

文章编号:1000-6893(2003)05-0431-04

基于在线识别与全维状态观测技术的埋入 压电片复合梁的振动主动控制研究

吴克恭¹, 姜节胜¹, Janocha Hartmut²

(1. 西北工业大学 振动工程研究所, 陕西 西安 710072)

(2. 德国萨尔大学 自动化过程实验室, 萨尔州 德国 66123)

Active Vibration Control of Composite Material Beam with Piezoceramics Embedded Using on-Line Self Identification and Full State Observer Technique

WU Ke-gong¹, JIANG Jie-sheng¹, Janocha Hartmut²

(1. Institute of Vibration Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Laboratory for Process Automation, Saarland University, 66123 Saarbrücken, Germany)

摘 要: 介绍利用埋入复合材料梁的压电传感器和驱动器对其振动进行主动控制的实验研究及其结果。利用埋入的压电传感器和驱动器对其进行模型识别而得出结构的动力学模型,再将该模型用于控制器的设计,其优点是当结构本身或者约束、环境等发生变化后,可对结构的模型重新进行在线识别,及时更新控制参数,避免控制失效,而且不需要事先知道结构的其他属性。应用最优控制理论的全维状态观测器技术,结合所选取的压电传感器和作动器识别的结构动力学模型,可以设计出其最优控制器。实验表明,传感器信号的频谱峰值最大可以被有效地降低 20dB 左右。

关键词: 埋入压电材料; 复合梁; 振动主动控制; 在线识别; 全维状态观测器; 最优控制; 实验

中图分类号: O328, TB123

文献标识码: A

Abstract: Having recognized the disadvantages of the earlier studies which mostly focused on the structural surface glued ceramics, the authors conducted the experiment of active vibration control of composite material beam with the embedded piezoceramics using self identification and full state observer technique. With the help of embedded piezoelectric actuators and sensors, the dynamic state space model of the composite material beam is identified using the on-line model analysis method. Thereafter, the LQR controller with full state observer is developed to suppress the vibration of the structure. The experiment result shows that this method is effective and feasible in engineering practice. In the demonstrated experiment, the vibration can be reduced up to 20 dB.

Key words: embedded piezoceramics; composite structure; active vibration control; self identification; full state observer; optimal control; experiment

本文介绍一种压电智能结构振动主动控制方案。在复合材料结构中埋入若干压电作传感器和作动器,位置随意分布。与表面粘贴压电片^[1~3]相比,埋入压电片可以有效保护压电片及其连线,增强其与基体材料的耦合。以其中一个压电片激励结构产生振动,用其它压电片作为传感器进行测量。可以测出每一对作动器和传感器之间的频响函数。利用其频响函数可以进行结构模态参数识别^[4~6],得到结构频响函数的极点留数模型(也称为频响函数的有理分式多项式),进而得到其状态空间模型。模型识别方法具有阶次低、容易在线更新等优点。控制器的设计采用带有全维

状态观测器的线性二次型最优控制策略。

1 实验方案

采用埋入压电片的碳纤维复合材料梁结构。两端夹紧,长 500mm,宽 50mm,厚 3mm。复合材料梁中埋入 5 片相同的 PIC151 型压电片,长 50mm,宽 25mm,厚 1mm。为有效发挥压电片的作用,其埋入深度距梁中面线有一定距离。图 1 为埋入压电片的碳纤维复合梁结构示意图。实验仪器连接情况如图 2 示,压电片引线分两路,以便传感器和作动器选择。实验中用了 2 个二阶 Butterworth 滤波器分别作为抗混和重建滤波器;模数、数模转换器将传感器的模拟信号转化为数字信号,同时也将计算机输出的数字信号转化为模拟信号;功率放大器给驱动器提供能量;计算机用

