

# 电流变液与压电陶瓷复合的自耦合阻尼器<sup>1)</sup>

赵晓鹏<sup>2)</sup> 唐 宏 刘 曙 尹剑波

(西北工业大学电流变技术研究所 141#, 西安 710072)



赵晓鹏, 博士, 男, 1957 年生, 西北工业大学教授、博士生导师、2000 年国家杰出青年科学基金获得者, 西北工业大学智能材料与结构中心主任。长期从事智能材料与结构研究, 发表科研论文 200 余篇, 其中 SCI 检索 97 篇, EI 检索 85 篇, 引用 500 多次; 申请和授权中国发明专利 76 项, 获省部级科技奖励 5 项; 培养博士生 23 人, 硕士生 42 人。

**摘要** 基于智能结构的思想, 率先提出设计制作电流变液和压电陶瓷复合的自耦合阻尼器。相比于通常的电流变液阻尼器, 该自耦合阻尼器采用压电陶瓷响应外界振动而输出高电压, 激励电流变液体工作, 从而省去了外加高压电源。随外作用力变化, 激励电流变液的压电陶瓷电压自动改变, 阻尼器具有自适应的特征, 省去了通常的计算机等控制系统。研制的第 1 代电流变液 / 压电陶瓷阻尼器实现了自适应的控制过程, 显示了良好的减振性能。在第 2 代产品中采用了新的设计, 提高了阻尼器的结构稳定性和可靠性, 使阻尼器整体性能得到提高。

**关键词** 智能结构, 电流变液, 压电陶瓷, 阻尼器, 自耦合

## SELF-COUPLED DAMPERS COMPOSED OF ELECTORRHEOLOGICAL FLUIDS AND PIEZOELECTRIC CERAMICS

ZHAO Xiaopeng TANG Hong LIU Shu YIN Jianbo

(Institute of Electrorheological Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract** Based on the concept of intelligent structures, self-coupled dampers composed of electrorheological (ER) fluids and piezoelectric ceramics are proposed in this paper. Unlike the conventional ER dampers, the self-coupled dampers employ piezoelectric ceramics to respond the external vibration and to provide the electric field for solidification of ER fluids. With a change in the external vibration, the electric field changes accordingly due to the piezoelectric ceramics, resulting in an adaptive control process. The self-coupled dampers have a simple and compact structure since the high voltage supply and the control system are not involved. Two generation products of the self-coupled dampers have been manufactured. Several modifications have been included in the second generation self-coupled damper and both the stability and the reliability of the damper are improved.

**Key words** intelligent structure, electrorheological fluid, piezoelectric ceramic, damper, self-coupled

2005-10-25 收到第 1 稿, 2005-12-07 收到修改稿。

1) 国家杰出青年科学基金 (50025207), 国家自然科学基金重点项目 (59832090) 和 863 计划 (2001AA327130) 项目资助。

2) E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

## 1 引言

电流变液 (electrorheological fluids, ER 流体) 是一种智能材料, 它一般是由微米 (或纳米) 尺度的具有高介电常数的颗粒均匀分散在绝缘的低介电常数的油相介质中形成的悬浮液<sup>[1~10]</sup>. 当施加外电场时, ER 流体从流动状态转变为类固体状态, 其表观黏度急增几个数量级, 并达到较高的剪切应力. 该过程是可逆、可控、迅速和低功耗的<sup>[1~4,10]</sup>. 这些优良的机电耦合性能使 ER 流体能有效地解决机械工程中能量传递和控制等问题.

通常 ER 器件中 ER 流体工作模式可分为剪切式、流动式和挤压式<sup>[11~16]</sup>. 在剪切模式中, 一个或二个电极直线或旋转运动, ER 流体受剪切作用而平行电极流动. 如 Dulcos 设计的滑片式 ER 阻尼器, 它利用来自滑动电极间的 ER 剪切阻力来控制外界振动<sup>[17]</sup>. 流动模式中两电极是固定不动的, 以形成一个流动通道. 通过调节电场强度, ER 流动阻力可以被调控. 挤压模式的特征是: 电极间隙随时间变化, 中间的 ER 流体受到垂直方向上的挤压作用. 研究表明挤压模式有许多优异性能. 最近, 日本 Furusho 等人发展了一种 ER 触觉装置, 其被认为在虚拟现实 (VR) 技术中有许多可能的应用. 该触觉装置的核心是一个 ER 离合驱动器<sup>[18]</sup>. 韩国 Choi 等人发展了一种剪切模式的 ER 汽车引擎座, 其比传统的引擎座更能提高乘坐的舒适性<sup>[19]</sup>.

