

文章编号: 1000-6893(2000)03-0247-04

配置压电自感作动器复合层板的振动主动控制

方有亮, 武 哲

(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系, 北京 100083)

ACTIVE VIBRATION CONTROL OF COMPOSITE PLATE WITH SELF-SENSING PIEZOELECTRIC ACTUATORS

FANG You-liang, WU Zhe

(Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics, Beijing Univ. of Aero. and Astro., Beijing 100083, China)

摘 要: 采用一阶剪应变理论, 对具有自感-作动器的复合层板进行有限元分析, 为避免自由度太大, 采用按结构模态展开的方法, 给出以模态坐标为变量的状态方程, 和以电流为输出的观测方程。在此基础上, 考虑振动系统的外激励干扰衰减 LQG, H_∞ 控制问题。对具有四对压电薄膜的层板结构进行了数值仿真, 绘制出 LQG 控制下和 H_∞ 控制下闭环系统控制对象的奇异值曲线, 还给出持续外力作用下速度响应曲线比较, 仿真结果表明控制的方法是有效的。

关键词: 复合材料; 振动; 控制问题; 有限元; 智能结构

中图分类号: O327; O232 **文献标识码:** A

Abstract: Using first-order shear theory, this paper proposes the FEM analysis for self-sensing laminate composite plates. For reducing the degrees of freedom, this paper employs the method of expansion over the mode shapes. Then state equations are given with the modal coordinate being the state variables and the current induced by mechanics is considered as the output variable of the measurement equation. Based on the equations, this paper implements the LQG and H_∞ control. Numerical simulation of self-sensing laminates with four pairs of piezoelectric films bonded on the surface of base structure is given. Singular value curves of system and velocity response caused by applied force are plotted, and external excitation of the vibration system is suppressed effectively. The simulation solution illustrates that the control method in this paper is effective.

Key words: composite materials; vibration; control problem; FEM; smart structure

利用智能结构对柔性结构进行振动抑制, 是近年来振动控制研究热点问题。这方面的研究始于 80 年代中期, Nam 用压电材料作动器对复合板层面进行了优化设计用以抑制颤振, 并设计了 LQR 控制系统^[1]。考虑到噪声等干扰的影响, Lazarus 和 Han 对智能复合板振动设计了 LQG 控制系统^[2,3]。Chandrashekhara 等基于一阶剪切层板理论的有限元方法, 并进行主动控制^[4]。

一般在压电传感器、压电作动器布置时, 在结构上对称于梁或板中面粘贴一对或多对压电片, 每对中一为输入(传感器), 一为输出(作动器)。

对压电材料来说, 其力学状态与电状态相互转化, 一个压电片同时用做作动器和传感器, 对压电材料是可以做到的, Anderson 等描述了一种这样的结构, 将一压电片既作为传感器, 又作为作动器, 称这对压电片为自感作动器 (Self-Sensing

Actuator)^[5]。本文讨论含有一个或几个自感作动器的振动抑制问题。之所以采用成对的形式, 只是为了结构关于梁、板中面对称, 使计算、分析方便而已, 同时, 因为每对上、下压电片同时作用反向电压, 这样一来, 由作用电压产生的面力为零。自感作动器基本思想是: 使输出电流(或电压、电荷)仅与机械作用有关, 避免了压电片电容的影响。与一般的压电板结构相比, 自感作动器结构具有如下优点: 由于传感、作动完全集成在一起, 这类结构在闭环控制稳定性方面, 有较好性能。

振动系统具有持续的外干扰, 即振动系统的激励, 因此振动控制系统不只是对初始状态的调节, 更重要的是控制振动系统对外激励的稳态响应, 即干扰衰减问题。

本文基于一阶剪应变理论, 采用有限元方法, 然后按模态展开, 给出自感作动器结构的状态变量方程和观测方程, 利用 LQG 控制和 H_∞ 控制技术对复合层板振动进行了主动控制。

