

文章编号:1000-582X(2010)02-0001-07

主动约束层阻尼结构的振动控制

郑玲,王宜,谢熔炉

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:基于弹性、粘弹性和压电材料的本构关系,利用 Hamilton 原理,推导了主动约束层阻尼板的有限元动力学模型。结合压电材料的机电耦合特性,采用自感电压的位移和速度反馈,对主动约束层阻尼板进行了闭环振动控制,研究了不同控制增益条件下,主动约束层阻尼板的动态特性。研究表明:采用自感电压的比例、微分反馈控制,能有效控制约束层阻尼板的振动,增大振动能量耗散,尤其对频率共振峰有明显抑制作用。由于该方法结构简单,容易实现,有很好的工程应用前景。

关键词:主动约束层阻尼;粘弹性材料;比例微分控制;振动控制;有限元法

中图分类号:TB 535; TH 113

文献标志码:A

Vibration control of active constrained layer damping structure

ZHENG Ling, WANG Yi, XIE Rong-lu

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: A finite element dynamic model for plates with active constrained layer damping (ACL D) treatments is derived based on the constitutive equations of elastic, viscoelastic and piezoelectric materials by application of Hamilton principle. The closed-loop control system considering displacement and velocity feedback of self-sensing voltage from sensor layer is developed. The dynamic behaviors of active constrained layer damping (ACL D) plates including nature frequencies, loss factors and responses in frequency domain are investigated. The influence of control gains on vibration suppression is discussed. Numerical examples demonstrate the validity of the finite element model and the control strategy approach. The proposed control strategy can be widely used to structure vibration control with ACL D patches due to its simple scheme and easy implementation.

Key words: active constrained layer damping; viscoelastic material; proportional differential control; vibration control; finite element method

1984 年,波音公司的工程师 Miles 等首次将约束层阻尼(Constrained Layer Damping, CLD)技术

应用到波音飞机舱室的减振降噪。之后,约束层阻尼广泛应用于汽车、飞机及水下航行器等领域^[1-3]。

收稿日期:2009-11-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50775225)

作者简介:郑玲(1963-),女,重庆大学教授,博士生导师,主要从事智能结构与系统,振动与噪声控制研究,

(Tel)023-65106094;(E-mail)zling@cqu.edu.cn。

约束层阻尼属于被动阻尼减振技术,尽管约束层的应用,大大增强了自由层阻尼的振动能量耗散,对结构高频振动起到很好的抑制作用,但是,对结构低频振动的减振降噪效果却不理想。为了进一步拓宽约束层阻尼结构减振降噪的频率范围,Baz 提出了主动约束层阻尼 (Active Constrained Layer Damping, ACLD) 的概念。它利用压电材料代替约束层,通过反馈控制主动调节粘弹性材料的剪切变形,实现了主体结构的振动控制。之后,ACLD 结构被广泛研究^[4-8],并开始在直升机悬翼^[9]、飞机机身^[10]及飞机起落架振动控制上获得应用^[11]。

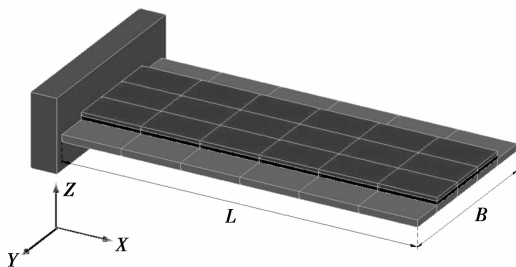


图 1 局部覆盖主动约束层阻尼的悬臂板

主动约束层阻尼的控制方法主要有边界控制、比例微分控制、最优控制、自适应控制等。Baz 研究了闭环反馈比例控制对 ACLD 悬臂板振动特性的影响,并进行了实验验证。Lam 等研究了 LQR 最优控制方法,设计了 ACLD 结构的 LQR 最优控制器^[12]。Liao 等采用 LQR 最优控制策略,研究了 ACLD 结构的配置对控制力的需求和振动抑制效果^[13]。Baz 研究了边界控制方法,设计了 H_2 鲁棒控制器,仿真结果表明,当 ACLD 结构的参数发生变化时, H_2 控制器的稳定控制边界仍然有效^[14]。在上述控制方法中,LQR 对模型依赖程度比较高,但在外界扰动和模型参数变化较小时,有很好的控制效果。鉴于粘弹性材料的特性随温度和频率而变化,加上结构环境的变化,因此,鲁棒控制展示了广阔的应用前景。比例微分控制结构简单,在工程上易于实现,只要将控制增益维持在一定范围内,其稳定的振动控制目标是完全可以实现的。

