

文章编号 1004-924X(2009)01-0126-06

基于 TMS320F2812 的悬臂梁振动半主动控制

季宏丽, 裘进浩, 赵永春, 朱孔军

(南京航空航天大学 智能材料与结构航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 基于压电元件的主动振动控制不仅需要复杂的信号处理系统, 而且需要庞大的能量供给系统; 被动控制中电感和电阻参数对环境变化适应能力差, 而且低频控制时需要很大的电感, 不容易实现。为了克服主被动控制存在的缺点, 提出了一种基于同步开关阻尼技术的半主动振动控制的新方法。利用 TMS320F2812 处理器, 通过合理的开关控制算法, 使埋入复合材料悬臂梁约束端的压电元件上的电压极性在适当的时候进行翻转, 使其电压始终与应变反相, 从而达到振动控制的效果。实验结果表明, 该方法可以使悬臂梁一阶振动模态减小 3.164 1 dB。

关键词: TMS320F2812; 压电材料; 悬臂梁; 半主动控制

中图分类号: TN384; TP273 **文献标识码:** A

Semi-active control for structural vibration of cantilever beam based on TMS320F2812

JI Hong-li, QIU Jin-hao, ZHAO Yong-chun, ZHU Kong-jun

(*Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Materials & Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China*)

Abstract: Application of active vibration control system based on piezoelectric elements in real-world structures is limited by its requirement for complicated signal processing system and bulky energy supply system; the passive vibration control system is also difficult to implement its system parameters of inductance. Moreover, the resistances in this system are sensitive to environment, so that it needs large inductance to control low frequency vibration. In order to overcome these drawbacks, a new method of semi-active vibration control based on a technique of synchronized switch damping has been developed recently. By using the processor of TMS320F2812 and the logic switch control algorithm, the polarity of the voltage on a piezoelectric element embedded in cantilever composite beam can overturn at proper time, so that the vibration controlling effect is achieved due to the opposite directions of the voltage-induced force and the strain rate. The experimental results show that the first mode of the cantilever beam can reduce by 3.164 1 dB.

Key words: TMS320F2812; piezoelectric materials; cantilever beam; semi-active controlling

收稿日期: 2008-04-09; 修订日期: 2008-05-28.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 50775110); 南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金资助项目(No. BCXJ08-04)

1 引言

压电材料作为一种智能材料,以其良好的机电耦合特性,在结构振动控制领域具有广泛的应用。当前的压电振动控制系统中,主要有主动、被动和半主动 3 种。主动控制方法需要复杂的信号处理系统和庞大的能量供给系统,难以使系统实现小型化、轻量化;被动控制方法中元件参数对环境变化的适应能力差等。针对主被动振动控制的不足,采用了一种新的基于同步开关阻尼技术的半主动振动控制方法。在半主动振动控制方法中,设计合理的开关控制算法并保证实时性对于半主动振动控制来说是至关重要的。南京航空航天大学季宏丽^[1]用德国 dSPACE 公司开发的基于 MATLAB/Simulink 的控制系统实现了半主动控制,但该系统过于庞大复杂;法国 Faiz A^[2]用模拟器件实现了简单的开关电路的控制,但由于模拟器件的局限性,不易对带有高频噪声的信号实现稳定的开关控制,影响振动控制效果。

基于系统对实时性、高速性和小型化的要求,本文将目前控制领域中最先进的处理器之一 TMS320F2812。TMS320F2812 是 TI 公司推出的高性能 32 位定点 DSP 芯片,可实现复杂的算法并具有高精度、高实时性的特点,广泛应用于工业数据采集和数字化控制等高精度场合^[3]。本文将阐述基于 TMS320F2812DSP 对悬臂梁的一阶固有模态 25.8 Hz 进行半主动振动控制。

2 半主动控制原理

2.1 建模^[4]