来进行数字信号处理,完成数据采集、频响函数计算、动力学模型识别、控制器设计和作为控制器对梁结构的振动进行控制等。

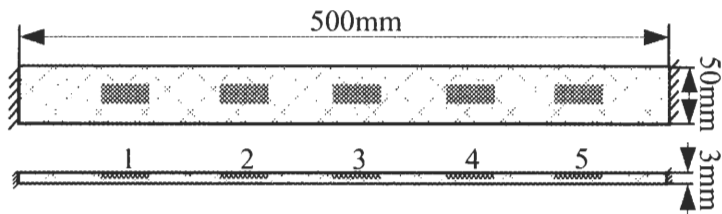


图1 埋入压电片的碳纤维复合梁结构示意图

Fig.1 Beam with embedded piezoceramics

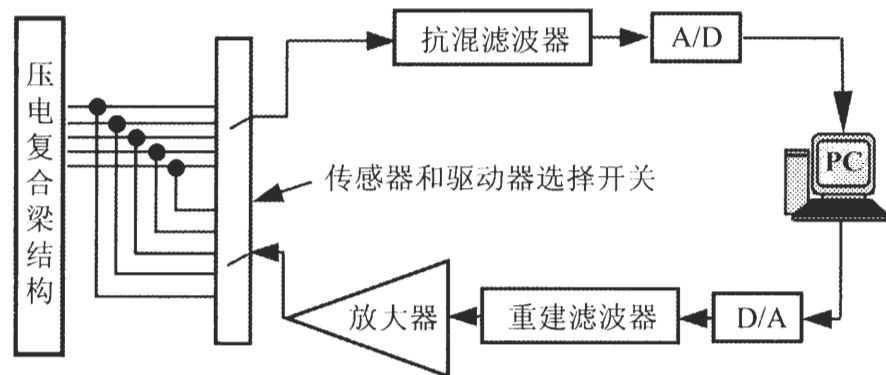


图2 实验仪器连接示意图

Fig.2 Experiment setup

2 数据采集和模型识别

以其中一个压电片作为驱动器,以限带白噪声(0~3000Hz)激励压电梁振动,而用另外的压电片作为传感器测量其所处位置的响应,再将激励点和响应点的时域信号经FFT变换得到频域信号,则可得到从驱动器到传感器的频响函数。显然频响函数与所选的激励点及测量点有关。

根据所测频响函数,应用频域模态参数识别方法,可以得到结构的极点留数模型^[4~6]

$$H(s) = \sum_j \left[\frac{R_j}{s - \lambda_j} + \frac{\bar{R}_j}{s - \bar{\lambda}_j} \right] + E \quad (1)$$

其中:复共轭对 R_j 和 \bar{R}_j 称之为留数; λ_j 和 $\bar{\lambda}_j$ 也是复共轭对,为极点; j 为识别的模态阶数; E 为残余项,用来修正截断高频模态以及由于其他原因而忽略的模态对模型的影响。

由模态分析理论^[4~5]可知,式(1)中的极点含有结构频率和阻尼信息,而留数反映的则是结构的振型以及各阶模态对响应的参与情况

$$\lambda_j = -\zeta_j \omega_j + j \omega_j \sqrt{1 - \zeta_j^2} \quad (2)$$

$$R_j = \{c\varphi_j\} \{ \varphi_j^T b \} \quad (3)$$

式中: ζ_j 是第 j 阶模态阻尼比; ω_j 为模态频率; φ_j 为模态向量; $\{ \varphi_j^T b \}$ 和 $\{c\varphi_j\}$ 称为模态输入和输出形状向量。 b 和 c 为输入形状矩阵和输出形状矩阵^[6],其意义如系统动力学方程式所示

$$\begin{cases} M\ddot{x} + V\dot{x} + Kx = bu(t) \\ y(t) = cx(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中: M , V 和 K 为质量、阻尼和刚度阵; $bu(t)$ 为外载,由输入信号 $u(t)$ 经输入形状矩阵 b 加到结构上;传感器信号 $y(t)$ 由模态坐标经输出形状矩阵 c 组成。从极点中求得频率 ω_j 和阻尼比 ζ_j ; 将留数进行奇异值分解^[6],得到模态输入和输出形状矩阵后,得到如下的状态方程模型

$$\begin{cases} \dot{q}(t) \\ \ddot{q}(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{\Omega}^2 & -\mathbf{\Gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{\Psi}^T b \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) = [c\mathbf{\Psi} \quad \mathbf{0}] \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