板壳结构在工程上有广泛的应用,对板壳结构实施主、被动一体化振动控制具有重要的理论意义和工程应用价值。笔者采用一阶剪切变形理论 (FSDT),建立弹性材料的本构关系;采用复剪切模量模型描述粘弹性材料特性;结合压电材料的机电耦合特性,建立局部覆盖主动约束层阻尼板的有限元动力学模型。在此基础上,应用比例微分控制

(PD)方法对局部覆盖主动约束层阻尼板进行振动控制,研究不同控制增益对结构振动响应特性的影响。

1 有限元动力学模型

图 1 是局部覆盖主动约束层阻尼的悬臂板。图 2 是主动约束层阻尼单元,它由基板、粘弹性材料层和压电薄膜约束层构成。

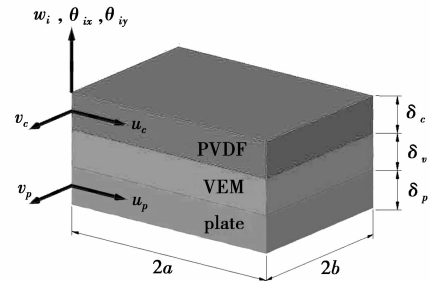


图 2 ACLD 板单元及局部坐标

在建立模型以前,先做如下假设:

- (1)各层材料满足材料力学的基本假设。
- (2)基板及约束层应变位移关系满足 Kirchhoff 假设。
- (3)结构阻尼主要由粘弹性芯层的剪切变形引起。
- (4)各层同一坐标点在 z 方向的横向位移相等。
- (5)各层材料之间粘贴牢固,层间无相对滑动。
- (6)各层材料的转动惯量忽略不计。
- (7)压电约束层上所施加的电压均匀分布,压电约束层沿厚度方向被极化,且仅在垂直板面方向有外加电场 E_3 作用。

1.1 运动关系

ACLD 板单元的运动关系如图 3 所示,粘弹性材料层在 x 方向和 y 方向的位移分别为

$$u_v = \frac{1}{2} \left[(u_c + u_p) + \frac{\delta_c - \delta_p}{2} \frac{\partial w}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$v_v = \frac{1}{2} \left[(v_c + v_p) + \frac{\delta_c - \delta_p}{2} \frac{\partial w}{\partial y} \right]. \quad (2)$$

式中 u_p, u_v, u_c 分别为基板、粘弹性层、压电层的中性面在 x 方向的位移; v_p, v_v, v_c 分别为基板、粘弹性材料层、压电材料层的中性面在 y 方向的位移; $\delta_p, \delta_v, \delta_c$ 分别为基板、粘弹性材料层、压电材料层的厚度。粘弹性层绕 x 轴方向和 y 轴方向转动所产生的剪切应变为

$$\beta_x = \frac{u_c - u_p}{\delta_v} + \frac{d}{\delta_v} \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\beta_y = \frac{v_c - v_p}{\delta_v} + \frac{d}{\delta_v} \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (4)$$

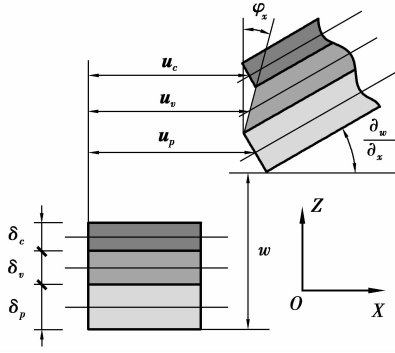


图 3 ACLD 板单元的运动关系

式中 $d = \frac{\delta_c + \delta_p}{2} + \delta_v$; δ_v 为粘弹性层的厚度。

1.2 单元自由度及位移模式

如图 2 所示, ACLD 板单元模型采用 4 节点矩形单元, 每个节点有 7 个自由度 $u_c, v_c, u_p, v_p, w, \theta_x, \theta_y$, 分别为压电材料层中性面内 x 方向及 y 方向的位移, 基板中性面内 x 方向及 y 方向的位移, 复合板中性面的横向位移, 以及绕 x 轴方向和 y 轴方向的转角。ACLD 板单元的节点位移矢量为

$$\{\Delta_i\} = \{u_{ci} \quad v_{ci} \quad u_{pi} \quad v_{pi} \quad w_i \quad \theta_{xi} \quad \theta_{yi}\}^T. \quad (5)$$

