复合材料学报 第23卷 第1期 2月 2006年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 23 No. 1 February 2006

文章编号: 1000-3851(2006)01-0161-06

横向可压缩电流变夹层梁的振动特性

魏克湘[1], 孟 光[*1], 朱石沙[2]
(1. 上海交通大学 振动冲击噪声国家重点实验室, 上海 200240;
2. 湘潭大学 机械工程学院, 湘潭 411100)

摘 要: 讨论了电流变夹层梁在考虑电流变材料层横向可压缩时的动力学特性。在建模过程中将电流变材料视为可压缩的粘弹性材料, 假设电流变材料层的横向位移随厚度变化。基于一阶剪切变形理论和能量方法建立了电流变夹层梁的挤压-剪切动力学模型, 并采用有限元方法进行了离散求解。通过对悬臂梁的仿真和实验分析得出: 在电流变夹层梁的振动过程中, 上、下约束层的横向位移并不完全相等, 在低频阶段相差不大, 但在高频阶段较为明显; 加大外加电场的强度, 可以减小横向位移的差值; 而电流变层厚度的增加, 将使横向位移的差值加大。

关键词: 电流变液; 夹层梁; 芯层可压缩; 动力学特性
中图分类号: TB332 **文献标识码**: A

Vibration analysis of electrorheological sandwich beams with transversely compressible core

WEI Kexiang[1], MENG Guang[*1], ZHU Shisha[2]
(1. State Key Laboratory of Vibration, Shock and Noise, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411100, China)

Abstract: The dynamic characteristic of the electrorheological (ER) sandwich beams with a compressible core was studied. Assuming that the transverse displacements vary with the thickness of the ER layer, a compressional-shear model was developed based on a first order shear deformation theory and the energy approach. Then the dynamic equations were solved by the finite element method. The results show that the transverse displacements of the top elastic layer and the bottom layer are different. The difference is small in the low-frequency range, but obvious in the high-frequency range. Increasing the intensity of the applied electric field will decrease the difference. The thicker the ER layer, the larger the difference.

Keywords: electrorheological (ER) fluids; sandwich beams; compressible core; dynamic characteristic

电流变液是一种流变特性可控的智能流体材料。在外加电场作用下, 材料的物理特性如粘度、弹性、塑性等能发生快速可逆的变化。含有电流变材料的智能结构和系统, 由于能自适应调节系统的阻尼和刚度, 在结构的振动主动控制中获得了广泛的关注。自20世纪80年代开始对电流变自适应结构进行研究以来, 已有许多学者对电流变夹层结构进行了理论建模和实验研究。早期对电流变自适应结构的动力学分析主要采用粘弹性阻尼结构的RUK和MM(Mead-Markus)建模方法[1~4]。近年来, 一般采用Hamilton变分理论和有限元方法对电流变夹层结构进行振动分析[5~8]。在目前已有的电流变夹层结构建模方法中, 均假设电流变材料不可压缩, 梁截面内任一点的横向变形均不随梁的厚度变化, 同一截面内横向位移相等[1~8]。但由于电流变材料在电场作用下, 一般为类固体, 其弹性模量远低于表面约束层。而芯层材料较软的夹层结构, 在振动过程中, 中间芯层除了存在剪切应变外, 可能还有厚度方向的挤压变形[9~11]。

本文作者将电流变材料视为可压缩的软粘弹性材料, 假设上、下弹性层的横向变形不完全相等, 电流变材料层的横向位移沿厚度方向线性变化。基于能量原理和有限元方法建立了电流变夹层梁的挤压-剪切动力学模型。对不同电场强度及芯层厚度

收稿日期: 2004-12-17; **收修改稿日期**: 2005-06-10
基金项目: 国家自然科学基金(50390063); 国防科技重点实验室基金(51463040403JW0301)
通讯作者: 孟 光, 教授, 主要研究方向为动力学与振动控制, 智能材料与结构 E-mail: gmeng@sjtu.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的夹层梁上、下弹性约束层的横向位移响应特性进行了仿真分析，并进行了实验验证。

1　动力学模型的建立

图 1 为一典型的电流变夹层梁结构，由上、下两个弹性约束层和一个电流变材料层组成。其中 L 为梁的长度，b 为梁的宽度，h 为每层的厚度，下标 1、2、3 分别代表上层、中层、下层。

