

文章编号: 1000-6893(2000)06-0508-04

基于模态滤波器的柔性智能桁架结构 振动主动控制实验研究

刘福强, 岳林, 张令弥

(南京航空航天大学 振动工程研究所, 江苏 南京 210016)

EXPERIMENTAL STUDY OF ACTIVE VIBRATION CONTROL OF FLEXIBLE SPACE INTELLIGENT TRUSS STRUCTURES VIA MODAL FILTERS

LIU Fu-qiang, YUE Lin, ZHANG Ling-mi

(Institute of Vibration Engin., Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要: 基于模态滤波器技术和最优控制理论,在测量加速度的情况下,采用独立模态空间控制方法研究了空间柔性智能桁架结构的振动主动控制问题。在研制了智能桁架结构的基础上,基于计算机控制系统理论,采用加速度测量进行了柔性智能桁架结构的实时计算机振动主动控制实验研究。实验结果表明该控制方法是行之有效的。

关键词: 模态滤波器; 柔性智能桁架结构; 振动主动控制; 计算机控制

中图分类号: TB 535 **文献标识码:** A

Abstract: Active vibration control of flexible space intelligent truss structures is investigated based on modal filters (MF) technique and optimal control theory. The modal acceleration response is extracted from acceleration measurements by MF. Then Leunberger observers are modified to obtain the modal displacement and modal velocity from modal acceleration. Modal control force is synthesized by the independent modal space control (MSC) method. A space intelligent truss structure with low and closely spaced frequencies is developed and real-time computer control experiments are accomplished. The experimental results demonstrate that the control strategy is effective and feasible.

Key words: flexible intelligent truss structure; active vibration control; modal filter; computer control

随着航空、航天技术的进展,对宇航等工程结构提出了一系列新的要求。为了满足这些性能指标,产生了智能结构这一概念^[1]。它是将具有传感、致动功能的元件或材料内置于结构内部或粘贴于结构的表面所形成的一种新型结构形式。由于智能结构在振动主动控制、定位与形状精密控制等方面所具有的优越性能,80年代中期以来,智能结构吸引了众多的研究者,并取得了很多进展。对智能结构的振动主动控制,文献[2]作了很好的评述。在结构振动主动控制方法中常采用独立模态空间控制方法(MSC)。MSC方法不仅计算简单、效率高,能满足实时控制的需要,而且能在一定程度上抑制控制溢出的产生^[3]。

在实现对柔性结构系统的振动主动控制时,常常遇到观测溢出^[3]的问题。采用MSC方法时,为了抑制观测溢出,Merovitch等提出了模态滤

波器^[4](MF)的概念。实践表明,相比Leunberger观测器,MF能更有效地抑制观测溢出。不过Merovitch提出的模态滤波器实现方法需要对结构系统的响应作出一定的假设,因此对于真实的复杂结构其使用还存在一定的困难。后来Zhang^[5]提出了一种基于试验模态分析的方法,直接采用实测的频响函数来提取MF,从而把MF这一技术推向了实用阶段。

加速度传感器因具有频带宽、结构简单、重量轻等优点而获得了广泛使用,因此研究基于加速度测量的控制规律设计具有较大的实用价值。虽然研究基于状态反馈的速度或位移测量,再利用观测器重构出全部状态变量而实现最优控制的文献十分丰富,但是基于加速度测量实现最优控制的研究工作相对较少。本文选用数据采集板、信号适调器和微型计算机等构成一个实时计算机振动主动控制系统。首先对智能桁架结构进行试验模态分析,根据试验得到的频响函数提取模态滤波器。然后基于模态滤波器技术和最优控制理论,采

收稿日期: 1999-09-17; 修订日期: 2000-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59675015)

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2000/06/0508/>



用加速度测量进行了柔性智能桁架结构的实时计算机振动主动控制实验研究。实验结果表明了该控制方法的有效性。

2 基于 MF 和最优控制理论的 MSC 方法

根据文献[1], 建立智能桁架结构的机电耦合有限元模型

$$M \ddot{x} + kx = BF_c \quad (1)$$

其中: M 为 $n \times n$ 维结构系统的质量矩阵; K 为 $n \times n$ 维机电耦合刚度矩阵; B 为 $n \times m$ 维压电主动构件单元的位置矩阵; F_c 为 $m \times 1$ 维压电主动构件产生的控制力向量; m 为主动构件数。将系统模型转换到模态坐标下

$$\ddot{q} + \omega^2 q = \Phi_B F_c = f \quad (2)$$

式中: ω 为由固有频率组成的对角矩阵, 其维数为 $n \times n$; Φ 为 $n \times n$ 维振型矩阵; 上标 T 表示转置; q 为 $n \times 1$ 维模态坐标向量; f 为 $n \times 1$ 维模态控制力向量。当受控模态数与主动构件数一致时, Φ_B 为方阵。采用最优控制理论实现独立模态空间控制方法时, 模态控制力可表示为

$$f_r = - (h_{r1} \dot{q}_r + h_{r2} q_r) R_r \quad r = 1, 2, \dots \quad (3)$$

式中: h_{r1}, h_{r2} 为控制器增益。定义以下控制性能指标

$$S_r = \int_0^{\infty} (\omega^2 q_r^2 + \dot{q}_r^2 + f_r^2 / R_r) dt \quad r = 1, 2, \dots \quad (4)$$