其中 $i=1, 2, 3, 4$ 。

ACLD 板单元的位移矢量为

$$\{\Delta^{(e)}\} = \{\Delta_1^T \quad \Delta_2^T \quad \Delta_3^T \quad \Delta_4^T\}^T. \quad (6)$$

1.3 单元位移模式及形函数

单元位移模式分别为

$$\left. \begin{aligned} u_c &= a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 xy; \\ v_c &= a_5 + a_6 x + a_7 y + a_8 xy; \\ u_p &= a_9 + a_{10} x + a_{11} y + a_{12} xy; \\ v_p &= a_{13} + a_{14} x + a_{15} y + a_{16} xy; \\ w &= a_{17} + a_{18} x + a_{19} y + a_{20} x^2 + a_{21} xy + a_{22} y^2 + \\ & a_{23} x^3 + a_{24} x^2 y + a_{25} xy^2 + a_{26} y^3 + a_{27} x^3 y + a_{28} xy^3; \\ \theta_x &= \frac{\partial w}{\partial y}, \\ \theta_y &= -\frac{\partial w}{\partial x}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ACLD 板单元内任意点的位移矢量为

$$\{u_c \quad v_c \quad u_p \quad v_p \quad w \quad \theta_x \quad \theta_y\}^T = \{[N_{uc}] \quad [N_{vc}] \quad [N_{up}] \quad [N_{vp}] \quad [N_w] \quad [N_{w,x}] \quad [N_{w,y}]\}^T \{\Delta^{(e)}\}. \quad (8)$$

式中 $[N_{uc}], [N_{vc}], [N_{up}], [N_{vp}], [N_w], [N_{w,x}], [N_{w,y}]$ 分别为对应单元节点自由度 $u_c, v_c, u_p, v_p, w, \theta_x, \theta_y$ 的形函数矩阵。

将单元自由度对应的形函数矩阵代入式(1)-(4)中, 可以得到粘弹性层的位移 u_v, v_v 的形函数矩阵

$$[N_{uv}] = \frac{1}{2} \left[([N_{uc}] + [N_{up}]) + \frac{\delta_c - \delta_p}{2} [N_{w,x}] \right], \quad (9)$$

$$[N_{vv}] = \frac{1}{2} \left[([N_{vc}] + [N_{vp}]) + \frac{\delta_c - \delta_p}{2} [N_{w,y}] \right]. \quad (10)$$

粘弹性层的剪切应变 β_x, β_y 的形函数矩阵为

$$[N_{\beta xv}] = \frac{1}{\delta_v} \left[([N_{uc}] - [N_{up}]) + \left(\frac{\delta_c + \delta_p}{2} + \delta_v \right) [N_{w,x}] \right], \quad (11)$$

$$[N_{\beta yv}] = \frac{1}{\delta_v} \left[([N_{vc}] - [N_{vp}]) + \left(\frac{\delta_c + \delta_p}{2} + \delta_v \right) [N_{w,y}] \right]. \quad (12)$$

1.4 有限元动力学方程

采用能量法和虚功原理分别对 ACLD 板单元各层的动能和势能列写虚功方程, 可以得到 ACLD 板单元各层的质量矩阵和刚度矩阵以及 ACLD 板单元的质量矩阵和刚度矩阵。

ACLD 板单元各层板的动能为

基板

$$T_p^e = \frac{1}{2} \rho_p \delta_p \iiint_V \left[\left(\frac{\partial u_p}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_p}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dV = \frac{1}{2} \{\dot{\Delta}^{(e)}\}^T [M_p^{(e)}] \{\dot{\Delta}^{(e)}\}. \quad (13)$$

基板的质量矩阵为

$$[M_p^{(e)}] = \rho_p \delta_p \int_0^a \int_0^b ([N_{up}]^T [N_{up}] + [N_{vp}]^T [N_{vp}] + [N_w]^T [N_w]) dx dy. \quad (14)$$