这里的状态向量是 $[q^T(t) \quad \dot{q}^T(t)]^T$, $q(t)$ 是模态位移向量; \mathbf{I} 为单位矩阵;模态刚度阵 $\mathbf{\Omega}^2$ 由模态频率的平方组成的对角阵;模态阻尼阵 $\mathbf{\Gamma}$ 也是一对角阵,其元素为 $2\zeta_j \omega_j$; $\mathbf{\Psi}^T b$ 为由模态输入形状向量组成的模态输入形状矩阵; $c\mathbf{\Psi}$ 为由模态输出形状向量组成的模态输出形状矩阵。

3 控制器设计

由于实验时激励与控制不在同一点,且激励信号是外加的,为与控制信号区别起见,激励信号的作用以 $Pf(t)$ 表示。则前边识别所得状态空间模型可以扩展为更一般的形式

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Pf(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (6)$$

显然,这里 $D = \mathbf{0}$ 。

由于硬件条件限制,本实验只用一个压电片作为传感器和一个压电片作为驱动器,不可能直接得到全部的状态信息,本文应用全维状态观测技术来设计最优控制器^[7,8]。首先假定所有的状态信息已知,基于状态空间方程(6)模型和反馈控制理论得到状态反馈增益系数矩阵 K ;第二步设计全维状态观测器。图3为带有全维状态观测器的反馈控制系统示意图,图中虚线内为全维状态

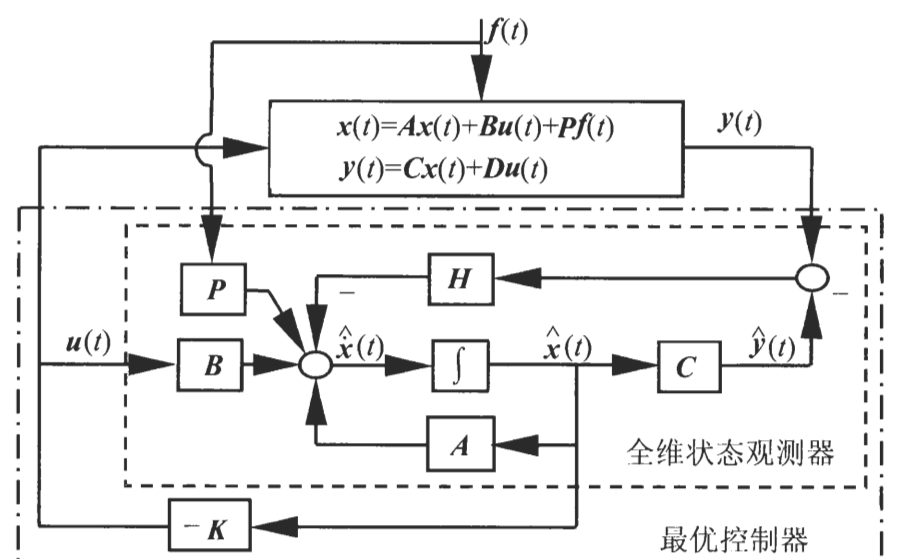


图3 带有全维状态观测器的反馈控制系统

Fig.3 Controller with full states observer

观测器,点划线内是最优控制器。最优控制器的设计就是要找到控制输入信号 $u(t)$,使得下面的二次型性能指标达到最小

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (7)$$

其中: Q 和 R 分别为对状态向量和控制输入向量的加权阵。选择它们的总原则^[8]是,如果控制成本低,可以用大的控制信号的话,就减小对输入信号的加权。一般设 R 为单位阵,则增大 Q 效果相同。当控制成本较高而不能用大的控制信号时,就用较小的 Q 值。振动控制的目的是为了降低系统的振动水平,在这里就是降低传感器的输出信号。为了降低系统的输出,就要对输出贡献大的因素使用大的惩罚系数,而对输出贡献小的因素使用小的惩罚系数。由系统的状态方程(6)可知,其输出是由状态向量 x 通过输出矩阵 C 组成的,从而矩阵 C 反映的就是系统的状态向量对输出的贡献大小。从而可以用输出矩阵 C 构造状态向量的加权阵 Q ,而令 R 为单位矩阵