在通常的 ER 装置中, 需要外部高压电源来提供对 ER 流体的电激励. 为实现精确的控制, 需要计算机等控制系统来控制电压输出. 因此通常的 ER 装置都比较复杂. 笔者提出了 ER 流体和压电陶瓷复合的自适应阻尼器, 采用压电陶瓷响应外界振动而输出高电压, 该高电压直接支持 ER 流体工作. 这种自适应 ER 阻尼器具有更简化、更便宜、更节能的特点. 本文首先介绍了笔者研制的第 1 代 ER 流体和压电陶瓷复合的自适应阻尼器: 弹簧直压式和楔形施力式. 然后介绍改进后的第 2 代 ER 流体自耦合阻尼器. 在第 2 代产品中采用了新的设计, 从而能克服第 1 代产品中的缺点, 使阻尼器性能得到提高.

## 2 电流变液 - 压电陶瓷自耦合阻尼器工作原理

由于 ER 流体工作时只消耗很低的功率, 可以用压电陶瓷来代替高压电源. 外界振动作用在压电陶

瓷上使其产生高电压输出, 将该高电压直接激励电液变液, 受激的 ER 流体发生转变, 其表观黏度增加, 从而导致减振系统阻尼增加, 实现对外界振动的控制, 此过程用图 1 表示.

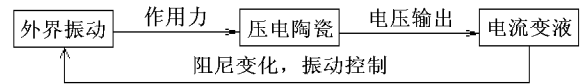


图 1 电流变液 - 压电陶瓷自耦合阻尼器工作原理图

这种工作原理实现了从激励到控制的闭环控制过程. 如果外界振动强, 则作用在压电陶瓷上的压力大, 压电陶瓷输出的电压就高, 进而对 ER 流体的激励也就增强, ER 流体的固化作用也增强, 反过来对外界振动的抑制作用也随之增大. 这个过程具有自适应 (自动调节) 的特征. 同时用压电陶瓷代替了高压电源和计算机控制设备, 使整个阻尼器的结构得以简化.

压电陶瓷的压电输出为<sup>[20]</sup> $V = g_{33}hF/S$ , 其中,  $h$  为压电陶瓷的高度,  $S$  为截面积,  $g_{33}$  为压电系数. 选用山东淄博无线电陶瓷厂的  $\text{Pb}(\text{Zr-TiO}_3)$  压电陶瓷, 其尺寸为  $\phi 7\text{mm} \times 15\text{mm}$ . 压电陶瓷的压力 - 电压输出性能见图 2. 当外部压力由达到 70 MPa 时, 压电陶瓷输出的电压可高达 7 kV.

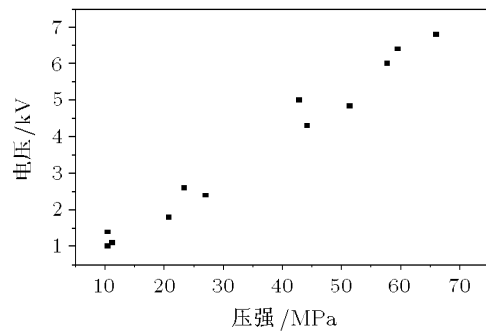


图 2 压电陶瓷的压力 - 电压输出关系图

## 3 第 1 代 ER 流体和压电陶瓷复合的自适应阻尼器

### 3.1 弹簧直压式阻尼器<sup>[21]</sup>

弹簧直压式阻尼器 (图 3) 的活塞头和电极固定件上都打有小孔, ER 流体可以自由穿过小孔在阻尼腔体内流动. 压电陶瓷竖直固定在加压板下方. 活塞和加压板之间是一个刚性的弹簧. 一组同心圆柱型电极通过电极固定件被固定在活塞杆上. 阻尼器工作过程: 当活塞上下振动时, 受压力激励的压电陶瓷产生高电压, 这样电极间的电场就建立起来.