当结构在某阶共振频率附近发生振动时,其机电模型可以用只有一个自由度的弹簧质量阻尼系统进行描述,机电模型如图 1 所示。

假设包括压电元件在内的所有结构均为线弹性,则有:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + K_E u = F + F_p, \quad (1)$$

此处, M 为结构等效模态质量, C 为机械损失因子, K_E 为当压电元件短路时结构的等效结构刚度, u 为模态质量位移, F_p 为压电元件通过逆压电效应产生的作用在机械结构上的力, F 为外部激振力。

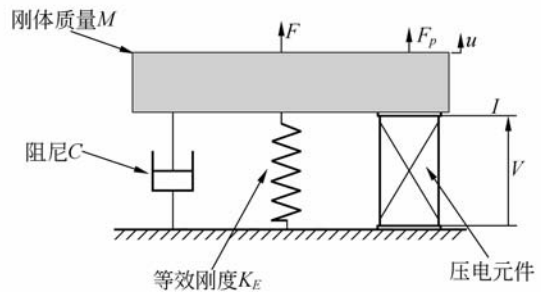


图 1 机电模型的示意图

Fig. 1 Schematic representation of electromechanical model

如果在被控结构上埋入或粘贴压电元件,其机电耦合方程为:

$$\begin{cases} F_p = -\alpha V \\ I = \alpha \dot{u} - C_0 \dot{V} \end{cases}, \quad (2)$$

此处, C_0 为压电元件的受夹电容, α 为力因子, I 为流经压电元件的电流。

在式(1)两边同乘速度 \dot{u} 并对时间积分,可得能量表达式:

$$\int \dot{u} dt = \frac{1}{2} M \dot{u}^2 + \frac{1}{2} K_E u^2 + \int C \dot{u}^2 dt + \int \alpha V \dot{u} dt, \quad (3)$$

输入的总能量 $\int \dot{u} dt$ 被分为 4 个部分: 动能 $M \dot{u}^2 / 2$, 弹性势能 $K_E u^2 / 2$, 机械耗散能 $\int C \dot{u}^2 dt$ 和机电转换能 $\int \alpha V \dot{u} dt$ 。

半主动振动控制的原理就是根据能量守恒定理,在输入能量不变的前提下,提高机电转换能来减小机械振动耗散的能量,从而达到振动控制的目的。

2.2 短路同步开关阻尼技术^[5]

短路同步开关阻尼技术 (Synchronized Switch Damping in a Short circuit, SSDS) 是在压电元件回路中串联一个开关,其振动控制电路如图 2 所示。

开关只有在压电元件的位移达到极值时才闭合,其它时间均为断开状态。

位移和电压曲线如图 3 所示,当开关闭合时,压电元件上的电压因负载回路消耗而降为零,此时,再断开开关;当开关断开且没有任何负载时,流经压电元件上的电流 I 为零,由式(2)可得,压电元件上的电压 V 与位移 u 成比例变化,比例