粘弹性层

$$T_v^e = \frac{1}{2} \rho_v \delta_v \iiint_V \left[\left(\frac{\partial u_v}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_v}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dV = \frac{1}{2} \{\dot{\Delta}^{(e)}\}^T [M_v^{(e)}] \{\dot{\Delta}^{(e)}\}. \quad (15)$$

粘弹性层的质量矩阵为

$$[M_v^{(e)}] = \rho_v \delta_v \int_0^a \int_0^b ([N_{uv}]^T [N_{uv}] + [N_{vv}]^T [N_{vv}] + [N_w]^T [N_w]) dx dy. \quad (16)$$

压电层

$$T_c^e = \frac{1}{2} \rho_c \delta_c \iiint_V \left[\left(\frac{\partial u_c}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_c}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dV = \frac{1}{2} \{\dot{\Delta}^{(e)}\}^T [M_c^{(e)}] \{\dot{\Delta}^{(e)}\}. \quad (17)$$

压电层的质量矩阵为

$$[\mathbf{M}_c^{(e)}] = \rho_c \delta_c \int_0^a \int_0^b ([\mathbf{N}_{uc}]^T [\mathbf{N}_{uc}] + [\mathbf{N}_{xc}]^T [\mathbf{N}_{xc}] + [\mathbf{N}_{wc}]^T [\mathbf{N}_{wc}]) dx dy. \quad (18)$$

ACLD 板单元的质量矩阵为

$$[\mathbf{M}^{(e)}] = [\mathbf{M}_p^{(e)}] + [\mathbf{M}_v^{(e)}] + [\mathbf{M}_c^{(e)}]. \quad (19)$$

下标“ p , v , c ”为基板、粘弹性层、压电层, ρ_p , ρ_v , ρ_c 为基板、粘弹性层、压电层的密度。

ACLD 板单元各层的势能为

基板

$$E_p^e = \frac{1}{2} \iiint_V \boldsymbol{\varepsilon}_p^{*T} \boldsymbol{\sigma}_p dV = \frac{1}{2} \{\dot{\boldsymbol{\Delta}}^{(e)}\}^T [\mathbf{K}_p^{(e)}] \{\dot{\boldsymbol{\Delta}}^{(e)}\}. \quad (20)$$

基板的刚度矩阵为

$$[\mathbf{K}_p^{(e)}] = \delta_p \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}_p]^T [\mathbf{D}_p] [\mathbf{B}_p] dx dy + \frac{\delta_p^3}{12} \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}_p] [\mathbf{B}] dx dy. \quad (21)$$

粘弹性层

$$E_v^e = \frac{1}{2} \iiint_V \boldsymbol{\varepsilon}_v^{*T} \boldsymbol{\sigma}_v dV = \frac{1}{2} \{\dot{\boldsymbol{\Delta}}^{(e)}\}^T [\mathbf{K}_v^{(e)}] \{\dot{\boldsymbol{\Delta}}^{(e)}\}. \quad (22)$$

$$E_{\beta v}^e = \frac{1}{2} \iiint_V (G\boldsymbol{\beta}_x^2 + G\boldsymbol{\beta}_y^2) dV = \frac{1}{2} \{\dot{\boldsymbol{\Delta}}^{(e)}\}^T [\mathbf{K}_{\beta v}^{(e)}] \{\dot{\boldsymbol{\Delta}}^{(e)}\}. \quad (23)$$

粘弹性层的质量矩阵为

$$[\mathbf{K}_v^{(e)}] = \delta_v \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}_v]^T [\mathbf{D}_v] [\mathbf{B}_v] dx dy + \frac{\delta_v^3}{12} \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}_v] [\mathbf{B}] dx dy. \quad (24)$$

$$[\mathbf{K}_{\beta v}^{(e)}] = G\delta_v \int_0^a \int_0^b ([\mathbf{N}_{\beta xv}]^T [\mathbf{N}_{\beta xv}] + [\mathbf{N}_{\beta yv}]^T [\mathbf{N}_{\beta yv}]) dx dy. \quad (25)$$

压电层

$$E_c^e = \frac{1}{2} \iiint_V \boldsymbol{\varepsilon}_c^{*T} \boldsymbol{\sigma}_c dV = \frac{1}{2} \{\dot{\boldsymbol{\Delta}}^{(e)}\}^T [\mathbf{K}_c^{(e)}] \{\dot{\boldsymbol{\Delta}}^{(e)}\}. \quad (26)$$