收稿日期: 1999-02-09; 修订日期: 1999-06-01

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2000/03/0247/>

1 基本公式与有限元形式

(1) 应变- 位移关系 因为对称于中面的压电片作用于反向、等值的电压, 所以, 这里未考虑复合板的中面位移, 平面位移表示为

$$u = zH(x, y)$$

$$v = - zH(x, y)$$

设横向位移为

$$w = w(x, y)$$

其中: H 和 \bar{H} 分别是中面关于 x 轴和 y 轴的转角。对于剪应变板

$$H = \frac{5w}{5y} - C_{yz}$$

$$\bar{H} = - \frac{5w}{5x} + C_{xz}$$

式中: $C = (C_{yz} \ C_{xz})^T$ 是横向剪切应变, 弯曲应变 $J = (J_x, J_y, J_{xy})^T = \begin{pmatrix} \frac{5H}{5x} & - \frac{5H}{5y} & \frac{5\bar{H}}{5y} & \frac{5\bar{H}}{5x} \end{pmatrix}^T$

(2) 本构关系 对于复合材料自适应板, 无论是复合层, 还是压电层, 第 k 层应力- 应变关系表示为

$$\begin{Bmatrix} R_x \\ R_y \\ S_{xy} \\ S_{yz} \\ S_{xz} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} & 0 & 0 \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & Q_{45} \\ 0 & 0 & 0 & Q_{54} & Q_{55} \end{bmatrix} \tilde{\sigma}$$

$$\begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ C_{xy} \\ C_{yz} \\ C_{xz} \end{Bmatrix}_k = E_{3k} \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: d_{31}, d_{32} 为压电常数; E_{3k} 表示 z 方向的作用电场。由式 (1) 可得, 单位长度板的内力为

$$N = D E - N_p$$

$$E = (J_x \ J_y \ J_{xy} \ C_{yz} \ C_{xz})^T$$

$$\bar{N} = (M_x \ M_y \ M_{xy} \ Q_y \ Q_x)^T$$

N_p 为由于作用电压产生的内力。

$$(M_x, M_y, M_{xy}) = \int_{h/2}^{h/2} (R_x, R_y, S_{xy}) z dz$$

$$(Q_y, Q_x) = \int_{h/2}^{h/2} (S_{yz} \ S_{xz}) dz$$

$$D = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix}, \quad D_{ij} = \int_{h/2}^{h/2} Q_{ij} z^2 dz,$$

$i, j = 1, 2, 6$

$$A_{ij} = \int_{h/2}^{h/2} Q_{ij} dz, \quad i, j = 1, 5$$

$$\begin{bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1^2 A_{44} & k_1 k_2 A_{45} \\ k_1 k_2 A_{45} & k_2^2 A_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{yz} \\ C_{xz} \end{bmatrix} = SC$$

其中: J 为弯曲应变; k_1, k_2 为剪切修正系数。

(3) 有限元形式 由 Hamilton 原理可知

$$\int_0^l [DT - DU + DW] dt = 0$$

动能 T 的变分为

$$\delta T = \int_V \delta D^T \delta u \delta v$$

应变能 U 的变分

$$\delta U = \int_A \delta E^T N dA =$$

$$\int_A \delta C^T S C + D^T D J dA - \int_A \delta F^T N_p dA$$

W 为外力所做的功。因为横向位移 w 和 H, \bar{H} 是独立的, 需要各自用形函数插值, 本文使用双线性等参元, 弯曲应变和横向剪切应变表示为 $J = -z B_b d^e$; $C = B_s d^e$; B_b, B_s 为弯曲和剪切单元应变矩阵; d^e 为单元结点位移矢量。得到下列有限元方程

$$M \ddot{p} - K_{uu} \dot{r} - K_{uv} V = F_{mech} \quad (2)$$

$$I_{mech} = K_{vu} \dot{a}$$

式中: r 为结点位移矢量; $V_{np \times 1}$ 为作用电压矢量; np 为自感作动器数; M 和 K_{uu} 为整体结构质量矩阵和弹性刚度矩阵; K_{vu}, K_{uv} 为机电耦合矩阵; I_{mech} 为由于变形引起的电流输出。