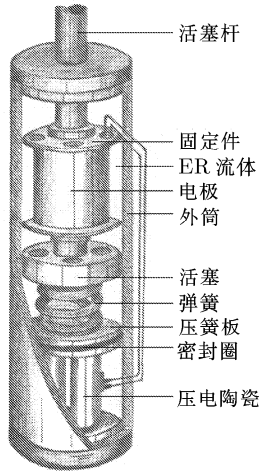


图 3 弹簧直压式阻尼器的结构半剖图

流经电极的 ER 流体被激励固化，系统阻尼升高，使外界振动受到抑制。

### 3.2 楔形施力杆式阻尼器 [22]

楔形施力杆式阻尼器 (图 4) 的活塞杆贯穿整个阻尼筒，在活塞杆的下方固定有一个楔形头。压电

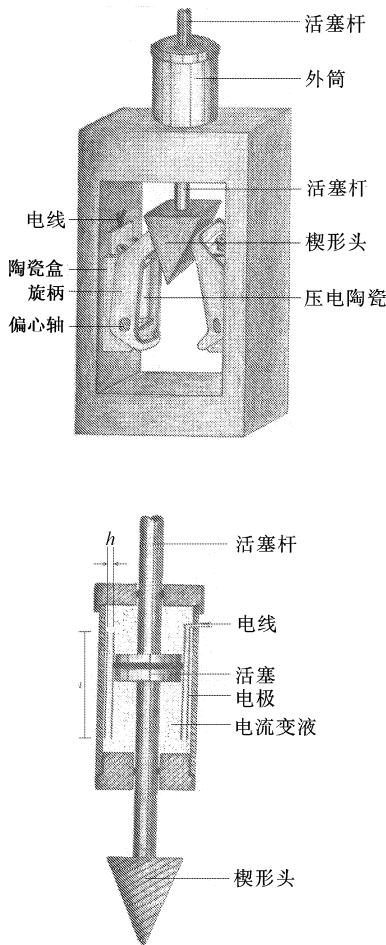


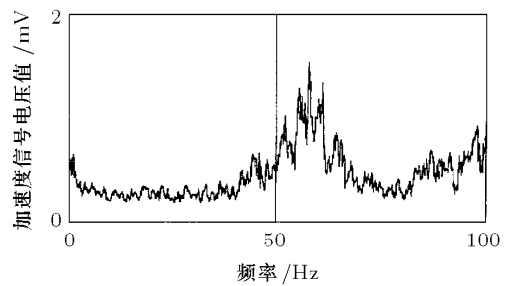
图 4 楔形施力杆式阻尼器结构图

陶瓷被安放在带旋柄的小盒中。当旋柄转动时，带动偏心轴转动，使其中的压电陶瓷受挤压，输出的高压由导线接到固定在阻尼筒内部的同心圆柱电极上。当楔形头和活塞杆受外界振动上下运动时，楔形头旋紧或放松旋柄，压电陶瓷受产生高电压输出，流经电极的 ER 流体受电激励而发生固化作用，其流动阻力增大，使活塞的振动受到抑制。制作的阻尼器外筒尺寸  $\Phi 52 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。电极高度 60 mm。内电极直径 40 mm。内外电极间隙 1.5 mm。阻尼器外筒的壁厚 3 mm。

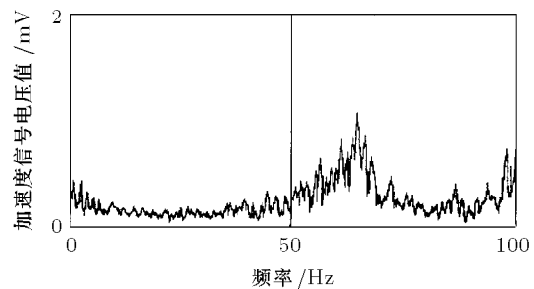
### 3.3 减振实验

实验使用的 ER 流体是稀土掺杂的  $\text{TiO}_2$  颗粒和硅油的均匀混合液体。颗粒相的体积分数为 27%，在直流电场 2.5 kV/mm 时，ER 流体的屈服应力可以达到 4 kPa。实验中，JZ5-5 型振动激振器竖直放置，其激振杆通过加速度传感器与待测 ER 阻尼器的活塞杆上端连接好。阻尼器底部固定在地面上。加速度传感器将监测到的信号送入 DHF 型电荷放大器和 CF350 信号分析仪 [23,24]。