$$\begin{cases} Q = \rho C^T C \\ R = I \end{cases} \quad (8)$$

其中: ρ 为一正实数,用来调整 Q 和 R 的相对大小。选择了合适的 ρ ,亦即 Q 和 R 后,上面的最优化问题就最终化为求解黎卡提代数方程^[7,8]的问题,求得矩阵 P 后,即得最优控制信号

$$u(t) = -Kx(t) = -R^{-1}B^T Px(t) \quad (9)$$

全维状态观测器矩阵 H 是用极点配置技术来设计的。为保证控制算法的有效性,观测器极点必须位于控制器极点的左侧。状态估计量 $\hat{x}(t)$ 是通过控制输入信号 $u(t)$ 、输出误差向量 $y(t) - \hat{y}(t)$ 以及观测器矩阵 H 等计算而来的,如图 3 所示。

4 实验结果

用上述模型识别和控制器设计技术,对图 1 所示埋有压电片的复合梁结构,采用图 2 实验配置方案进行实验。该实验为单输入单输出系统。选择压电片 1 为作动器,压电片 2 为传感器,首先用上述模型识别方法识别结构模型,并设计控制器。进行控制实验时,结构的振动来自于此时闲置未用压电片 5 的限带白噪声(0~3000Hz)激励(实验中激励始终存在)。控制器设计时加权阵 Q 和 R 按式(8)确定, R 在这里的取值为 1,这里选取 $\rho = 10000$ 来设计控制器向量 K ,并用极点配置方法将观测器极点配置在控制器极点左边得

到观测器向量 H ,其值如表 1 所示。被控系统、控制器和观测器的极点分布如图 4 所示。图 5 是以压电片 1 作为驱动器,压电片 2 作为传感器的

表 1 控制器设计时的 K 和 H

	-156.92	-46.119	-292.12	-213.74	286.5	214.03
$K_{1 \times 18}$	-294.98	-20.136	551.26	-299.99	265.71	-17.918
	-102.03	78.826	67.531	-17.891	-48.89	33.16
	-289.4	-152.79	-440.81	-208.82	-1008.7	-90.723
$H_{18 \times 1}^T$	-200.16	-1113.3	-147.08	-427.46	-833.34	-648.73
	-1018.4	-76.743	1307.1	-1176.8	637.78	-1939.3