2 最优控制

(1) 控制方程 可将式(2)视为状态方程、观测方程。引进二次性能指标后, 设计最优控制策略。然而, 对于实际结构, 用有限元分析时, 其自由度很大, 求解控制方程时耗时较多。本文按模态空间展开, 采用前 n 阶模态, 通过模态转换 $r = 5 G G = [G \cdots G]^T$; 5 为前 n 阶固有振型组成的矩阵, 满足 $5^T M 5 = I$, 再考虑到模态阻尼, 式(2)可写为

$$\delta \ddot{a} + C_{mod} \dot{a} + \delta^2 G = f + 5^T K_{uv} V \quad (3)$$

$$I_{mech} = K_{vu} 5 G \quad (4)$$

式中: $\delta^2 = \text{diag}(X_1^2 \ \cdots \ X_n^2)$, X_i 为所选第 i 阶频率; $C_{mod} = \text{diag}[2N X_1 \ \cdots \ 2N X_n]$, N 为第 i 阶模态阻尼; $f = 5^T F_{mech}$ 为模态力。为了设计控制器, 式(3)、式(4)写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}^a &= a x + b w f + b_u u \\ y &= c_y x \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

这里

$$a = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -\delta^2 & -C_{mod} \end{bmatrix}$$

$$x^T = [G^T \quad \delta_G^T]^T, u = v, y = I_{mech}$$

$$b_w = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} \\ I_{n \times n} \end{bmatrix}, b_u = \begin{bmatrix} 0_{n \times np} \\ 5^T K_{uv} \end{bmatrix},$$

$$c_y = [0_{np \times n} \quad K_{vu} 5]$$

(2) LQG 控制和 H_∞ 控制

¹ LQG 控制 当受控结构考虑对状态变量和输出变量的随机扰动时, 方程(5) 写为

$$\dot{x}^a = ax + b_u u + b_w w$$

$$y = c_y x + L$$

式中: w 为过程干扰; L 为观测误差。假设干扰、误差为高斯白噪声, 系统的性能指标定义为

$$J = E \left\{ \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \right\}$$

式中: Q 为状态加权阵; R 为控制加权阵。由 Kalman 滤波器得到最优滤波信号 \hat{x}^d 后, 就可构造 LQG 补偿器, 最优控制向量 $u^* = -K_c \hat{x}^d$ 。

这里 $K_c = R^{-1} b_u^T P_c$, P_c 满足代数 Riccati 方程 $a^T P_c + P_c a - P_c b_u R^{-1} b_u^T P_c + Q = 0$

^o H_∞ 输出反馈控制 H_∞ 控制问题的标准框架如图 1 所示。 $G(s)$ 为广义受控对象, H_∞ 次优化问题可描述为: 求一真实有理控制器 $K(s)$ 使 G 稳定, 并使闭环系统满足 $\|T_{zw}\|_\infty < C$, 其中 C 为任意正数, w 为外部输入信号, 这里为模态力干扰; z 为受控输出, 这里为各阶模态速度; u 为控制信号, 这里为作用电压; y 为传感器输出信号。 T_{zw} 表示 w 与 z 之间的闭环传递函数。使用两端口模型描述方法, 式(5) 可扩展为:

$$\dot{x}^a = ax + b_w w + b_u u$$

$$z = c_z x + d_{zu} u \tag{6}$$

$$y = c_y x + d_{yw} w$$

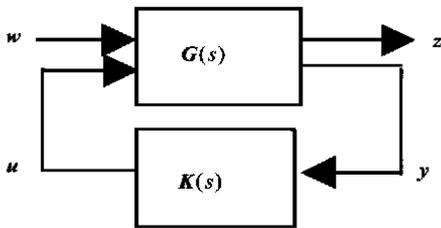


图 1 H_∞ 控制问题标准框架

式中: $c_z = [0_{n \times n} \quad I_{n \times n}]$; d_{zu} 为控制性能加权; d_{yw} 为传感误差。由 MATLAB 软件包可以对广义受控系统设计出满足条件 $\|T_{zw}\|_\infty < C$ 的输出反馈鲁棒 H_∞ 控制器 $K(s)$, 当 $C \rightarrow \min$ 时, 设计的 $K(s)$ 是最优 H_∞ 控制器。