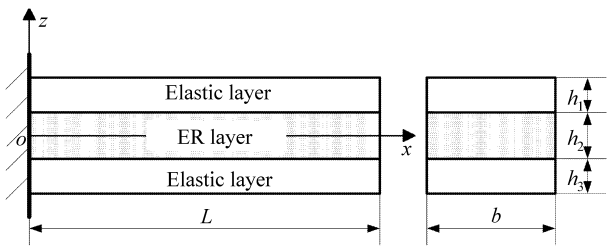


图 1　三层电流变夹层梁结构示意图

Fig. 1　Configuration of a sandwich beam filled with ER fluid

采用图 1 中的坐标系统，令 $z_1 = (h_1 + h_2)/2$ 及 $z_3 = -(h_2 + h_3)/2$，则上、下弹性层中任一点的位移 $u^i(x,z,t)$、$w^i(x,z,t)$ $(i = 1,3)$ 可表示为

$$u^1(x,z,t) = u_1(x,t) - (z - z_1)\frac{\partial w_1(x,t)}{\partial x} \tag{1}$$

$$w^1(x,z,t) = w_1(x,t) \tag{2}$$

及

$$u^3(x,z,t) = u_3(x,t) - (z - z_3)\frac{\partial w_3(x,t)}{\partial x} \tag{3}$$

$$w^3(x,z,t) = w_3(x,t) \tag{4}$$

其中：$u_1(x,t)$、$u_3(x,t)$、$w_1(x,t)$、$w_3(x,t)$ 分别为夹层梁上、下弹性层的中间平面轴向位移与横向位移；h_1、h_2、h_3 分别为夹层梁上弹性层、电流变层和下弹性层的厚度；z 为厚度方向的坐标值。

考虑到电流变材料层的可压缩性，设其横向和轴向位移分别为厚度的一阶和二阶函数。假设各层之间不存在相对滑动，由界面间的位移连续条件可以得到电流变层的位移场为[12]

$$u^2(x,z,t) = \frac{1}{2}(u_1 + u_3) + \frac{z}{h_2}(u_1 - u_3) + \frac{1}{4}\left(h_1\frac{\partial w_1}{\partial x} - h_3\frac{\partial w_3}{\partial x}\right) + \frac{z}{2h_2}\left(h_1\frac{\partial w_1}{\partial x} + h_3\frac{\partial w_3}{\partial x}\right) + \left(\frac{4z^2}{(h_2)^2} - 1\right)\psi_2 \tag{5}$$

$$w^2(x,z,t) = \frac{1}{2}(w_1 + w_3) + \frac{1}{h_2}(w_1 - w_3)z \tag{6}$$

将上、下弹性层视为 Euler-Bernoulli 梁，忽略弹性层的剪切应变，由线性应变位移关系得到弹性层的轴向应变分别为

$$\varepsilon_{xx}^1 = \frac{\partial u_1}{\partial x} - (z - z_1)\frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} \tag{7}$$

$$\varepsilon_{xx}^3 = \frac{\partial u_3}{\partial x} - (z - z_3)\frac{\partial^2 w_3}{\partial x^2} \tag{8}$$

由 Hooke 应力-应变关系可知弹性层的轴向力和弯矩分别为

$$N_1 = E_1 A_1\frac{\partial u_1}{\partial x} \tag{9}$$

$$N_3 = E_3 A_3\frac{\partial u_3}{\partial x} \tag{10}$$

$$M_1 = E_1 I_1\frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} \tag{11}$$

$$M_3 = E_3 I_3\frac{\partial^2 w_3}{\partial x^2} \tag{12}$$

式中：E、A、I 分别为各层的弹性模量、横截面面积和转动惯量，在电流变自适应结构中，一般可将电流变材料视为线性粘弹性材料[13]，材料参数采用复模量表示。假设只考虑剪切应变和垂直方向的法向应变，即

$$\gamma = \frac{1}{h_2}\left(u_1 - u_3 + z_1\frac{\partial w_1}{\partial x} - z_3\frac{\partial w_3}{\partial x}\right) \tag{13}$$

$$\varepsilon_{zz}^2 = \frac{\partial w^2}{\partial z} = \frac{1}{h_2}(w_1 - w_3) \tag{14}$$