图 5(a) 和图 5(b) 是激振器输出功率为 75% (全功率为 100%) 时测得的加速度幅值与频率的关系曲线。图 5(a) 是在压电陶瓷输出未接在电极上时测得的，而图 5(b) 是接上该电压输出后的情况。图中 Y 坐标是加速度传感器测得的电信号值 (单位 mV)。可



(a) 压电陶瓷输出未接入

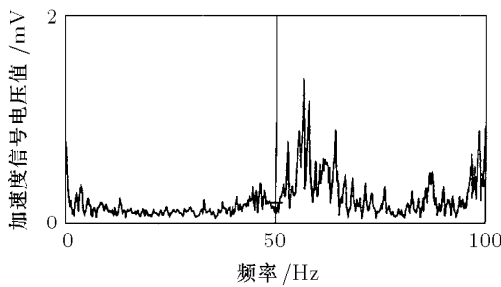


(b) 电压输出接入

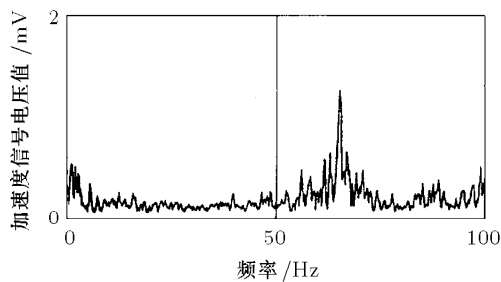
图 5 激振器输出功率 75% 时加速度幅值与频率的关系

以看出，加速度幅值谱线的包络线在图 5(a) 中比图 5(b) 中的普遍稍低一些，说明当加上压电输出后，加速度幅值被降低了。由于位移振幅  $A_d$  和加速度幅值  $A_a$  有如下关系  $A_d = A_a/\omega^2$ ，这说明位移振幅在加上压电输出后也被降低了。此外，最大加速度幅值处的频率值也由未加电压时图 5(a) 的 57.3Hz 移动到加上电压时的 64.7Hz。说明由于压电输出的高电压的激励，ER 流体受到电激发，其屈服应力也增大，导致阻尼器阻尼增大，阻尼器的振动受到了抑制。

图 6(a) 和图 6(b) 是激振器输出功率降为 50% 时的测试曲线。仍可看出：图 6(b) 的包络线比图 6(a) 中的降低一些。但是降低的程度却小了。然而，最大加速度幅值处的频率移动却仍很明显。从未加电压时图 6(a) 中的 56.6Hz 移动到加上电压时图 6(b) 的 65.7Hz。这同样是由于 ER 效应，使阻尼器内阻尼增大而使阻尼器的振动得到了抑制。图 5 和图 6 中的曲线都是尖齿状，不是很光滑。这可能与阻尼器系统中的一些非线性因数有关。例如，楔形头与旋柄之间的摩擦，旋柄转动动力与振动位移的非线性关系及阻尼器中 ER 液体的流动等。但从一个整体性质来看，曲线包络线的降低和最大加速度频率值的高频移动等是较明显的。



(a) 压电陶瓷输出未接入



(b) 电压输出接入

图 6 激振器输出功率 50% 时加速度幅值与频率的关系

### 4 第 2 代电流变自耦合阻尼器 [25]

弹簧直压式阻尼器中压电陶瓷通过弹簧被直接安置在活塞头下面，ER 流体充满了整个活塞腔和弹簧腔室，因此需要较多的 ER 流体，由于目前较好性能 ER 流体价格仍较高，这会提高阻尼器成本。楔形施力杆式阻尼器中采用了类似杠杆的机械以提高作用于压电陶瓷的压力。如果外界振动过强，可能使压电陶瓷块碎裂。第 1 代 ER 阻尼器中压电陶瓷的数量为 2 个，并且采用并联方式，实验发现产生的压电输出比较低，对 ER 流体的电激励也较弱，并且楔形施力杆式阻尼器的结构稳定性也较差，这些缺陷制约了这类自适应阻尼器的使用。

