

压电分流阻尼的虚拟实现

李宁¹, 程礼²

(1. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051; 2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:提出压电分流阻尼技术的虚拟实现方法,用主动控制的方法来真实地模拟被动压电分流阻尼器的效果。利用压电分流阻尼系统的动力学基本方程设计反馈控制器,建立相应于LR串联分支电路的反馈控制结构,整个闭环控制系统稳定或渐进稳定。虚拟实现方法避免了大电感的要求,可以在线调节电感和电阻的数值以适应环境的变化,克服了物理压电分流阻尼器的两大缺陷。数值仿真结果表明,虚拟实现方法能够有效地控制连续结构的振动。

关键词:压电材料;压电分流阻尼;分支电路;振动控制;虚拟实现

中图分类号: O441.6; O482.5; O469 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009 - 3516(2008)04 - 0059 - 05

压电分流阻尼技术^[1]具有结构简单,成本低和容易实现等优点,近年来受到人们的广泛关注^[2-3]。但是该技术有两个缺陷,一是当抑制低频振动时,电感的数值相当大;二是对环境的改变非常敏感,一旦被控结构的固有频率因环境而改变时,系统则会失调,大大降低压电分流阻尼技术的减振效果。为了减小电感值, Park 和 Inman^[4]提出了一个增强的被动压电分支电路,但却以牺牲振动控制的效果为代价。Fleming 等^[5-7]提出采用合成阻抗来解决大电感的问题,即利用由电压控制的电流源,运算放大器以及电阻、电感和电容等电器元件,组成一个等效电感电路,从而获得大电感值的电感,但是需要外部能源和高压电器元件。近年来人们还研究了状态开关^[8]和脉冲开关^[9-10]两类半主动压电分流阻尼技术来避免大电感的要求。

本文提出压电分流阻尼技术的虚拟实现方法。根据压电分流阻尼系统的工作原理,设计反馈控制器,用主动控制的方法模拟被动压电分流阻尼器的效果。

1 压电分流阻尼系统的动力学基本方程

不失一般性,研究如图1所示的悬臂梁,在梁上下表面同一轴向位置粘结一对相同的压电元件并与一支路电路阻抗Z相连接。

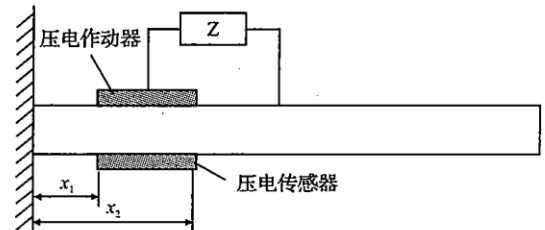


图1 具有压电分流阻尼系统的连续梁
Fig.1 Beam with piezoelectric shunt damping

对于这类同位配置的结构,可推导出压电分流阻尼系统的动力学基本方程^[11]为

$$M_b \ddot{q} + C_b \dot{q} + K_b q + C_1 \varphi Q = \hat{f} \quad (1) \quad -V + \frac{Q}{C_p} + C_1 \varphi^T q = 0 \quad (2) \quad V_s = C_1 \varphi^T q \quad (3)$$

式中: M_b , C_b 和 K_b 分别为质量、阻尼和刚度矩阵; q 为广义机械位移向量; \hat{f} 为广义力向量, $V(t)$ 和 $V_s(t)$ 分别是压电作动器和传感器的电压; Q 是压电作动器的电荷; $C_p = b(x_2 - x_1)/2\beta_{33}(h_p - h_b)$ 是压电元件的等效电容; $C_1 = h_{31}(h_p^2 - h_b^2)/(x_2 - x_1)$ 为机电耦合常数, $\varphi = [\Phi'(x_2) - \Phi'(x_1)]$; $\Phi'(x)$ 为没有压电单元和分支电

收稿日期:2007-12-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10272087)

作者简介:李宁(1964-),女,广西北海人,副教授,博士,主要从事智能结构与振动控制研究。

E-mail: lining_cheng@yahoo.com.cn

程礼(1963-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,主要从事航空发动机结构强度与振动研究。