则电流变材料层所受的剪切力和法向力为

$$Q_2 = G_2 b\left[(u_1 - u_3) + z_1\frac{\partial w_1}{\partial x} - z_3\frac{\partial w_3}{\partial x}\right] \tag{15}$$

$$N_{2z} = E_2 b(w_1 - w_3) \tag{16}$$

式中，G_2 为电流变材料的复模量。

故由梁的变形引起的总势能为

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \tag{17}$$

其中

$$U_1 = \int_0^L \frac{(N_1)^2}{2E_1A_1}\mathrm{d}x + \int_0^L \frac{(M_1)^2}{2E_1I_1}\mathrm{d}x = \frac{1}{2}\int_0^L E_1A_1(u_{1,x})^2\mathrm{d}x + \frac{1}{2}\int_0^L E_1I_1(w_{1,xx})^2\mathrm{d}x$$

$$U_2 = \int_0^L \frac{(N_{2z})^2}{2E_2A_2}\mathrm{d}x + \int_0^L \frac{(Q_2)^2}{2G_2A_2}\mathrm{d}x = \frac{1}{2}\int_0^L \frac{E_2b}{h_2}(w_1 - w_3)^2\mathrm{d}x + \frac{1}{2}\int_0^L \frac{G_2b}{h_2}\left[(u_1 - u_3) + z_1w_{1,x} - z_3w_{3,x}\right]^2\mathrm{d}x$$

$$U_3 = \int_0^L \frac{(N_3)^2}{2E_3A_3}\mathrm{d}x + \int_0^L \frac{(M_3)^2}{2E_3I_3}\mathrm{d}x = \frac{1}{2}\int_0^L E_3A_3(u_{3,x})^2\mathrm{d}x + \frac{1}{2}\int_0^L E_3I_3(w_{3,xx})^2\mathrm{d}x$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

而系统的总动能为

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \tag{18}$$

其中

$$T_1 = \frac{1}{2}\int_0^L \{\rho_1 A_1 [(\dot{u}_1)^2 + (\dot{w}_1)^2] + \rho_1 I_1 (\dot{w}_{1,x})^2\} \mathrm{d}x$$

$$\begin{aligned} T_2 = \frac{1}{2}\int_0^L \rho_2 A_2 \Big[& \frac{1}{3}(\dot{u}_1)^2 + \frac{1}{3}(\dot{u}_3)^2 + \frac{1}{3}\dot{u}_1\dot{u}_3 + \\ & \frac{1}{12}h_1^2(\dot{w}_{1,x})^2 + \frac{1}{12}h_3^2(\dot{w}_{3,x})^2 - \\ & \frac{1}{12}h_1 h_3 \dot{w}_{1,x}\dot{w}_{3,x} + \frac{1}{3}h_1\dot{u}_1\dot{w}_{1,x} - \\ & \frac{1}{6}h_3\dot{u}_1\dot{w}_{3,x} + \frac{1}{6}h_1\dot{u}_3\dot{w}_{1,x} - \frac{1}{3}h_3\dot{u}_3\dot{w}_{3,x} + \\ & \frac{1}{3}(\dot{w}_1)^2 + \frac{1}{3}(\dot{w}_3)^2 + \frac{1}{3}\dot{w}_1\dot{w}_3 \Big] \mathrm{d}x \end{aligned}$$

$$T_3 = \frac{1}{2}\int_0^L \{\rho_3 A_3 [(\dot{u}_3)^2 + (\dot{w}_3)^2] + \rho_3 I_3 (\dot{w}_{3,x})^2\} \mathrm{d}x$$

式中：ρ_i为第 i 层的材料密度，U_i、T_i $(i = 1,2,3)$ 分别为每层的动能和势能，符号上的点代表对时间 t 求导，下标 x 表示对 x 求导。