粘弹性层的质量矩阵为

$$[\mathbf{K}_c^{(e)}] = \delta_c \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}_c]^T [\mathbf{D}_c] [\mathbf{B}_c] dx dy + \frac{\delta_c^3}{12} \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}_c] [\mathbf{B}] dx dy. \quad (27)$$

其中

$$[\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{N}_{w}]_{,xx} \\ [\mathbf{N}_{w}]_{,yy} \\ 2[\mathbf{N}_{w}]_{,xy} \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{B}_p] = \begin{bmatrix} [\mathbf{N}_{up}]_{,x} \\ [\mathbf{N}_{vp}]_{,y} \\ [\mathbf{N}_{up}]_{,y} + [\mathbf{N}_{vp}]_{,x} \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{B}_v] = \begin{bmatrix} [\mathbf{N}_{w}]_{,x} \\ [\mathbf{N}_{w}]_{,y} \\ [\mathbf{N}_{w}]_{,y} + [\mathbf{N}_{w}]_{,x} \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{B}_c] = \begin{bmatrix} [\mathbf{N}_{w}]_{,x} \\ [\mathbf{N}_{w}]_{,y} \\ [\mathbf{N}_{w}]_{,y} + [\mathbf{N}_{w}]_{,x} \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{D}_p] = \frac{E_p}{1 - \mu_p^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu_p & 0 \\ \mu_p & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \mu_p}{2} \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{D}_v] = \frac{E_v}{1 - \mu_v^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu_v & 0 \\ \mu_v & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \mu_v}{2} \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{D}_c] = \frac{E_c}{1 - \mu_c^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu_c & 0 \\ \mu_c & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \mu_c}{2} \end{bmatrix}.$$

E_p, E_v, E_c 为基板、粘弹性层、压电层的弹性模量, μ_p, μ_v, μ_c 为基板、粘弹性层、压电层的泊松比, G 为粘弹性层的剪切模量。

ACLD 板单元的刚度矩阵为

$$[\mathbf{K}^{(e)}] = [\mathbf{K}_p^{(e)}] + [\mathbf{K}_v^{(e)}] + [\mathbf{K}_{\beta v}^{(e)}] + [\mathbf{K}_c^{(e)}]. \quad (28)$$

根据压电材料的本构关系^[11-12]和虚功原理可以得到压电层的压电作用力和压电作用力矩为

$$\{\mathbf{f}_c^{(e)}\} = \frac{1}{2} V_s \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}_c]^T [\mathbf{D}_c] \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ 0 \end{Bmatrix} dx dy, \quad (29)$$

$$\{\mathbf{m}_c^{(e)}\} = \frac{1}{2} V_s \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}_c] \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ 0 \end{Bmatrix} dx dy. \quad (30)$$

V_s 为控制电压; d_{31}, d_{32} 为压电介电常数。

因此, ACLD 板单元的压电控制力为

$$\{\mathbf{F}_c^{(e)}\} = \{\mathbf{f}_c^{(e)}\} + \{\mathbf{m}_c^{(e)}\}. \quad (31)$$

根据 Hamilton 原理, 可以导出 ACLD 板单元的动力学方程

$$[\mathbf{M}^{(e)}] \{\ddot{\boldsymbol{\Delta}}^{(e)}\} + [\mathbf{K}^{(e)}] \{\boldsymbol{\Delta}^{(e)}\} = \{\mathbf{F}^{(e)}\} + \{\mathbf{F}_c^{(e)}\}. \quad (32)$$

式中 $\{\mathbf{F}^{(e)}\}$ 为 ACLD 板单元受到的外激励。最后, 组集单元矩阵, 可获得结构的有限元动力学方程

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{\Delta}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{\Delta}\} = \{\mathbf{F}\} + \{\mathbf{F}_c\}。 \quad (33)$$