#### 4.1 自耦合阻尼器设计与制作 [26,27]

针对第 1 代产品的缺点，设计制造了第 2 代阻尼器。图 7 是第 2 代自耦合阻尼器的剖视图。对比第 1 代自适应阻尼器，有 3 方面的改进：(1) 压电陶瓷数目，安置方式和电气连接方式。在第 2 代阻尼器中，采用了 3 个压电陶瓷，并且呈三角形嵌入在套板中，这种三角对称嵌入式固定压电陶瓷的方法能确保阻尼器在受载荷过程中保持很好的稳定性和可靠性。压电陶瓷电气连接方式由并联变为串联，这样总的输出电压被提高了，对 ER 流体的电激励固化作用更强。(2) 第 2 代产品中，压电陶瓷机构由位于 ER 阻尼腔下方变成了位于 ER 阻尼腔上方。这样便于外界振动载荷更有效地传递到压电陶瓷上，整个系统的工作灵敏性得到提高。(3) 孔 - 道结构被增加到同心圆柱电极上，用以连通阻尼腔和电极间隙。由于对某些 ER 流体来说，屈服应力还不是

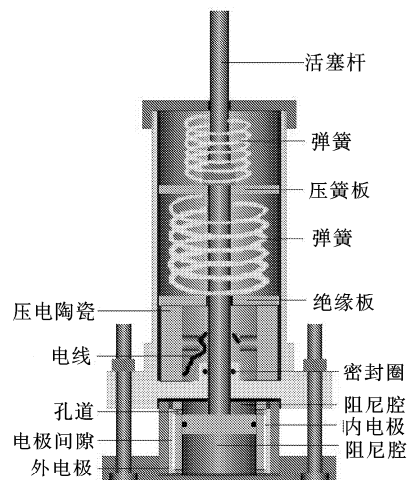


图 7 自耦合 ER 压电陶瓷阻尼器结构剖视图

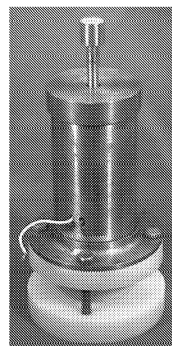
足够的高,这种结构设计能增大 ER 流体流过孔道时的阻力,从而有效地提高系统承受外载荷的能力.

表 1 列出了两代阻尼器的对比信息.改进后的新阻尼器在结构稳定性,工作灵敏性和承受载荷能力方面都有很大提高.

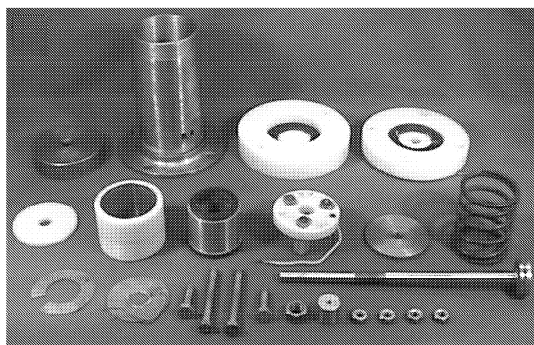
图 8 是自耦合阻尼器实物照片.阻尼器分 5 个部分:施力部分(包括活塞和活塞杆),压电功率输出(包括弹簧,压簧板,压电陶瓷),阻尼部分(包括阻尼内外筒,ER 流体),电气连接部分(导线和绝缘板),封装部分(如外筒,底座,固定螺栓等).阻尼器工作过程:当策动力加在活塞杆上,使活塞杆上下振动,压簧板也随活塞杆上下运动,压力通过

表 1 两代阻尼器稳定性、灵敏性和承载能力对比

	第 1 代阻尼器	第 2 代阻尼器
稳定性	楔形活塞易侧向滑出;压电陶瓷并联连接	活塞以直压方式同轴运动;压电陶瓷呈三角对称安置
电压输出	只有 2 kV 左右	超过 5 kV
工作灵敏性	楔形面与旋柄存在摩擦;载荷-ER 流体-压电陶瓷激励方式	无明显摩擦面;载荷-压电陶瓷-ER 流体激励方式
承载能力	600 N	5 kN



(a) 外型



(b) 内部零件

图 8 制作的第 2 代 ER-压电陶瓷自耦合阻尼器实物照片

弹簧和绝缘板作用在压电陶瓷上,这时压电陶瓷受压输出高电压,该高电压被接到内外电极上,电极间的 ER 流体受到电激励,其表观黏度迅速升高,在活塞运动推动下,ER 流体流过阻尼腔下端的孔道,流过电极间隙再由阻尼腔上端的孔道回流到阻尼腔内,由于 ER 黏度剧烈增加,阻尼力反作用在活塞上,而使活塞振动得到抑制,可以看出,该阻尼器不但能自提供能量(不需要外界电源),而且产生的电压幅值由外界振动激励的强度来决定,外界激励强,作用在压电陶瓷上的压力大,压电陶瓷输出的电压就高,于是能达到更优化的减振效果.这说明该阻尼器具有自适应控制的特征.