将以上各层的动能和势能代入 Hamilton 变分公式

$$\delta\int_0^t (T - U)\mathrm{d}t = 0 \tag{19}$$

可得到电流变夹层梁的自由振动动力学方程为

$$\rho_1 A_1 \ddot{u}_1 + \rho_2 A_2\left(\frac{1}{3}\ddot{u}_1 + \frac{1}{6}\ddot{u}_3 + \frac{1}{6}h_1\ddot{w}_{1,x} - \frac{1}{12}h_3\ddot{w}_{3,x}\right) - E_1 A_1 u_{1,xx} + \frac{G_2 b}{h_2}(u_1 - u_3 + z_1 w_{1,x} - z_2 w_{3,x}) = 0$$

$$\rho_3 A_3 \ddot{u}_3 + \rho_2 A_2\left(\frac{1}{6}\ddot{u}_1 + \frac{1}{3}\ddot{u}_3 + \frac{1}{12}h_1\ddot{w}_{1,x} - \frac{1}{6}h_3\ddot{w}_{3,x}\right) - E_3 A_3 u_{3,xx} - \frac{G_2 b}{h_2}(u_1 - u_3 + z_1 w_{1,x} - z_2 w_{3,x}) = 0$$

$$\begin{aligned} & \rho_2 A_2\left(\frac{1}{3}\ddot{w}_1 + \frac{1}{6}\ddot{w}_3 - \frac{1}{6}h_1\ddot{u}_{1,x} - \frac{1}{12}h_1\ddot{u}_{3,x} - \frac{1}{12}h_1^2\ddot{w}_{1,xx} + \frac{1}{24}h_1 h_3\ddot{w}_{3,xx}\right) + \rho_1 A_1\ddot{w}_1 - \rho_1 I_1\ddot{w}_{1,xx} + \\ & E_1 I_1 w_{1,xxxx} - \frac{G_2 b z_1}{h_2}(u_{1,x} - u_{3,x} + z_1 w_{1,xx} - z_3 w_{3,xx}) + \frac{E_2 b}{h_2}(w_1 - w_3) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \rho_2 A_2\left(\frac{1}{6}\ddot{w}_1 + \frac{1}{3}\ddot{w}_3 + \frac{1}{12}h_3\ddot{u}_{1,x} + \frac{1}{6}h_3\ddot{u}_{3,x} + \frac{1}{24}h_1 h_3\ddot{w}_{1,xx} - \frac{1}{12}h_3^2\ddot{w}_{3,xx}\right) + \rho_3 A_3\ddot{w}_3 - \rho_3 I_3\ddot{w}_{3,xx} + \\ & E_3 I_3 w_{3,xxxx} + \frac{G_2 b z_3}{h_2}(u_{1,x} - u_{3,x} + z_1 w_{1,xx} - z_3 w_{3,xx}) - \frac{E_2 b(w_1 - w_3)}{h_2} = 0 \end{aligned} \tag{20}$$

2 动力学方程的有限元求解

前面建立的振动方程为一组由上、下弹性层变形位移表示的强耦合偏微分方程，目前常用的求解方法主要有假设模态法和有限元法，本文作者采用有限元法。

采用两个节点的梁单元，每个节点有 6 个自由度，节点位移矢量为

$$\{\Delta_i\} = \{u_{1j} \quad w_{1j} \quad w_{1j,x} \quad u_{2j} \quad w_{2j} \quad w_{2j,x} \quad u_{1k} \quad w_{1k} \quad w_{1k,x} \quad u_{2k} \quad w_{2k} \quad w_{2k,x}\}^{\mathrm{T}} \tag{21}$$

式中，j、k 为单元节点编号。

单元内任意点的位移$\{u_1 \quad w_1 \quad u_2 \quad w_2\}^{\mathrm{T}}$可以由单元节点位移矢量插值得到

$$\{u_1 \quad w_1 \quad u_2 \quad w_2\}^{\mathrm{T}} = \{N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4\}^{\mathrm{T}}\{\Delta_i\} \tag{22}$$

其中

$$[N_1] = [1 - \xi \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \xi \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$[N_2] = [0 \quad 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 \quad (\xi - 2\xi^2 + \xi^3)L_i \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 3\xi^2 - 2\xi^3 \quad (-\xi^2 + \xi^3)L_i \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$[N_3] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 - \xi \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \xi \quad 0 \quad 0]$$

$$[N_4] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 \quad (\xi - 2\xi^2 + \xi^3)L_i \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 3\xi^2 - 2\xi^3 \quad (-\xi^2 + \xi^3)L_i]$$