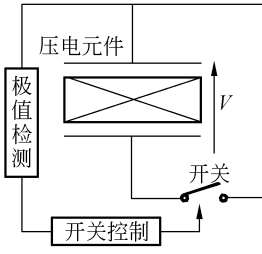


图 2 SSDS 电路原理图

Fig. 2 Principle of SSDS circuit

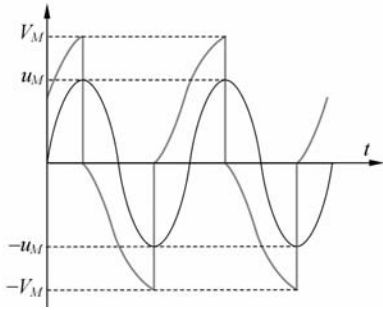


图 3 SSDS 位移和电压曲线

Fig. 3 Curves of displacement and voltage of SSDS

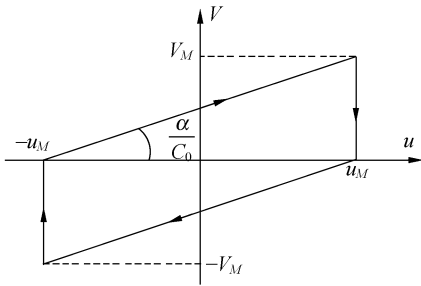


图 4 SSDS 能量环路图

Fig. 4 Scheme of energy cycle of SSDS

因子为 α/C_0 。

由图 4 所示的一个周期能量环路得：

$$V_M = 2 \frac{\alpha}{C_0} u_M, \quad (4)$$

其中 V_M, u_M 分别为电压和位移的极值。

一个周期内机电转换能：

$$E_t = \int \alpha V \dot{u} dt = \int \alpha V du = 2\alpha V_M u_M = \frac{4\alpha^2}{C_0^2} u_M^2. \quad (5)$$

2.3 电感同步开关阻尼技术

电感同步开关阻尼技术 (Synchronized Switch Damping on Inductor, SSDI) 是在 SSDS 的基础上再串联一个电感 L , 如图 5 所示。

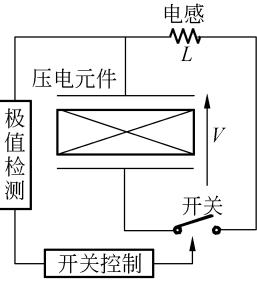


图 5 SSDI 电路原理图

Fig. 5 Principle of SSDI circuit

位移和电压曲线如图 6 所示, 当开关闭合时, 由压电元件的电容 C_0 和外接电感 L 组成的 LC 振荡器, 其振荡周期为：

$$T_i = 2\pi \sqrt{LC_0}. \quad (6)$$

如果开关闭合时间 $t_i = \frac{1}{2} T_i$, 压电元件上的电压将发生翻转; 当开关断开且没有任何负载时, 压电元件上的电压 V 随位移 u 线性变化。

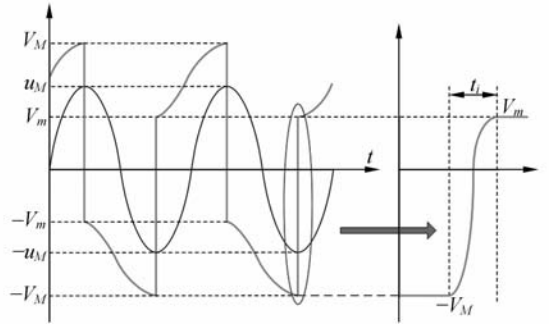


图 6 SSDI 位移和电压曲线

Fig. 6 Curves of displacement and voltage of SSDI

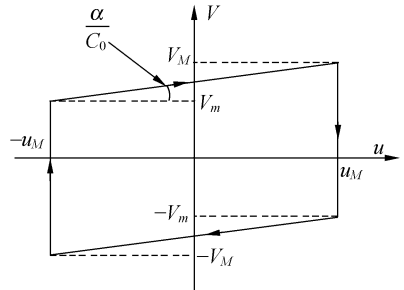


图 7 SSDI 能量环路图

Fig. 7 Scheme of energy cycle of SSDI

理论上来说, 当开关闭合时, 电压翻转前后绝对值大小不变, 但实际上电压翻转并不是非常

理想,即 $|V_m| < |V_M|$ 。这是因为储存在压电元件电容上的一部分能量会在电压翻转的时候消耗在开关电路上,因此翻转后的电压:

$$V_m = \gamma V_M = V_M e^{-\pi/2} Q, \quad (7)$$

其中 Q 为电路品质因子,且 $0 < \gamma < 1$ 。因为开关切换导致的电压翻转时间远远小于机械振动周期,所以可以认为电压翻转时并没有任何位移变化。由图 7 能量环路可得:

$$V_M = V_m + 2 \frac{\alpha}{C_0} u_M. \quad (8)$$

一个周期内机电转换能:

$$E_i = \int \alpha V du = 2\alpha(V_M + V_m)u_M = \frac{4\alpha^2}{C_0} \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} u_M^2. \quad (9)$$