2 主动控制方法

采用比例微分(PD)控制方法对主动约束层阻尼板进行控制,其控制律为

$$\mathbf{V}^j = -(K_p + K_d p)\{\mathbf{F}_c^j\}。 \quad (34)$$

上标“j”表示覆盖 ACLD 块的第 j 个有限元单元, K_p 和 K_d 分别表示比例与微分控制增益, p 表示微分算子 d/dt 。

式(22),(23)中的控制电压 V_s 可以表示为^[15]

$$V_s = C_s \int_0^a \int_0^b [(\mathbf{u}_{p,x} + \mathbf{v}_{p,y}) - D_d(\mathbf{w}_{,xx} + \mathbf{w}_{,yy})] dx dy = [\mathbf{B}_s]\{\mathbf{\Delta}_s\}。 \quad (35)$$

$$[\mathbf{B}_s] = C_s \int_0^a \int_0^b [([\mathbf{N}_{up}]_{,x} + [\mathbf{N}_{vp}]_{,y}) - D_d([\mathbf{N}_w]_{,xx} + [\mathbf{N}_w]_{,yy})] dx dy。 \quad (36)$$

以上各式中, $C_s = \frac{k_{31}^2}{(g_{31}C)}$, 其中 k_{31} 为机电耦合系数; g_{31} 为压电电压常数; D_d 为基板中性面到基板表面的距离; $C = 8.854 \times 10^{-12} \frac{Ak_{31}}{\delta_c}$, A 为压电材料的表面积, k_{31} 为电介质常数。

将式(22)-(23),(27)-(28)代入到式(24)中,得到基于 PD 控制方法的 ACLD 板单元的压电控制力为

$$\mathbf{V}^{(e)} = K_p \left[\begin{array}{c} \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}_c]^T [\mathbf{D}_c] \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ 0 \end{Bmatrix} dx dy + \\ \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}_c] \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ 0 \end{Bmatrix} dx dy \end{array} \right] [\mathbf{B}_s]\{\mathbf{\Delta}^{(e)}\} - K_d \left[\begin{array}{c} \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}_c]^T [\mathbf{D}_c] \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ 0 \end{Bmatrix} dx dy + \\ \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}_c] \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ 0 \end{Bmatrix} dx dy \end{array} \right] [\mathbf{B}_s]\{\dot{\mathbf{\Delta}}^{(e)}\}。 \quad (37)$$

将式(30)的压电控制力替换式(25)中的 $\{\mathbf{F}_c^{(e)}\}$, 可以得到采用 PD 控制方法的 ACLD 板单元的动力学方程

$$[\mathbf{M}^{(e)}]\{\ddot{\mathbf{\Delta}}^{(e)}\} + [\mathbf{C}^{(e)}]\{\dot{\mathbf{\Delta}}^{(e)}\} + ([\mathbf{K}^{(e)}] - [\mathbf{K}_V^{(e)}])\{\mathbf{\Delta}^{(e)}\} = \{\mathbf{F}^{(e)}\}。 \quad (38)$$

式中

$$[\mathbf{C}^{(e)}] = K_d \left[\begin{array}{c} \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}_c]^T [\mathbf{D}_c] \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ 0 \end{Bmatrix} dx dy \\ 0 \\ \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}_c] \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ 0 \end{Bmatrix} dx dy \end{array} \right] [\mathbf{B}_s]。 \quad (39)$$

$$[\mathbf{K}_V^{(e)}] = K_p \left[\begin{array}{c} \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}_c]^T [\mathbf{D}_c] \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ 0 \end{Bmatrix} dx dy + \\ 0 \\ \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}_c] \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ 0 \end{Bmatrix} dx dy \end{array} \right] [\mathbf{B}_s]。 \quad (40)$$

3 算例

局部覆盖 ACLD 悬臂板见图 1 所示。各层的几何参数和物理参数为:基板: $E_p = 71 \text{ GPa}$, $\rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$, $\mu_p = 0.3$; VEM: $E_v = 52 \text{ MPa}$, $\rho_v = 1140 \text{ kg/m}^3$, $\mu_v = 0.3$; 压电层: $E_c = 2.25 \text{ GPa}$, $\rho_c = 1800 \text{ kg/m}^3$, $\mu_c = 0.3$; 基板尺寸: $L = 0.250 \text{ m}$, $B = 0.125 \text{ m}$, $\delta_p = 0.5 \text{ mm}$; ACLD 板尺寸: $L_c = L_v = 0.250 \text{ m}$, $B_c = B_v = 0.076 \text{ m}$, $\delta_v = 0.5 \text{ mm}$, $\delta_c = 28 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。 ACLD 悬臂板一端固定,另一端自由。粘弹性层的剪切模量为 $G = 20(1 + 0.5i) \text{ MPa}$ 。