式中：$[N_1]$、$[N_2]$、$[N_3]$和 $[N_4]$为对应单元节点位移的形函数矩阵，$\xi = x/L_i$，L_i 为第 i 个单元长度。

将式(22)代入前面的动力学方程，可以得到第 i 个单元的有限元自由振动方程

$$[M_i]\{\ddot{\Delta}_i\} + [K_i]\{\Delta_i\} = 0 \tag{23}$$

其中

$$[M_i] = [M_{1i}] + [M_{2i}] + [M_{3i}]$$

$$[K_i] = [K_{1i}] + [K_{2i}] + [K_{3i}]$$

式中：$[M_i]$为单元质量矩阵，$[K_i]$为单元刚度矩阵，1、2、3 分别代表上弹性层，电流变层及下弹性层。

采用单元集成方法对单元物理坐标集成，得到电流变复合梁的总体运动方程为

$$[M]\{\ddot{\Delta}\} + [K]\{\Delta\} = 0 \tag{24}$$

3 仿真分析

将电流变材料视为线性粘弹性材料，设其剪切

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模量为

$$G_2 = G' + G'' \tag{25}$$

式中，G'、G''分别为电流变材料的储能模量和耗能模量，通常可表示为电场强度 E 的函数[3]

$$\begin{aligned} G'(E) &= aE^2 \\ G''(E) &= bE + c \end{aligned} \tag{26}$$

在大多数文献中，一般令粘弹性材料的弹性模量等于其两倍剪切模量[10,14]。故可令电流变材料的弹性模量为

$$E_2 = 2G_2 = 2(G' + G'') \tag{27}$$

表 1　夹层梁的几何尺寸与材料参数

Table 1　Parameters of the sandwich beam

Geometrical properties of beam/ mm	$L = 381.00$, $b = 25.40$, $h_1 = h_3 = 0.79$, $h_2 = 0.50$
Density of elastic layer/ (kg·m^{-3})	$\rho_1 = \rho_3 = 2700$
Modulus of elastic layer/ Pa	$E_1 = E_3 = 70 \times 10^9$, $G_1 = G_3 = 0$
Density of ER fluids layer/ (kg·m^{-3})	$\rho_2 = 1700$
Modulus of ER fluids layer/ Pa	$G_2 = G' + G''$, $E_2 = 2G_2$ $G' \doteq 50000\ E^2$, $G'' \doteq 2600\ E + 1700$

为了验证本文中建模方法的准确性与可靠性，采用表 1 中梁的几何尺寸与材料参数[3]（其中 E 为电场强度），分别取不同的单元数对悬臂梁结构进行有限元计算。计算发现当单元数大于 20 个时，计算结果基本不变，故在本文中，均取 20 个单元进行计算。表 2 为电场强度 $E = 3.5$ kV/ mm 时梁的前五阶固有频率。从表 2 中可以看出，本文中建模方法所得的各阶固有频率均高于文献[3]基于 Mead-Markus 建模方法所得的结果，但相差不大。这主要是由于有限元法是基于 Rayleigh-Ritz 法原理，其所得到的特征值是系统真实特征值的上限。而 Don[4]在对上述参数的电流变简支梁的实验测试中发现，由 Mead-Markus 模型计算得到的理论值均低于梁的实际固有频率。故有限元模型可能比 Mead-Markus 模型具有更高的计算精度。

对图 1 中长度为 L 的三层电流变夹层悬臂梁，采用表 1 的几何和材料参数，在频域内对自由端上、下弹性层的横向位移响应进行仿真分析。图 2 为梁的自由端在无电场（$E = 0$）和有电场（$E = 1.5$ kV/ mm）时的横向位移频响图。从图 2 中可以看出，在低频阶段，上、下层的横向位移基本一致；而在高频阶段，上、下层的振动幅值出现明显差异，且随着频率的升高其差异加大。同时，比较图 2(a)与 2(b)可以发现，在电场作用下，上、下层横向位移出现明显差异的频率提高了，如在没加电场时，从 100 Hz 左右开始出现上、下层横向位移不一致；而有电场作用时，频率提高到了 400 Hz 左右。这主要是由于在电场作用下，电流变材料从液体向类固体转变，其弹性模量和剪切模量提高，使中间的电流变材料层变硬，可压缩性降低。

表 2　电场强度 $E = 3.5$ kV/ mm 时悬臂梁的前五阶固有频率

Table 2　First five natural frequencies of the cantilever ER sandwich beam when $E = 3.5$ kV/ mm