由上述 SSDS 和 SSDI 两种不同的控制方法可知,同步开关阻尼方法就是通过开关在位移极值点处进行切换,使压电元件上的电压极性发生翻转,这样不但可以使压电元件产生的力与结构速度始终保持方向相反,而且增大了压电元件上的电压幅值,从而提高机电转换效率,达到振动控制的目的。比较式(5)和式(9)可知,SSDI 的机电转换能比 SSDS 的高,因而可以得到更高的振动控制效率。

3 半主动振动控制实验系统

本文以工程中常见的悬臂梁结构为例,搭建如图 8 所示的实验系统,利用 SSDS 和 SSDI 两种不同的半主动振动控制方法对其一阶弯曲振动进行控制,并通过实验比较两种不同控制方法的振动控制效果。

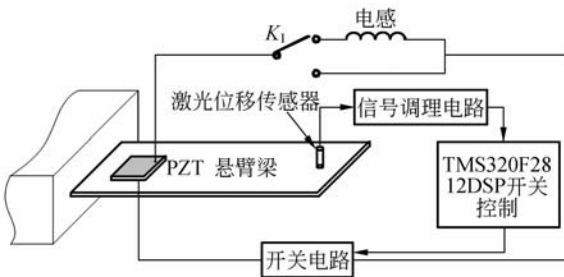


图 8 悬臂梁半主动控制实验装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of semi-active vibration controlling of cantilever beam

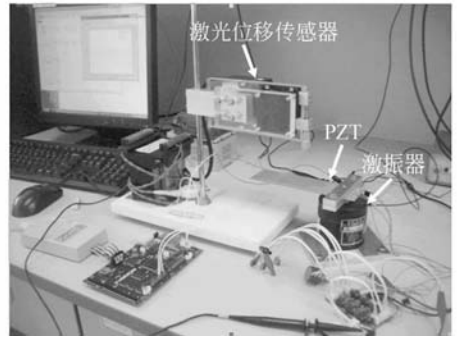


图 9 悬臂梁半主动控制实验装置实物图

Fig. 9 Physical photo of semi-active vibration controlling of cantilever beam

为复合材料 (Glass Fiber-reinforced Polymer, GFRP)^[6],其尺寸为 $180 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。激振器用来激振悬臂梁,以此产生周期力。在梁的根部正反两面对称地埋入两块压电片,压电片尺寸为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 。电感前的转换开关 K_1 是为了实现 SSDS 和 SSDI 之间的切换。在梁的自由端安装激光位移传感器测量其振动位移信号,此位移信号由合众达电子公司生产的功能强大的 DSP 应用模板 SEED-DEC2812 进行采集并处理。由于悬臂梁的一阶弯曲模态自由端位移与压电片应变是同相位的,因此可以将传感器输出的位移信号作为控制开关闭合的参考信号。位移信号经前置信号调理电路送入 TMS320F2812 DSP 中进行运算,找到位移的极值后,输出开关信号,对开关电路进行控制,实现开关的通断功能,从而实现振动的半主动控制。其软件设计流程图如图 10 所示, TMS320F2812 DSP 中用式(10)进行位移极值的判断,并输出方波信号对开关电路进行控制。

$$\text{极大值} \begin{cases} (x[1] - x[2]) * (x[2] - \text{input}) \leq 0 \\ x[1] - x[2] \leq 0 \\ \text{input} > 1.5 \\ \text{count} > 5 \end{cases}, \quad (10)$$

$$\text{极小值} \begin{cases} (x[1] - x[2]) * (x[2] - \text{input}) \leq 0 \\ x[1] - x[2] > 0 \\ \text{input} < 1.5 \\ \text{count} > 5 \end{cases},$$