为了验证有限元模型的正确性,采用本文的有限元模型计算基板、被动约束层阻尼(PCLD)和主动约束层阻尼(ACLD)前四阶模态参数,并与 ANSYS 商业有限元分析软件计算结果进行比较,结果见表 1。

表 1 基板、PCLD、ACL D 板的模态参数

	Mode 1		Mode 2		Mode 3		Mode 4	
	频率 /HZ	损耗 因子	频率 /HZ	损耗 因子	频率 /HZ	损耗 因子	频率 /HZ	损耗 因子
基 本文	6.80	—	29.27	—	42.65	—	95.36	—
板 ANSYS	6.80	—	29.64	—	42.61	—	97.92	—
PCLD	6.13	0.001 4	28.49	0.005 8	38.82	0.006 9	93.22	0.012 2
ACL D	6.35	0.001 9	28.55	0.005 9	40.14	0.007 6	93.65	0.012 1

从表 1 可知:本文计算结果与大型商业软件 ANSYS 计算结果基本吻合;由于在基板上覆盖了 VEM 层和压电层后,导致结构质量增加,因此, PCLD 板与基板相比固有频率向低频移动。ACL D 板与 PCLD 板相比,由于主动控制后,引起系统刚度增加,导致固有频率略向高频移动。

假设悬臂板自由端的节点 1 为外激励点,作用方向垂直于板面向下;悬臂板的自由端的节点 2 为动态响应测量点,研究主动约束层阻尼悬臂板的振动响应特性。

图 4 为微分控制增益 K_d 为零时,改变比例控制增益 K_p 所得到的第一阶频率的谐波频率响应曲线。从图中可以看出随着比例控制增益 K_p 的增大,响应曲线的峰值点频率向高频移动,同时响应幅值随比例控制增益 K_p 的增大而衰减。峰值点频率向高频移动的主要原因是比例控制增益 K_p 对结构刚度产生影响。

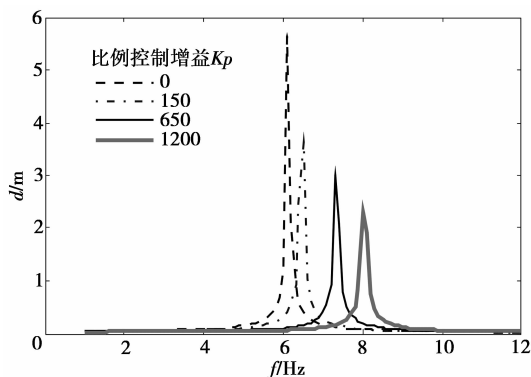


图 4 不同比例控制增益的频率响应

图 5 为比例控制增益 K_p 为零时,改变微分控制增益 K_d 所得到的第一阶频率的谐波频率响应曲线。从图中可以看到响应峰值点频率并没有随着比例控制增益 K_p 的改变而发生变化,但是响应幅值大幅降低,由于微分控制增益 K_d 仅影响结构阻尼,不影响结构刚度,因此,不会对峰值频率点的位置产

生影响。与比例控制相比较,微分控制增益代价较小,而获得的振动抑制效果更好。

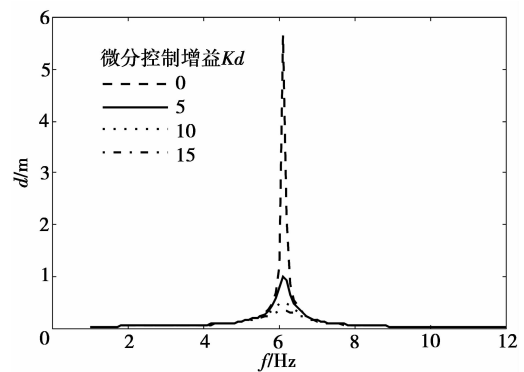


图 5 不同微分控制增益的频率响应

图 6 为基板、PCLD 板、ACL D 板的频响函数, ACL D 板控制方法为 PD 控制,比例微分增益分别为 $K_d=10, K_p=650$ 。从频响函数可以看出:无论在高频或低频段,ACL D 比 PCLD 都有更好的振动控制效果,对频率共振峰有明显的抑制作用。