Frequency/ Hz	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
This model	10.023	42.546	97.160	168.756	262.184
Reference[3]	10.005	40.051	89.028	152.702	235.761

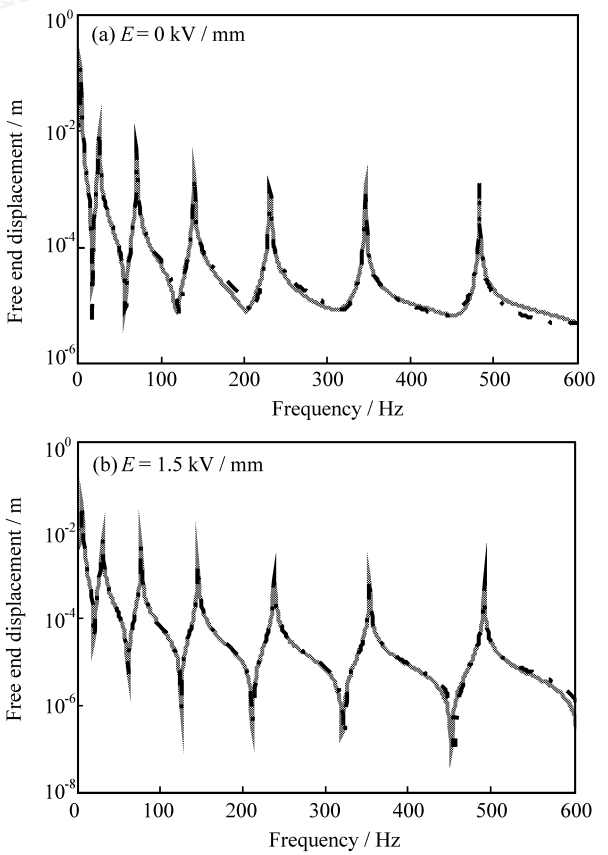


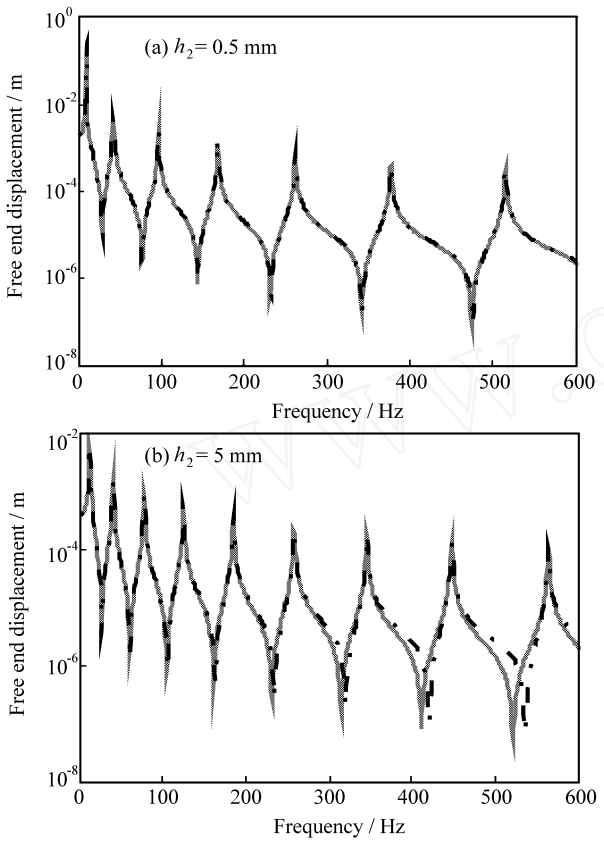
图 2　不同电场作用时上、下弹性层的横向位移响应曲线

Fig. 2　Transverse response of the beam at different electric fields

电流变材料层的厚度对横向位移的影响见图 3。图 3(a)为与前面参数相同的梁在外加电场等于 1 kV/ mm 时的末端横向位移频响曲线，图 3(b)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为将电流变材料层的厚度加大 10 倍（h_2 = 5 mm）时的位移响应曲线。通过比较可以发现，随着厚度的增加，梁的振动幅值减小，共振频率降低，上、下层的横向位移差异加大。故当电流变材料层的厚度远大于表面弹性层的厚度时，为了获得精确的振动控制模型，在建模中应该考虑电流变材料层横向位移沿厚度方向的变化。