控制器的设计目标是在有外界扰动和测量噪声的情况下, 保持被控对象的输出对象的输出尽可能小, 同时希望执行机构的输出作用保持在

定的控制能量之下。

3 数值仿真

本文采用复合材料层板 $[+ 30/- 30]_s$ 进行数值仿真, 悬臂复合层板上下表面粘贴 G-1195 压电陶瓷, 压电材料性质已在文献[6] 中列出。压电陶瓷的位置如图 2。层板厚为 1mm, 压电片厚为 0.25mm。复合材料单层材料性质为: $E_{11} = 175.74\text{GPa}$, $E_{22} = 7.03\text{GPa}$, $\nu = 0.25$, $G_{23} = 3.515\text{GPa}$, $G_{12} = G_{13} = 1.406\text{GPa}$ 。结构布置与尺寸如图 2 所示。由剪切应变能的方法得到 2 个剪

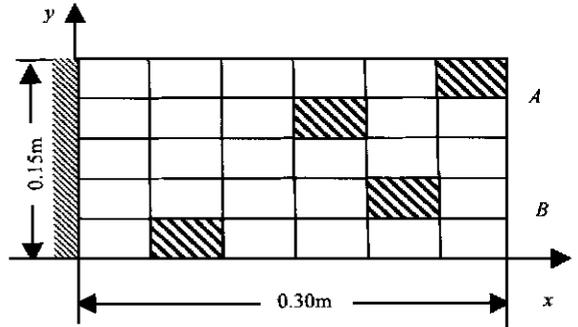


图 2 含自感作动器板结构的布置图, 阴影部分为压电薄膜

切修正系数 $k_1 = 0.8204$, $k_2 = 0.8688$ 。本文取前 10 阶模态, 前 10 阶频率如表 1, 取阻尼 $[4, 3, 2, 1, 1, 1, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5] \cdot 10^{-3}$ 。图 3 绘制出 LQG 控制下和 H_∞ 控制下输入干扰 w 广义模态速度 v 之间传递函数的 H_2 范数 $\|T_{vw}(j\omega)\|_2$ 曲线。本文给出在图 2 板位置 A 作用关于 y 轴的持续弯矩力 $M(t) = 0.05\text{N} \cdot \text{m}$ 的响应, 作用时间为 0.5s, 图 4 给出 1s 的结点 B 的横向速度曲线, 可看出无论在 $M(t)$ 作用下, 还是 $M(t)$ 停止作用后, LQG 控制和 H_∞ 控制都有较好的控制效果。

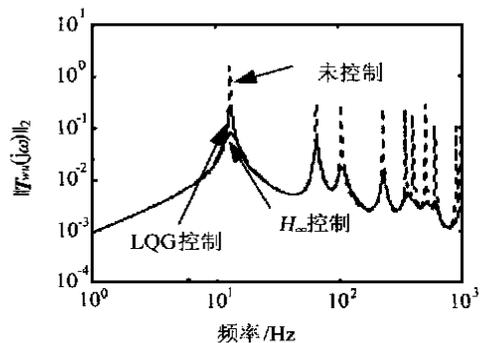


图 3 输入干扰 w 与模态坐标速度 v 之间传递函数矩阵的最大奇异值曲线

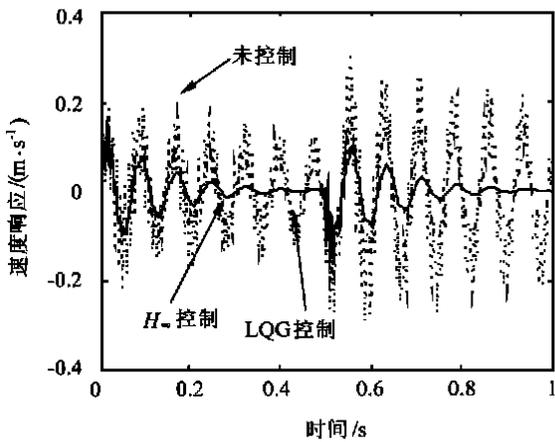


图4 在位置A处作用弯矩 $m(t)$,位置B处的横向速度响应

表1 层板结构的前10阶频率

模态	1	2	3	4	5
频率/Hz	13.04	63.81	101.52	218.51	329.88
模态	6	7	8	9	10
频率/Hz	388.68	474.36	568.25	826.25	903.90

