukoski C F. Dynamic simulation of electrorheological suspension[J]. J of Chemical Physics, 1989, 91: 7888.
- [4] Lou Z, Ervin R D, Filisko F E. A preliminary parametric study of electrorheological dampers[J]. Transactions ASME J of Fluid Engineering, 1994, 116: 570.
- [5] Redfield R C. Performance of low-bandwidth, semi-active damping concepts for suspension control[J]. J of Vehicle Dynamic System, 1991, 20: 245~ 267.

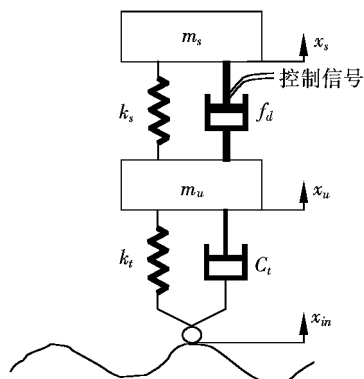


图3 二自由度“四分之一”车辆动力学模型

- [6] Hwang S H, Heo S J, Kim H S, *et al.* Vehicle dynamic analysis and evaluation of continuously controlled semi-active suspensions using hardware-in-the-loop simulation[J]. *J of Vehicle System Dynamics*, 1997, 27: 423~ 434.
- [7] Margida A J, Wesis K D, Carlson J D. Magneto-rheological materials based on iron particles [J]. *Int J of Modern Physics B*, 1999, 10: 3335~ 3341.
- [8] Dyke S J, Spencer B F Jr, Sain M K, *et al.* An experimental study of MR dampers for seismic protection[J]. *J of Smart Materials and Structures*, 1998, 7: 693~ 703.
- [9] Choi S B, Lee H S, Hong S R, *et al.* Control and response characteristics of a magnetorheological fluid damper for passenger vehicles[A]. *Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials*[C]. 2000: 438~ 443.
- [10] Chazan M J, Carlson J D. MR fluid sponge devices and their use in vibration control of washing machines[A]. *Proceeding of 8th Annual Symposium on Smart Structures and Materials*[C]. Newport, 2001.
- [11] Wereley N M, Pang L, Kamath G M. Idealized hysteresis modeling of electrorheological and magnetorheological dampers[J]. *J of Intelligent Material Systems and Structures*, 1998, (9): 642~ 649.
- [12] Wereley N M, Pang L. Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models[J]. *J of Smart Materials and Structures*, 2000, (7): 732~ 743.
- [13] Wang E R, Ma X Q, Rakheja S, *et al.* A general model of a magnetorheological controllable damper[A]. *Proceedings of 9<sup>th</sup> Int. Congress on Sound and Vibration (ICSV9)*[C]. USA: University of Central Florida, 2002.412.
- [14] Ma X Q, Wang E R, Rakheja S, *et al.* Modeling hysteretic characteristics of MR-fluid damper and model validation[A]. *Proceedings of 41st IEEE Conf on Decision and Control (CDC02)*[C]. USA: Ohio State University, 2002.1675~ 1680.
- [15] Leva A, Piroddi L. NARX-based technique for the modelling of magnetorheological damping devices[J]. *J of Smart Materials and Structures*, 2002, (11): 79~ 88.
- [16] Ge P, Jouaneh M. Tracking control of a piezoceramic actuator[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1996, 4 (3): 209~ 215.
- [17] Ahmad N J, Khorami F. Adaptive control of systems with backlash hysteresis at the input[A]. *Proceedings of the American Control Conference*[C]. California: San Diego, 1999.3018~ 3022.
- [18] Su C Y, Stepanenko Y, Svoboda J, *et al.* Robust adaptive control of a class of nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(12): 2427~ 2431.
- [19] Corradini M L, Orlando G. Robust stabilization of nonlinear uncertain plants with backlash or dead zone in the actuator[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2002, 10(1): 158~ 166.
- [20] Khalil H. Nonlinear system[M]. USA: Prentice Hall, 2002.111~ 625.

## Review on Application of New Controllable Magnetorheological Fluid Damper

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

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

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

**Abstract:** The controllable magnetorheological (MR) fluid damper, owing to its advantages of semi-active control, fast recovery, small volume, lower input power, easy implementation, safety, reliability, quiet, product, *etc*, has recently been an active study subject in the field of international engineering vibration attenuation, which may replace the conventional hydraulic damper and become a new generation element to highly improve the vibration control performance of engineering construction system. Emphasis is placed in this paper on introduction of the fundamental operation mechanism and main performance features of this smart material element, and the hysteresis nonlinear models characterizing its force versus relative velocity ( $f-v$ ) property. Furthermore, some research trends are suggested for the controller synthesis of the hysteresis nonlinear system such as road vehicle suspension, thus may be helpful to accelerate the application study of this smart actuator in real engineering system.

**Key words:** magnetorheological fluid damper, vibration suspension, hysteresis nonlinear model, nonlinear control

[责任编辑: 严海琳]