路的悬臂梁的特征函数矩阵。

2 虚拟压电分流阻尼器

对于分支电路阻抗为 LR 串联分支电路,作用于压电作动器上的电压与作用于电感和电阻上的电压之和相等,但相位相差 180° ,所以作动器电压为

$$V(t) = -(L\ddot{Q} + R\dot{Q}) \quad (4)$$

由式(2)和式(3)可知传感器的输出电压与式(2)中的机电耦合项相等。将被控系统的动力学方程式(1)和式(3)写成二阶动力学方程和输出方程形式

$$M_b \ddot{q} + C_b \dot{q} + K_b q = \dot{f} + u \quad (5) \quad y = -C_1 \varphi^T q = -V_s \quad (6)$$

式中: u 是控制输入向量; y 为输出。考虑到式(4),将压电分流阻尼系统的电路方程式(2)写成控制器的一组二阶动力学方程和测量方程形式

$$L\ddot{Q} + R\dot{Q} + \frac{Q}{C_p} = u_c \quad (7) \quad y_c = -C_1 \varphi Q \quad (8)$$

式中: u_c 为控制输入; y_c 为输出向量。需要指出的是,式(7)和式(8)已不代表一个真实的压电分支电路系统,仅仅相当于使用了一个滤波器来改变测量信号的相位。这个控制器的设计任务是确定控制器的参数(电感 L 、电阻 R)。电感 L 和电阻 R 仅仅是作为数学表达式存在于控制器中,其最佳值可根据结构的被控模态由被动压电分流阻尼技术的最优设计方法^[12]确定。式(5)和式(7)的控制输入分别为

$$u = y_c = -C_1 \varphi Q \quad (9) \quad u_c = y = -C_1 \varphi^T q = -V_s \quad (10)$$

不考虑外扰输入,将式(9)和式(10)分别代入式(5)和式(7),可得闭环控制系统的齐次动力学方程

$$\underbrace{\begin{bmatrix} M_b & 0 \\ 0 & L \\ & M_i \end{bmatrix}}_{M_i} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{Q} \end{Bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} C_b & 0 \\ 0 & R \\ & C_i \end{bmatrix}}_{C_i} \begin{Bmatrix} \dot{q} \\ \dot{Q} \end{Bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} K_b & C_1 \varphi \\ C_1 \varphi^T & \frac{1}{C_p} \end{bmatrix}}_{K_i} \begin{Bmatrix} q \\ Q \end{Bmatrix} = 0 \quad (11)$$

式中, M_i 和 K_i 是正定矩阵,由于 C_b 是正定或半正定的,所以 C_i 至少是半正定的。因此,如果 C_b 是半正定的,则闭环控制系统稳定,如果 C_b 是正定的,则闭环控制系统渐进稳定。

由式(5)和式(9)可知,系统的控制输入为作动器的电荷,很显然实现这样的控制输入非常困难。但是对于同位配置的压电作动器和传感器,控制器方程式(7)的控制输入与传感器所测量的电压 V_s 相等,但相位相差 180° ,所以重写控制器方程为

$$L\ddot{Q} + R\dot{Q} + \frac{Q}{C_p} = -V_s \quad (12)$$

利用传感器所测量的电压 V_s ,由式(12)求出作动器的电荷 Q ,并代入式(5)得

$$M_b \ddot{q} + C_b \dot{q} + K_b q = \dot{f} - C_p C_1 \varphi (V - V_s) \quad (13)$$

因此,控制输入转化为作动器电压 V ,它可通过一个电压源施加于被控结构。将式(12)作 Laplace 变换可得

$$\frac{Q(s)}{V_s(s)} = \frac{-1}{Ls^2 + Rs + \frac{1}{C_p}} \quad (14)$$

将式(4)作 Laplace 变换可得

$$\frac{V(s)}{Q(s)} = -(Ls^2 + Rs) \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可知,式(4)、式(12)和式(13)构成了一个如图2所示的反馈控制结构,利用传感器输出电压 V_s ,由式(12)计算出 \ddot{Q} 和 \dot{Q} 后,代入式(4)计算作动器的控制输入电压 V ,通过一个电压源施加于被控结构。注意到在反馈控制结构中增加了一个反馈增益 K ,取 $K=1$,表示用主动控制来模拟被动压电分流阻尼器的效果。在反馈控制结构中,电感 L 、电阻 R 和反馈增益 K 这3个参数可以调节。控制器模拟了被动压电分流阻尼器的效果,所以当被控结构的固有频率因环境而改变时,仍会大大降低虚拟压电分流阻尼器的减振效果。此时可以利用被动压电分流阻尼技术的最优设计方法^[12],根据结构的被控模态在线调节电感