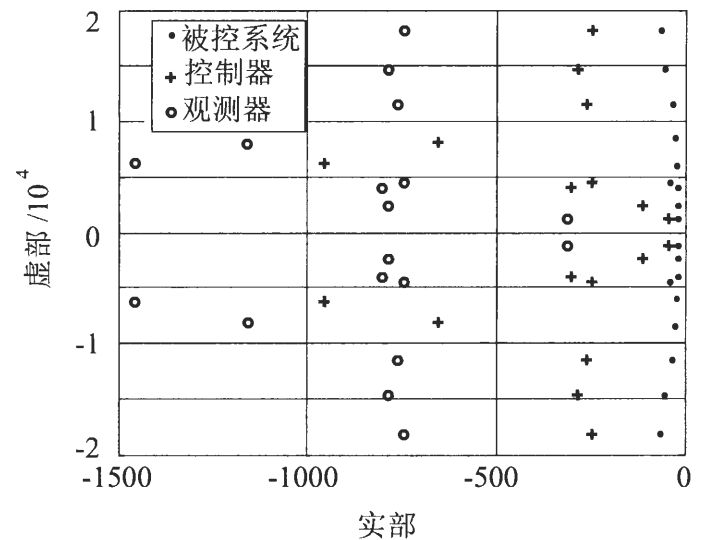
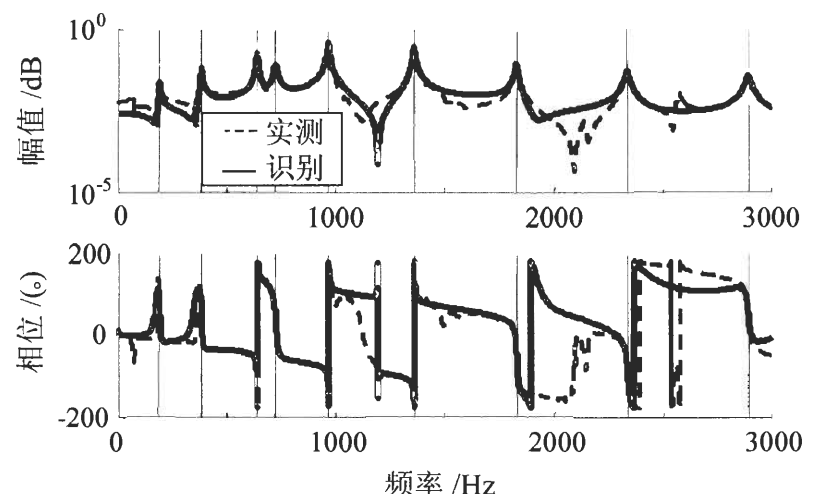


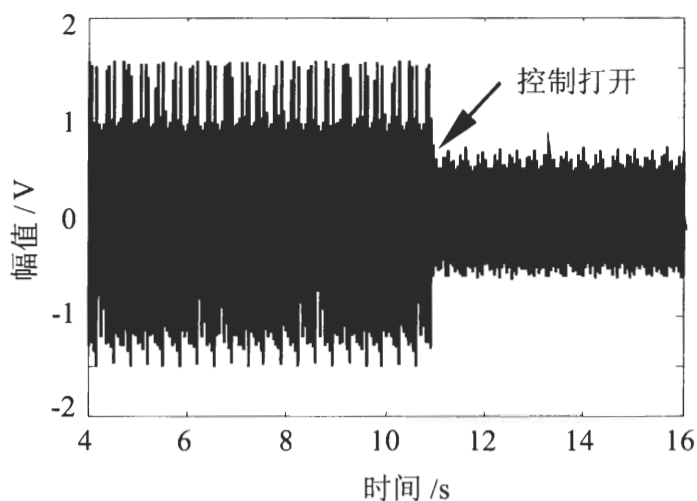
图 4 被控系统、控制器以及观测器的极点分布

Fig.4 Pole places of the system

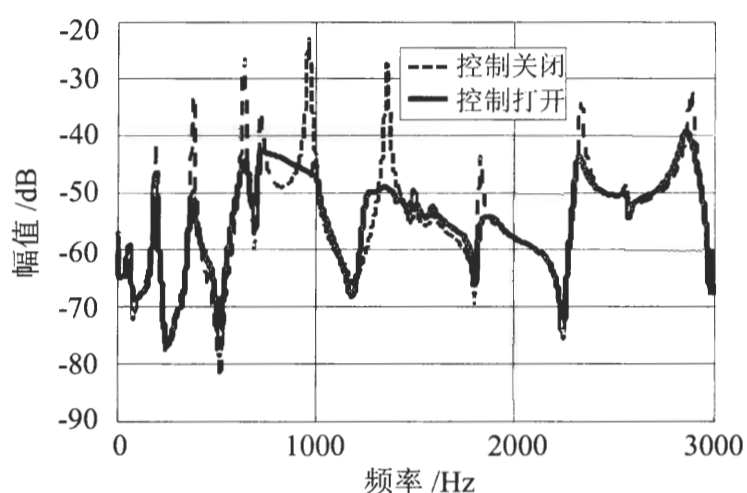
实验结果。由于计算机速度、数模模数转换时间等硬件条件限制,控制器的阶次不能太高。本文实验配置中可以包括最多 9 个模态频率,每个模态频率对应于状态空间方程的阶次为 2。本文选择图 5(a)中 9 条虚竖线所示的 9 个模态频率识别结构,所识别的状态方程阶次为 18。实验实测模型和识别模型在被识别模态频率附近一致性很好。实时控制时的采样频率为 15385 Hz(采样间隔 65 μ s)。图 5(b)为控制器打开前后传感器的时域信号,显而易见,最高幅值在控制器打开后降低了 1/2 左右;图 5(c)为控制器打开前后传感器信号的频谱,由其频谱对比可知,被识别的 9 个模态频率处的振动都得到了有效的抑制,振幅抑制最