实验系统装置如图 9 所示,智能悬臂梁材料

其中 input 是当前的 A/D 采样点, $x[1], x[2]$ 分

别为前 2 和前 1 个采样点, $input > 1.5$, $input < 1.5$ 和计数器 count 是为了防止高频冲击分量及在高频分量处产生多次开关跳变而影响控制效果。

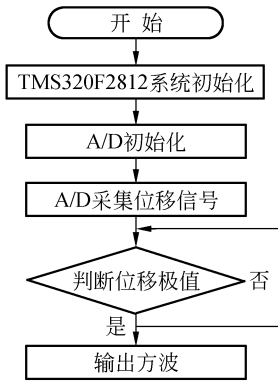


图 10 软件设计流程图

Fig. 10 Flow chart of software design

本实验中只对悬臂梁的一阶模态 25.8 Hz 进行半主动振动控制。

4 实验结果与讨论

在悬臂梁的一阶模态频率附近激振, 激振器的输入电压固定为 0.5 V, 激振频率为 25.8 Hz。如图 11 所示, 当没有控制时, 经激光位移传感器输出的梁自由端位移幅值大小为 2.25 mm。实验测得的梁自由端位移要比压电片上的电压滞后, 这是由激光位移传感器及后续电路的时延造成的。

根据式(4)和式(8)可知, SSDI 方法中压电元件上的电压要比 SSDS 中的大, 且由式(5)和式(9)可知, SSDI 要比 SSDS 有更好的控制效果, 因此提取图 11 中的无控制、SSDS 控制和 SSDI 控制中的位移和电压信号进行比较, 如图 12 所示。实验中两种不同控制方法中位移和电压幅值如表 1 所示, 由所得数据可以看出, 采用半主动控制算法, 可以使压电元件上的电压峰值 V_m 升高, 从而使机电转换能 E_i 增大, 达到振动控制的目的。比较 SSDI 和 SSDS, 可以看出 SSDI 中压电元件上的电压要比 SSDS 中的大, 且 SSDS 和 SSDI 分别可以使振动幅值减小 14.24% 和 30.18%, 可见, SSDI 比 SSDS 有更好的振动控制效果, 和理论结果吻合很好。

表 1 SSDS 和 SSDI 控制效果比较

Tab. 1 Comparison of controlling results between SSDS and SSDI

	无控制	SSDS	SSDI
位移传感器电 压幅值(mm)	2.280 4	1.955 6	1.592 1
压电元件电 压幅值(V)	2.067 9	3.037 8	5.697 3
控制效果 20lg(控制前位移/ 控制后位移) (dB)	0	1.334 6	3.120 8