L 和电阻 R 的最佳值,以适应环境的变化,还可以通过调节反馈增益 K 来实现更好的控制效果。将压电分流阻尼器的虚拟实现应用于一个悬臂梁,其示意图如图3所示。

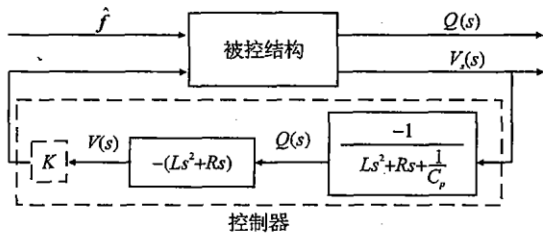


图2 虚拟实现的反馈控制结构

Fig.2 Feedback control structure of virtual implementation

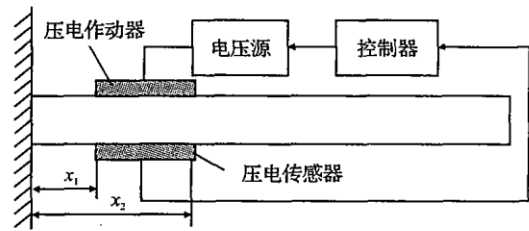


图3 压电分流阻尼器的虚拟实现

Fig.3 Virtual implementation of piezoelectric shunt damper

3 数值分析

为了说明虚拟压电分流阻尼器的控制效果,对一悬臂梁的振动控制进行数值仿真计算,系统参数^[11]为:
 $\rho_b = 2\,700\text{ kg/m}^3, E_b = 71\text{ GPa}, \beta_{33} = 7.331 \times 10^7\text{ V} \cdot \text{m/C}, h_{31} = 7.664 \times 10^8\text{ N/C}, E_p = 74\text{ GPa}, L_b = 0.3\text{ m}, b = 0.02\text{ m}, h_b = 0.005\text{ m}, h_p = 0.006\text{ m}, x_1 = 0.001\text{ m}, x_2 = 0.041\text{ m}。$

仿真计算考虑控制第一阶模态。忽略被控结构的结构阻尼,取 Galerkin 展开式中的三项来计算梁的响应。悬臂梁在分支电路分别为开路和短路时的第一阶模态频率为 $\omega_1^D = 578.25\text{ rad/s}, \omega_1^E = 573.09\text{ rad/s}$ 。模拟计算载荷作用于悬臂梁的自由端,其中一种为脉冲激励,幅值为 $0.05\text{ N} \cdot \text{s}$;另外一种为正弦激励,幅值为 1 N ,激振频率为 $\omega = \omega_1^D = 578.25\text{ rad/s}$,等于悬臂梁在分支电路处于开路时的第一阶固有频率。

当被控模态为梁的第一阶模态时,根据被动压电分流阻尼技术的最优设计方法^[12],可计算出控制器中电感和电阻的最佳值分别为 $L_{opt}^a = 274\text{ H}, R_{opt}^a = 2.99 \times 10^4\ \Omega$ 。取反馈增益 $K = 1$,当载荷为正弦激励时,虚拟压电分流阻尼器的反馈控制结果如图4所示。由于虚拟压电分流阻尼器的工作原理属于反馈控制,下面也简称反馈控制。

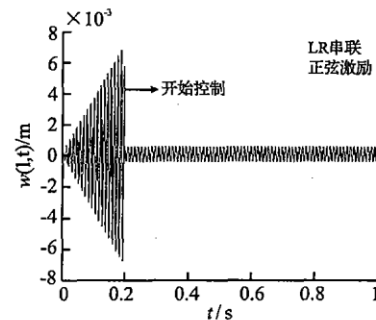


图4 正弦激励时虚拟压电分流阻尼器的控制结果

Fig.4 Control result of virtual piezoelectric shunt damper for harmonic excitation