(a) 实测模型以及用于控制器设计的识别模型



(b)控制前后的传感器信号



(c)控制前后传感器信号的频谱

图5 压电片1为驱动器,压电片2为传感器的实验结果

Fig.5 Experiment results

高达到了20dB以上(如1380 Hz处的共振幅值),平均降幅达到10dB以上。以其它压电片组合作为驱动器和传感器的实验结果类似。本文并未考虑埋入压电片深度和其厚度的优化问题,如果考虑优化问题,结果应更好。

5 结论

本文利用埋入结构中的压电片先进行结构模态参数识别,组成状态空间模型,然后进行控制器设计。实验结果表明,埋入复合结构的压电片可以很好地识别结构模态而建立起其动力学模型。结合本文介绍的控制器设计方法,埋有压电片的复合材料结构的振动可以得到有效的抑制。

参 考 文 献

[1] Wang Q, Wang C M. A controllability index for optimal design of piezoelectric actuators in vibration control of beam structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 242(3): 507 - 518.

- [2] 方有亮,武哲. 配置压电自感作动器复合层板的振动主动控制[J]. 航空学报, 2000, 21(3): 247 - 250.
(Fang Y L, Wu Z. Active vibration control of composite plate with self-sensing piezoelectric actuators[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(3): 247 - 250.)
- [3] 姚军,李岳峰,刘娟. 压电薄板的建模和阻尼的准独立模态控制[J]. 航空学报, 2000, 21(2): 159 - 163.
(Yao J, Li Y F, Liu J. Modeling of piezoelectric thin plates and quasi-independent modal control for damping[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(2): 159 - 163.)
- [4] 傅志方,华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2000. 100 - 108.
(Fu Z F, Hua H X. Modal analysis theory and application [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000. 100 - 108.)
- [5] 李德堡,陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2001. 146 - 170
(Li D B, Lu Q H. Experimental modal analysis and application[M]. Beijing: Science Press, 2001. 146 - 170.)
- [6] Etienne B. Structural dynamic toolbox[M]. Paris France: Scientific Software, 2002.
- [7] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 第5版,北京:国防工业出版社, 1994. 558 - 625.
(Hu S S. Automatic control principle[M]. 5th, Beijing: National Defence Industry Press, 1994. 558 - 625.)
- [8] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. 213 - 235.
(Xue D Y. Feedback control system design and analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 213 - 235.)

作者简介:



吴克恭(1974 -) 男,甘肃静宁人,西北工业大学振动研究所中德联合培养博士生;研究方向:智能结构与结构振动主动控制. E-mail: k.wu@lpa.uni-saarland.de

姜节胜(1937 -) 男,上海人,西北工业大学振动研究所教授,博士生导师,曾为美国马里兰大学访问学者,德国布伦瑞克工大访问教授,主要从事结构动力学方面研究. 发表论文100余篇. 电话:029-8492895; E-mail: jiangjs@nwpu.edu.cn

JANOCHA Hartmut(1944 -) 男,生于德国奥派尔恩,1973年获得德国汉诺威大学博士学位,德国萨尔大学自动化过程实验室主任,教授,主要从事信号、图像处理与智能结构应用研究. E-mail: janocha@lpa.uni-saarland.de

(责任编辑:李铁柏)