3　电流变材料层厚度不同时上、下弹性层的横向位移响应曲线

Fig. 3　Effect of the ER layer thickness on the transverse response

4　实验验证

为了观察电流变梁的实际响应特性，设计制作了一根长 300 mm，宽 35 mm 的电流变夹层梁进行实验测试。梁的上下表面层采用 0.5 mm 厚的铝合金板。电流变材料层的厚度为 2 mm，四边用 2 mm ×2 mm 的橡胶条密封。电流变液为淀粉和甲基硅油配制而成，其体积比为 10 %。两个非接触式电涡流传感器安装在梁的宽度中线上距离根部 17 mm 的测点，用来测量夹层梁上下表面层的横向位移。得到的位移信号输入 DP 动态分析仪进行 FFT 变换，即可获得梁的位移频响图。图 4 为实验设备示意图。

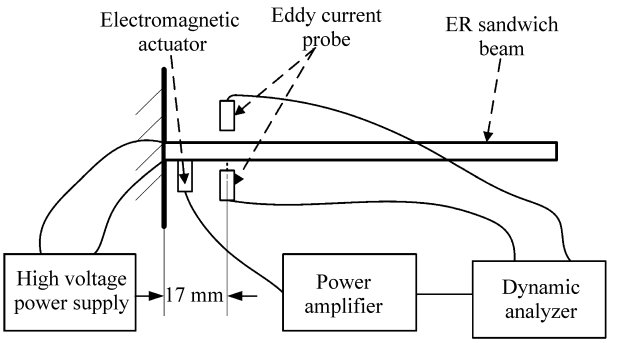


图 4　实验设备示意图

Fig. 4　The schematic diagram of experimental setup for measuring frequency response of the ER beam

对上述电流变夹层梁分别加 0、1、2 kV/ mm 的电场，测得距离梁根部 17 mm 处上下表面层的横向位移频响曲线（图 5）。从图 5 可以看到，上下层的位移并不完全一致。随着频率的升高，位移相差越大，变化趋势与前面理论结果基本相同，说明了前面理论分析是可靠的，即在高频和所加电场强度较低时，应该考虑到夹层梁上、下层横向位移的不一致。同时，由图 5 还可发现，电场强度的增大使梁的固有频率向右移动的同时，将显著降低振动幅值，实验验证了电流变液对梁的振动具有移频和降幅的作用。

5　结　论

本文中将电流变材料考虑为可压缩的软粘弹性材料，在建模中假设电流变材料层的横向位移随厚度方向线性变化，建立了电流变夹层梁的剪切-压缩动力学模型，并采用有限元方法进行了离散求解。通过对悬臂梁的仿真和实验分析得出：在电流变夹层梁的振动过程中，上下层的横向位移并不相等，在低频阶段相差不大，但在高频阶段较为明显；加大外加电场的强度，可以减小横向位移的差值；而电流变层厚度的增加，将使横向位移的差值加大。故对于低电场作用下和大厚度中间层的电流变夹层梁，为了得到精确的振动控制模型，在建模中应该考虑到芯层的可压缩性。

参考文献：

[1]　Berg C D, Evans L F, Kermode P R. Composite structure analysis of a hollow cantilever beam filled with electro-rheological fluid [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1996, 7(5): 494 - 502.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