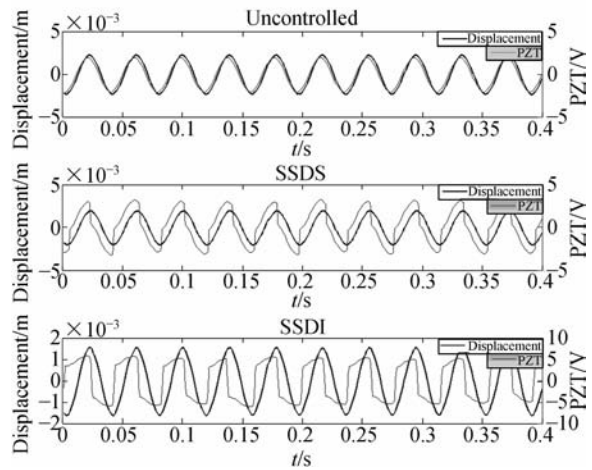


图 11 无控制、SSDS 和 SSDI 位移电压图

Fig. 11 Scheme of displacement and voltage of uncontrolled, SSDS and SSDI

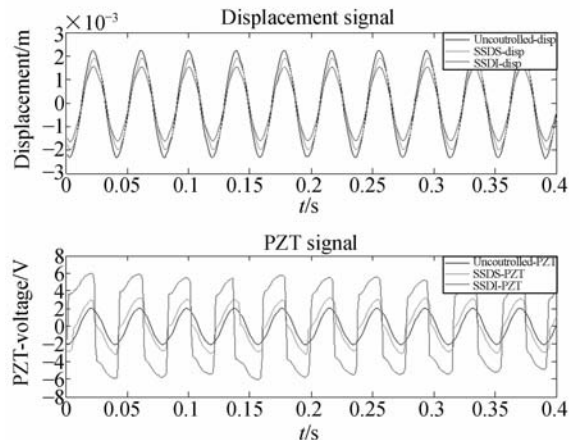


图 12 SSDS 和 SSDI 振动控制效果比较

Fig. 12 Comparison of controlling effects between SSDS and SSDI

在本实验中,当采用 SSDI 技术进行振动控制时,选用的电感值为 1.6 H,远比被动低频控制中需要的电感值小得多,克服了被动控制中需要大电感的缺点。

5 结 论

文章阐述了同步开关阻尼半主动振动控制原理,并利用 TMS320F2812 实现了 SSDS 和 SS-

DI 两种不同的方法对悬臂梁一阶模态的振动控制,其中 SSDS 和 SSDI 控制方法分别使振动幅值减少 14.24% 和 30.18%。基于同步开关阻尼技术的半主动控制既避免了主动控制中庞大的能量供给系统,又避免了被动低频控制中需要很大的电感这一缺点。本文利用 TMS320F2812DSP,既不需要庞大的 DSpace 信号采集系统和微型计算机,又实现了模拟器件无法实现的复杂的开关控制算法,真正实现了系统的小型化和轻量化。

参考文献:

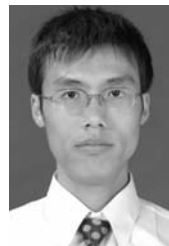
- [1] 季宏丽. 智能结构的自感知主动振动控制以及半主动振动控制的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
JI H L. A study on vibration control of the smart structure using self-sensing active method and semi-active method[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [2] FAIZ A, GUYOMAR D, PETIT L, et al.. Wave transmission reduction by a piezoelectric semi-passive technique[J]. *Sensors and Actuators, Physical*, 2006, 128(2): 230-237.
- [3] 张勇强, 全新民, 童亦斌, 等. 基于 TMS320F2812 的控制系统设计[J]. *应用天地*, 2007, 26(2): 63-66.
ZHANG Y Q, JIN X M, TONG Y B, et al.. Design of a control system based on TMS320F2812 [J]. *China Academic Journal Electronic Publish-*

- ing House*, 2007, 26(2): 63-66.
- [4] BADEL A, SEBALD G, GUYOMAR D, et al.. Piezoelectric vibration control by synchronized switching on adaptive voltage sources: Towards wideband semi-active damping[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 119(5): 2815-2825 Part I.
- [5] RICHARD C, GUYOMAR D, AUDIGIER D, et al.. Semi-passive damping using continuous switching of a piezoelectric device[C]. *Proceedings of SPIE Smart Structure and Materials Conference, Passive Damping and Isolation, San Diego*, 1998, 3672: 104-111.
- [6] QIU J H, MASAKAZU H. Vibration Control of a Plate using a Self-sensing Piezoelectric Actuator and an Adaptive Control Approach[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2006, 17(8-9): 661-669.

作者简介:



季宏丽(1983—),女,江苏盐城人,博士研究生,主要从事智能结构的振动噪声控制的研究。E-mail: jihongli@nuaa.edu.cn



赵永春(1984—),男,山西大同人,硕士研究生,主要从事智能结构的振动控制研究。E-mail: z_yongchun@163.com



裘进浩(1963—),男,浙江嵊州人,工学博士,博士生导师,教育部“长江学者”特聘教授,主要从事智能材料与结构研究。E-mail: qiu@nuaa.edu.cn



朱孔军(1971—),男,山东临沂人,工学博士,硕士生导师,主要从事智能材料的制备研究。E-mail: khzhu@nuaa.edu.cn