## 4.2 振动实验

实验使用 Ce 掺杂  $\text{TiO}_2$  颗粒的 ER 流体,  $\text{TiO}_2$  中 Ce 的掺杂量按摩尔数为 8.5% (即 Ce, Ti 的摩尔数比为 0.085:1).其合成工艺简述如下:钛酸正丁脂,  $\text{CeCl}_3$  和去离子水溶解在无水乙醇中,呈清澈黄色溶液,使用 HCl 控制 pH 值在 3~4,然后在室温下放置 12~48 h,形成透明凝胶.然后在  $78^\circ\text{C}$  下干燥 8 h,形成固态凝胶,使该固态凝胶研碎,过筛,然后进行分段煅烧,空气气氛,最好温度  $550^\circ\text{C}$ .晶态掺杂的  $\text{TiO}_2$  颗粒就制备好了.制得的颗粒(球形,直径  $5 \sim 10 \mu\text{m}$ ,  $\rho = 3.8 \text{ g/cm}^3$ )在真空中  $150^\circ\text{C}$  去水分,然后与硅油(在  $25^\circ\text{C}$  时  $\eta = 50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )混合制成体积分数 18% 的 ER 流体,不使用任何添加剂.用 Hakke 流变仪测量  $25^\circ\text{C}$  时的流变性能.测量方式是剪切率从  $0 \text{ s}^{-1}$  升到  $300 \text{ s}^{-1}$ ,然后降回  $0 \text{ s}^{-1}$ .因此一次测量会出现两条线(上升或下降段),图 9 是测量的流变曲线,测量时 ER 流体漏电流密度为  $4.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

ER 阻尼器的性能在 VS-300-2(东凌振动仪器公

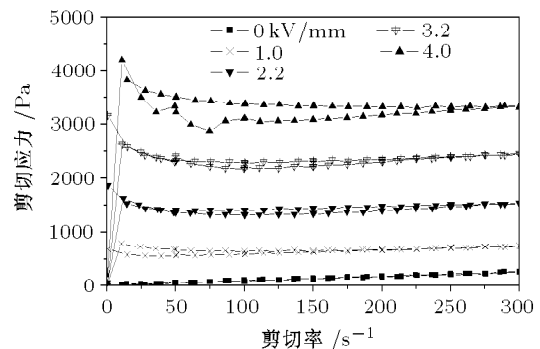


图 9 Ce 掺杂  $\text{TiO}_2$  电流变液体应力-剪切率关系曲线

司, 苏州, 江苏) 振动测试台上进行. 策动力由一个激振杆施加. 激振杆的加速度幅值设为  $3.5g$ ,  $g$  为重力加速度. 采用扫频激励方式, 扫频速率为  $8\text{ octave}/\text{min}$ , 扫频范围为  $5\sim 270\text{ Hz}$ . 激励波形是正弦, 但频率随时间指数增加, 这是测试阻尼行为的常用方式. 阻抗头被固定(磁性)在活塞杆上, 然后激励杆压在阻抗头上, 活塞的加速度和策动力信号由阻抗头同时测得, 并传给 HP-VXI 型数据分析仪. 在其他条件相同时, 只是接通和断开压电输出, 分别测得频率响应函数 ( $FRF$ ) 曲线, 见图 10,  $FRF$  的输入是力(单位: N), 输出是加速度(单位:  $\text{m}/\text{s}^2$ ),  $FRF$  定义为:  $FRF = A(\omega)/H(\omega)$ ,  $A(\omega)$  是输出,  $H(\omega)$  是输入.