4 结束语

本文对复合层板采用一次剪应变理论,对配置自感作动器板结构进行有限元分析,采用按结构模态展开的方法,给出以模态坐标为变量的状态方程,最后给出该结构的LQG控制和 H_∞ 控制的结果。从图3、图4可以看出文中控制是有效的,能够有效抑制外激励。同时,可看出 H_∞ 控制比LQG控制更有效。如图3可知 H_∞ 控制使得LQG控制中干扰对模态速度影响的几个峰值能够降下来,这是由于 H_∞ 控制考虑的是“极端”情况的输出(采用 H_∞ 范数),所以 H_∞ 控制对鲁棒控制的处理是较理想的。

考虑作动器定位对控制系统性能的影响,以及

考虑结构不确定性的鲁棒控制会使振动主动控制问题更加完善,这方面的工作有待于进一步讨论。

参考文献

- [1] Nam H, Kim Y. Optimal design of composite lifting surface for flutter suppression piezoelectric actuators[J]. AIAA J, 1995, 33(10): 1897~1904.
- [2] Lazarus K B, Crawley E F. Multivariable high-authority control of plate-like active structure[R]. AIAA paper 92-2529, 1992.
- [3] Han J H, Rew K H. An experimental study of active vibration control of composite structures with a piezo-film sensor[J]. Smart Material and Structure, 1997, (6): 549~558.
- [4] Chandrashekhara K, Agarwal A N. Active vibration control of laminated composite plates using piezoelectric devices: a finite element approach[J]. J of Intelligent Material System and Structures, 1993, (4): 496~508.
- [5] Anderson E H, Hagood E W. Self-sensing piezoelectric actuation: analysis and application to controlled structures[R]. AIAA-92-2465-cp, 1992.
- [6] Ha S K, Keilers C. Finite element analysis of composite structures containing distributed piezoceramic sensors and actuators[J]. AIAA J, 1992, 30(3): 772~780.

作者简介:



方有亮 男,1967年生,北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系博士生,主要从事计算力学,智能材料结构方面研究工作。联系电话 010-82317503。



武哲 男,1957年生,1988年获工学博士学位,1991年博士后出站。北京航空航天大学飞行器设计专业教授。博士生导师,曾任飞行器设计与应用力学系主任,现任北京航空航天大学副校长,主要研究领域为飞机总体和结构设计,侧重于飞行器隐身技术。

金相新技术研讨会在广州召开

中国航空学会材料工程分会材料性能表征与检测技术专业委员会于1999年11月19~22日在广州阳江市召开了金相新技术研讨会,有50余人参加会议,正式代表41人。

大会宣讲了10篇论文。颜鸣皋院士作了题为“开展航空材料应用研究的几点意见”的报告,全面论述了材料研究领域应把握的方面,受到代表的欢迎。会上重点介绍了彩色金相技术在高温合金和钢中的应用情况,证明用物理和化学方法使不同材料组成相显示出不同颜色,进而区分和鉴定这些相是十分有效的。会上还介绍了最近由国防工业出版社出版的专著《高温合金与钢的彩色金相研究》一书。在新技术展示项目中,olympus公司展示了新型金相显微镜,科视达公司介绍了制片技术和显微分析技术。代表们对新一代多用途视频显微镜表现极大兴趣。北京钢铁研究总院的金相显微镜与数码相机连接使金相照片实现了存贮与打印,省去了金相照片的暗房操作,实现了快速交流目的。该论文已推荐到材料工程杂志发表。