对于正弦激励,虚拟和物理压电分流阻尼器控制效果的比较如图5所示,其中虚拟压电分流阻尼器所需的反馈控制电压如图6所示。而对于脉冲激励,虚拟和物理压电分流阻尼器控制效果的比较如图7所示,其中虚拟压电分流阻尼器所需的反馈控制电压如图8所示。需要说明的是,当反馈增益 $K = 1$ 时,两者有相同的控制效果,所以为了由图中看出区别,在虚拟压电分流阻尼器的仿真计算中通过调节反馈增益 K ,实现了比物理压电分流阻尼器更好的控制效果。这也正是虚拟压电分流阻尼器的优点之一。

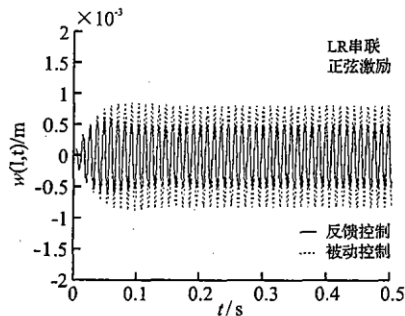


图5 正弦激励时虚拟和物理压电分流阻尼器的控制结果

Fig.5 Control results of virtual and physical piezoelectric shunt damper for harmonic excitation

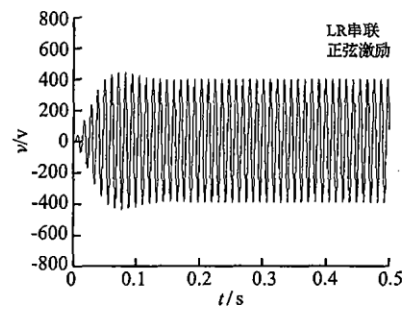


图6 正弦激励时虚拟压电分流阻尼器的反馈控制电压

Fig.6 Feedback control voltage of virtual piezoelectric shunt damper for harmonic excitation

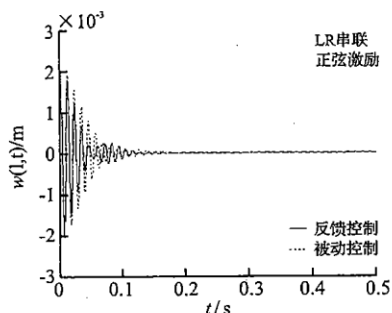


图7 脉冲激励时虚拟和物理
压电分流阻尼器控制结果

Fig. 7 Control results of virtual and physical piezoelectric shunt damper for pulse excitation

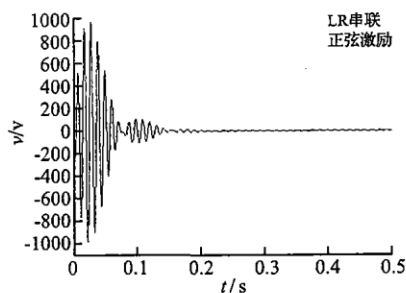


图8 脉冲激励时虚拟压电分流
阻尼器的反馈控制电压

Fig. 8 Feedback control voltage of virtual piezoelectric shunt damper for pulse excitation

由图4和图7可见,虚拟压电分流阻尼器和物理压电分流阻尼器一样,可以抑制结构的共振响应和脉冲响应,通过调节反馈增益 K ,虚拟压电分流阻尼器的振动控制性能可以优于物理压电分流阻尼器。

4 结论

本文提出压电分流阻尼技术的虚拟实现方法。设计了反馈控制器,建立了相应于LR串联分支电路的反馈控制结构。通过对一个悬臂梁的数值计算说明,利用反馈控制结构设计的控制器进行振动控制,能够较好地模拟物理压电分流阻尼器的效果。