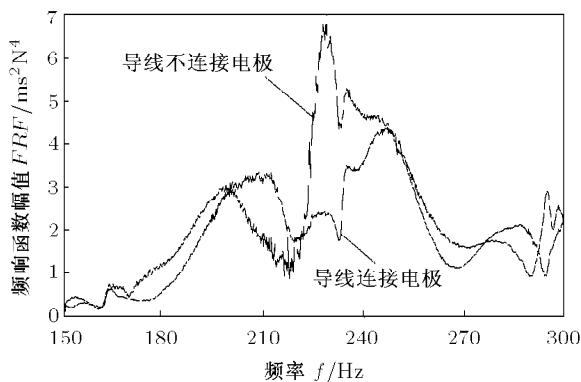


图 10 实验测得的阻尼器频率响应函数 ( $FRF$ ) 曲线

分析测得的图 10 中的  $FRF$  曲线可以得出: (1) 当接上压电输出时,  $FRF$  曲线包络线发生了很大变化, 这说明压电陶瓷产生的高电压已经激励了阻尼腔内 ER 流体, 并使 ER 阻尼器的工作状态发生了明显变化. 这点证明使用压电陶瓷来激励 ER 流体是可行的. (2) 接入压电电压后  $FRF$  的包络曲线普遍比未接入压电电压时的  $FRF$  包络线低, 特别在  $220\sim 250\text{ Hz}$  频率内,  $FRF$  曲线包络下降可达  $30\%$ , 这说明自耦合 ER 阻尼器对振动抑制效果是很明显的, 这点与使用外部高压电源的传统阻尼器的特征是一致的. (3) 当压电电压接入后,  $198\text{ Hz}$  处共振频率移动到了  $208\text{ Hz}$  附近. 共振峰的移动也证实 ER 流体被激励固化了. 阻尼器的振动状态也发生了明显变化.

## 5 结束语

尽管已设计出许多种类的基于 ER 流体的阻尼器, 但将 ER 流体和压电陶瓷复合起来做阻尼器的

概念是第 1 次被提出来. 这里提出的阻尼器使用 ER 流体作振动抑制的驱动器, 压电陶瓷作外界振动响应器和高电压输出器. 激励 ER 流体固化的压电高电压同时随振动振幅和频率的改变而变化, 于是阻尼器的自动调节过程得以实现. 相比于传统的 ER 阻尼器, 这类阻尼器不仅结构简单, 而且具备自调控能力. 第 1 代 ER 流体 / 压电陶瓷阻尼器实现了自适应的控制过程, 显示了良好的减振性能. 第 2 代自耦合 ER 阻尼器比第 1 代阻尼器有很大改进, 如压电陶瓷数量、安置方式和电气连接方式不同; 载荷施加机构不同; 同心圆柱电极上采用孔道结构. 这些改进不仅提高了阻尼器的结构稳定性, 并且也提高了工作可靠性. 对比第 1 代与第 2 代阻尼器, 频响曲线上显示出更好的振幅抑制和共振模高频移动效果.

实验证明用压电陶瓷和 ER 流体复合起来形成自反馈的控制系统是可行的. 此外, 这种设计方法也可以广泛应用到其他自适应控制系统中去. 这种自耦合控制系统不仅可以简化设计和制作, 在实际操作中也非常方便.

## 参 考 文 献

- Whittle M, Bullough WA. The structure of smart fluids. *Nature*, 1992, 358: 373
- Halsey TC. Electrorheological fluids. *Science*, 1992, 258: 761~766
- Winslow WM. Induced fibrillation of suspension. *J Appl Phys*, 1949, 20: 1137~1140
- 赵晓鹏. 电磁流变液与智能控制. 见: 杨大智主编. 智能材料与智能系统. 天津: 天津大学出版社, 2000 (Zhao XP. Electrorheological fluids and intelligent controls. In: Yang Dazhi ed. Intelligent Materials and Intelligent Systems, Tianjin: Tianjin University Press, 2000 (in Chinese))
- Parthasarathy M, Klingenberg DJ. Electrorheology: mechanism and models. *Materials Sci Eng*, 1996, R17: 57~103
- Zhao XP, Yin JB. Preparation and electrorheological characteristics of rare-earth-doped  $\text{TiO}_2$  suspension. *Chem Mater*, 2002, 14: 2258~2263
- Wang BX, Zhao XP. Electrorheological behavior of kaolinite-polar liquid intercalation composites. *J Mater Chem*, 2002, 12: 1865~1869
- Yin JB, Zhao XP. Preparation and electrorheological activity of mesoporous rare-earth-doped  $\text{TiO}_2$ . *Chem Mater*, 2002, 14: 4633~4640
- Wang BX, Zhao XP. Wettability of bionic nanopapilla particles and their high electrorheological activity. *Adv Funct Mater*, (in press, doi 10.1002/adfm.200500129)