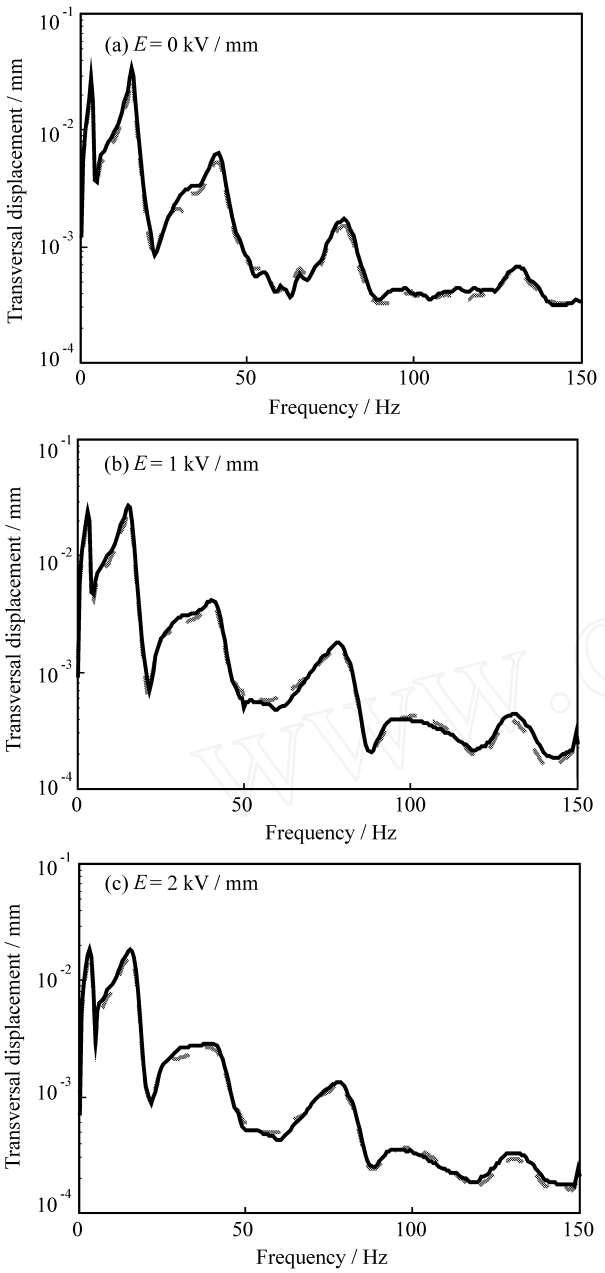


图 5　不同电场强度下电流变梁横向位移的实验频响曲线

Fig. 5　Experimental frequency response of transversal displacement at different electric fields

[2] Yalcintas M, Coulter J P. Analytical modeling of electrorheological material based adaptive beams [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1995, 6(4): 488 - 497.

[3] Yalcintas M, Coulter J P. Electrorheological material based adaptive beams subjected to various boundary conditions [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1995, 6(5): 700 - 717.

[4] Don D L, Coulter J P. Analytical and experimental investigation of electrorheological material based adaptive beam structures [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1995, 6(6): 846 - 853.

[5] Leng J S, Asundi A. Active vibration control system of smart structures based on FOS and ER actuator [J]. *Smart Materials and Structures*, 1999, 8(2): 252 - 256.

[6] **任建亭, 闫云聚, 姜节胜. 电流变夹层梁的动力学分析** [J]. **复合材料学报**, 2002, 19(3): 114 - 119.
Ren J T, Yan Y J, Jiang J S. Analytic modeling of an electrorheological sandwich beam [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(3): 114 - 119.

[7] **鲁宏权, 孟　光. 电流变夹层板结构的动态特性分析** [J]. **西北工业大学学报**, 2002, 18(3): 452 - 456.
Lu H Q, Meng G. Study on the dynamic properties of a sandwich plate with electro-rheological fluid [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2000, 18(3): 452 - 456.

[8] Yeh J Y, Chen L W, Wang C C. Dynamic stability of a sandwich beam with a constrained layer and electrorheological fluid core [J]. *Composite Structures*, 2004, 64(1): 47 - 54.

[9] Plagianakos T S, Saravanos D A. High-order layerwise mechanics and finite element for the damped dynamic characteristics of sandwich composite beams [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(24 - 25): 6853 - 6871.

[10] Sun D, Tong L. A compressional-shear model for vibration control of beams with active constrained layer damping [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46(9): 1307 - 1325.

[11] Frostig Y, Thomsen O T. High-order free vibration of sandwich panels with a flexible core [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(5 - 6): 1697 - 1724.

[12] Demiray S, Becker W, Hohe J. A triangular v. Kármán type finite element for sandwich plates with transversely compressible core [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193(23 - 26): 2239 - 2260.

[13] Kamath G M, Wereley N M. Nonlinear viscoelastic-plastic model for electrorheological fluids [J]. *Smart Materials and Structures*, 1997, 6(3): 351 - 359.

[14] Baber T T, Maddox R A, Orozco C E. Finite element model for harmonically excited viscoelastic sandwich beams [J]. *Computers and Structures*, 1998, 66(1): 105 - 113.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net