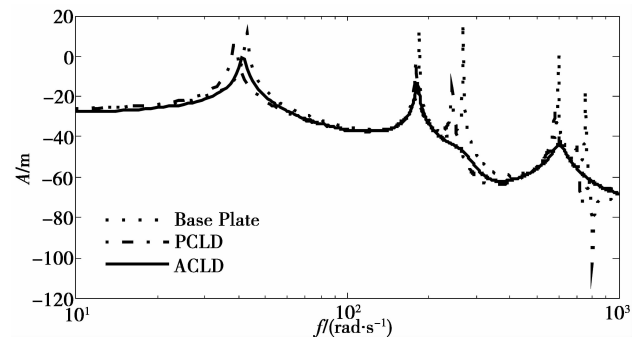


图 6 基板、PCLD、ACL D 的频响函数

4 结 论

本文建立了局部覆盖主动约束层阻尼板的有限元动力学模型,研究了基于比例微分的闭环反馈控制方法,通过算例验证了有限元动力学模型和控制

方法的有效性,分析了不同的控制增益对主动约束层阻尼板动态响应特性的影响。研究表明:

(1)建立的局部覆盖主动约束层阻尼板的有限元动力学模型是正确有效的,能准确反映结构的动力学特性。由于有限元模型的离散性和实用性,它为进一步研究主动约束层阻尼的最佳分布位置奠定了基础。

(2)通过主动约束层阻尼板自感知电压的比例微分控制,能实现宽频振动控制,特别是对频率共振峰有明显的抑制作用。与比例控制相比,微分控制所需的控制增益较小,振动控制效果更好。

参考文献

- [1] 戴德沛. 阻尼技术的工程应用[M]. 北京:清华大学出版社,1991.
- [2] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [3] RAO M D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 262(3): 457-474.
- [4] VASQUES C M A, RODRIGUES J D. Combined feedback/feed forward active control of vibration of beams with ACLD treatments: Numerical simulation [J]. *Computers and Structures*, 2008, 86 (3/5): 292-306.
- [5] KUMAR N, SINGH S P. Vibration and damping characteristics of beams with active constrained layer treatments under parametric variations [J]. *Materials and Design*, 2009, 30(10): 4162-4174.
- [6] RAY M C, SHIVAKUMAR M C. Active constrained layer damping of geometrically nonlinear transient vibrations of composite plates using piezoelectric fiber-reinforced composite [J]. *Thin-Walled Structures* 2009, 47(2): 178-189.
- [7] GANDHI F, MUNSKY B. Comparison of damping augmentation mechanisms with position and velocity feedback in active constrained layer Treatments [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and structures*, 2002, 13(5): 317-326.
- [8] DAMAREN C J, OGUAMANAM D C D. Vibration control of spacecraft box structures using collocated piezo-actuator /sensor [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2004, 15 (5): 369-374.
- [9] BADRE-ALAM A, WANG K W, GANDHI F. Optimization of enhanced active constrained layer treatment on helicopter flex-beams for aeromechanical stability augmentation [J]. *Journal of Smart Materials and Structures*, 1999(8): 182-196.
- [10] HERDIC P, BAZ A, HOUSTON R. Structural acoustics and active constrained layer damping of a full scale fuselage section: An experimental approach [C]// *International ASME Congress*, November 16-21, 1997, Dallas, TX. NCA, 1997: 43-54.
- [11] KWAK S K, WASHINGTON G, YEDARALLI R. Active and passive vibration control of landing gear components [C]// *The 1999 ASME Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE '99)*, November 14-19, 1999, Nashville, Tennessee, USA. Nashville, Tennessee: [s. n.], 1999: 269-275.
- [12] LAM M J, SAUNDERS R. Vibration control through passive constrained layer and active control [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1996, 8(8): 663-677.
- [13] LIAO W H, WANG K W. Analysis and design of viscoelastic materials for active constrained layer treatments [C]// *Proceedings of the Conference on Smart Structures and Materials: Passive Damping*, 1996, Orlando, FL, USA; IEEE, 1996: 212-223.
- [14] BAZ A. Robust control of active constrained layer damping [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 211(3): 467-480.
- [15] LEE C K. Piezoelectric laminates for torsional and bending model control: theory and experiment [D]. Ithaca, NY, USA: Cornell University, 1987.

(编辑 张小强)