在压电分流阻尼器的虚拟实现中,电感和电阻仅仅是作为数学表达式存在于控制器中。虚拟压电分流阻尼器的实现虽然需要作动器,传感器以及控制器和能源供给,但是避免了对于大的物理电感的要求,同时当被控结构的固有频率因环境而改变时,可以在线调节电感和电阻的数值以适应环境的变化,虚拟实现方法克服了物理压电分流阻尼器的两大缺陷。而且虚拟压电分流阻尼器还可以通过调节反馈增益 K 来实现比物理压电分流阻尼器更好的控制效果。压电分流阻尼器的虚拟实现方法类似于主动控制中的独立模态控制,但又不需要像独立模态控制那样提取模态坐标及其导数,控制器的设计相对简单,整个闭环控制系统稳定或渐进稳定。

参考文献:

- [1] Hagood N W, Von F A. Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 146(2): 243 - 268.
- [2] Reza Moheimani S O. A Survey of Recent Innovations in Vibration Damping and Control Using Shunted Piezoelectric Transducers [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(4): 482 - 494.
- [3] Lesieutre G A. Vibration Damping and Control Using Shunted Piezoelectric Materials [J]. Shock and Vibration Digest, 1998, 30(3): 187 - 195.
- [4] Park C H, Inman D J. Enhanced Piezoelectric Shunt Design [J]. Shock and Vibration, 2003, 35(10): 127 - 133.
- [5] Fleming A J, Behrens S, Moheimani S O R. Synthetic Impedance for Implementation of Piezoelectric Shunt - damping Circuits [J]. Electronics Letters, 2000, 36(18): 1525 - 1526.
- [6] Fleming A J, Behrens S, Moheimani S O R. Optimization and Implementation of Multimode Piezoelectric Shunt Damping Systems [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(1): 87 - 94.
- [7] Fleming A J, Moheimani S O R. Improved Current and Charge Amplifiers for Driving Piezoelectric Loads, and Issues in Signal Processing Design for Synthesis of Shunt Damping Circuits [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004, 6(4): 482 - 487.
- [8] Clark W W. Vibration Control with State - switched Piezoelectric Materials [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 11(4): 262 - 271.
- [9] Corr L R, Clark W W. Energy Dissipation Analysis of Piezoceramic Semi - active Vibration Control [J]. Journal of Intelligent

- Material Systems and Structures, 2001, 12(11): 729 - 736.
- [10] Corr L R, Clark W W. Comparison of Low - frequency Piezoelectric Switching Shunt Techniques for Structural Damping [J]. Smart Materials and Structures, 2002, 11(2): 370 - 376.
- [11] 李 宁,张景绘. 压电分流阻尼的重置开关控制[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(7): 841 - 845.
LI Ning, ZHANG Jinghui. Resetting Switching Control of System with Piezoelectric Shunt Damping[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(7): 841 - 845. (in Chinese)
- [12] 李 宁,张景绘. 连续梁的压电分流阻尼模型[J]. 应用力学学报, 2006, 23(3): 398 - 402.
LI Ning, ZHANG Jinghui. Piezoelectric Shunt Damping Model of Beam [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(3): 398 - 402. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

Virtual Implementation Method of Piezoelectric Shunt Damping

LI Ning¹, CHENG Li²

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, 710051, China; 2. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China)

Abstract: A virtual implementation method is proposed to emulate the effect of passive piezoelectric shunt damping. A controller having a set of second - order dynamic equation and measurement equation is designed and the feedback structure according to the LR series shunt circuit is developed by using the governing equations of piezoelectric shunt damping system, the set of equations does not represent any physical system, the inductor and the resistor only "exist" as numerical representations inside the controller, the closed - loop control system is stable or asymptotically stable. The virtual implementation method can both eliminate the need for large inductor and adjust circuit component parameters online to adapt to environmental changes, therefore the two disadvantages of the physical piezoelectric shunt damper are overcome, also the feedback gain can be adjusted to implement the a better vibration control effect than the physical piezoelectric shunt damper. The simulation results for a cantilever beam show the effectiveness of the virtual piezoelectric shunt damper for vibration suppression.

Key words: piezoelectric material; piezoelectric shunt damping; shunt circuit; vibration control; virtual implementation