- 10 Hao T. Electrorheological fluids. *Advanced Materials*, 2001, 13: 1847
- 11 Vieira SL, Nakano M, Oke R, et al. Mechanical properties of an ER fluid in tensile, compression and oscillatory squeeze test. *International Journal of Modern Physics B* 2001, 6 & 7: 714~722
- 12 Wendt E, Busing KW. A new type of hydraulic actuator using electrorheological fluids. *International Journal of Modern Physics B*, 1999, 14, 15 & 16: 2176~2182
- 13 Williams FW, Rigby SG, Sproston JI., et al. Electrorheological fluids applied to an automotive engine mount. *J Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1993, 47: 221~238
- 14 Choi SB, Choi YT. Sliding mode control of a shear-mode type ER engine mount. *KSME international journal* 1999, 13: 26~33
- 15 Monkman GJ. The electrorheological effect under compressive stress. *J Phys D: Appl Phys*, 1995, 3: 588~594
- 16 Young KA, Yang B, Morishita S. Directionally controllable squeeze film damper using electrorheological fluid. *Transactions of the ASME J of Vibration and Acoustics*, 2002, 1: 105~109
- 17 Duclos TG. Design of device using ER fluids. *SAE Transactions*, 1988, paper 881134
- 18 Furusho J, Sakaguchi M. New actuators using ER fluid and their application to force display devices in virtual reality and medical treatments. *Int J of Modern Phys B*, 1999, 14, 15 & 16: 2151~2159
- 19 Choi SB, Choi YT. Sliding mode control of a shear-mode type ER engine mount. *KSME International Journal*, 1999, 13: 26~33
- 20 李源. 压电铁电材料测量. 北京: 科学出版社, 1984 (Li Yuan. Measurement for Piezoelectric and Ferroelectric Materials. Beijing: Science Press, 1984 (in Chinese))
- 21 赵晓鹏, 唐宏. 电流变液与压电陶瓷复合的自适应阻尼器. 1996 中国专利, ZL 96236145.3 (Zhao XP, Tang H. An Adaptive Damper Composed of Electrorheological Fluid and Piezoelectric Ceramics. China Patent, ZL 96236145.3, 1996 (in Chinese))
- 22 赵晓鹏, 唐宏. 楔形施力的电流变阻尼器. 中国专利, ZL 96236426.6, 1996 (Zhao X P, Tang H. An Electrorheological damper with a wedge type piston. China Patent, ZL 96236426.6, 1996 (in Chinese))
- 23 唐宏, 赵晓鹏. 电流变液与压电陶瓷复合的自适应阻尼器设计和性能研究. *机械科学与技术*, 1998, 17(增): 24~26 (Tang H, Zhao XP. Design and performance research of an adaptive damper composed of electrorheological fluid and piezoelectric ceramics. *Mechanical Science and Technology*, 1998, 17(supplement): 24~26 (in Chinese))
- 24 Tang H, Zhao XP, Liu S. Design and performance research of an adaptive damper composed of electrorheological fluids and piezoelectric ceramics. *Smart Mater Struct*, 2003, 12: 347~354
- 25 赵晓鹏, 刘曙. 一种无外电源的电流变自耦合阻尼器. 中国专利, 申请号 02139476.8, 2002 (Zhao XP, Liu S. A self-coupled electrorheological damper without an external high voltage supply. China Patent, Appl. No. 02139476.8, 2002 (in Chinese))
- 26 刘曙, 尹剑波, 唐宏等. 自耦合电流变阻尼器及其性能. *机械工程学报*, 2004, 40: 131~134 (Liu Shu, Yin Jianbo, Tang Hong, et al. A self-coupled electrorheological damper and its properties. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40: 131~134 (in Chinese))
- 27 Zhao XP, Liu S, Tang H, et al. A new kind of self-coupled electrorheological damper and its vibration character. *J Intell Mater Syst, & Struct*, 2005, 16: 57~65