其中: R_r 为控制力加权系数。通过优化这个性能指标而得到

$$h_{r1} = (-\omega^2 + \omega \sqrt{\omega^2 + R_r}) / R_r$$

$$h_{r2} = \sqrt{(1 + 2h_{r1}) / R_r} \quad (5)$$

确定所需的模态控制力 f 后, 实际控制力

$$F_c = (\Phi_B)^{-1} f \quad (6)$$

式中: ϕ 表示受控模态的振型。为了实现 MSC 最优控制, 需要同时知道模态位移和模态速度, 而通常测量的是物理加速度。可以引入模态滤波器实现从物理加速度来得到模态加速度。根据文献[6]中对模态滤波器的定义, 设第 r 阶模态滤波器向量为 Ψ_r , 第 i 阶振型为 ϕ_i , 则有

$$\Psi_r^T \phi_i = \begin{cases} 1 & i = r \\ 0 & i \neq r \end{cases} \quad (7)$$

即 Ψ_r 与所有除 r 阶振型外的其余各阶振型正交。根据模态叠加原理, 系统响应为

$$\ddot{x} = \sum_{i=1}^{N_f} \ddot{\phi}_{q_i} \quad (8)$$

其中: N_f 表示叠加的模态数; q_i 为模态坐标。在式(8)的两边乘以模态滤波器向量 Ψ_r^T , 则有

$$\Psi_r^T \ddot{x} = \ddot{q}_r \quad (9)$$

可以利用模态滤波器的这一特性, 实现从物理响应中得到模态响应。而且从式(9)还可以知道, 在理论上模态坐标中不会含有其他各阶模态分量, 从而有力地避免了因观测溢出而产生的系统不稳定现象。至于模态滤波器的具体实现方法可参考文献[6]。为了从模态加速度响应得到模态位移和模态速度响应, 首先对每一阶被控模态, 将式(2)改写为状态方程形式

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_r \\ q_r \end{Bmatrix} = A_r \begin{Bmatrix} q_r \\ \dot{q}_r \end{Bmatrix} + B_r f_r \quad r = 1, 2, \dots \quad (10)$$

其中: $A_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix}$; $B_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$; C_r 为相应维数的矩阵。定义以下观测器方程

$$\begin{Bmatrix} \dot{\hat{q}}_r \\ \hat{q}_r \end{Bmatrix} = A_r \begin{Bmatrix} \hat{q}_r \\ \dot{\hat{q}}_r \end{Bmatrix} + B_r f_r + K_r \left(y - C_r \begin{Bmatrix} \hat{q}_r \\ \dot{\hat{q}}_r \end{Bmatrix} \right) \quad (11)$$

$$y = C_r \begin{Bmatrix} \dot{q}_r \\ q_r \end{Bmatrix}$$

式中: K_r 为观测器的增益矩阵。这时模态控制力为

$$f_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -h_{r1} R_r & -h_{r2} R_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{q}_r \\ \dot{\hat{q}}_r \end{Bmatrix} = G_r \begin{Bmatrix} \hat{q}_r \\ \dot{\hat{q}}_r \end{Bmatrix} \quad (12)$$

令 $V_r = (E + K_r C_r)^{-1}$, E 为相应维数的单位矩阵。则

$$\begin{Bmatrix} \dot{\hat{q}}_r \\ \hat{q}_r \end{Bmatrix} = V_r \left[A_r \begin{Bmatrix} \hat{q}_r \\ \dot{\hat{q}}_r \end{Bmatrix} + B_r f_r + K_r y \right] \quad (13)$$

记 $e_r = \begin{Bmatrix} q_r \\ \dot{q}_r \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \hat{q}_r \\ \dot{\hat{q}}_r \end{Bmatrix}$ 为观测器的误差, 则

$$\dot{e}_r = V_r A_r e_r \quad (14)$$

使矩阵 $V_r A_r$ 的极点都位于左半平面, 可保证观测器渐近稳定并且观测误差渐近趋于 0。合理地配置其极点, 可使它满足控制器的性能要求。定义

$$g_r = \{q_r \quad \dot{q}_r \quad e_r^T\}^T \quad (15)$$

联立式(10)、式(13)与式(14)得到包含模态方程

和观测器的增广方程

$$\dot{g}_r = \begin{bmatrix} A_r + B_r G_r & -B_r G_r \\ 0 & V A_r \end{bmatrix} g_r \quad (16)$$

从上式可以清楚地知道, 经这样设计的观测器仍符合观测器设计的分离定理。

为清楚起见, 当采用加速度测量时, 基于MF和最优控制理论的智能桁架结构的独立模态空间控制方法的流程图如图1所示。

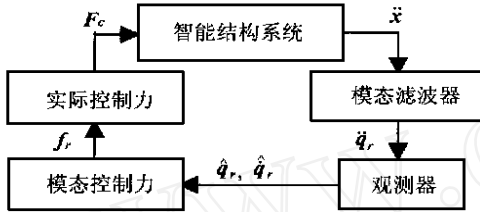


图1 控制流程图

2 实时计算机柔性智能桁架结构振动主动控制实验

2.1 实验装置

本文研究对象为如图2所示的密频三维7层空间智能桁架结构。该智能桁架结构尺寸为0.3m

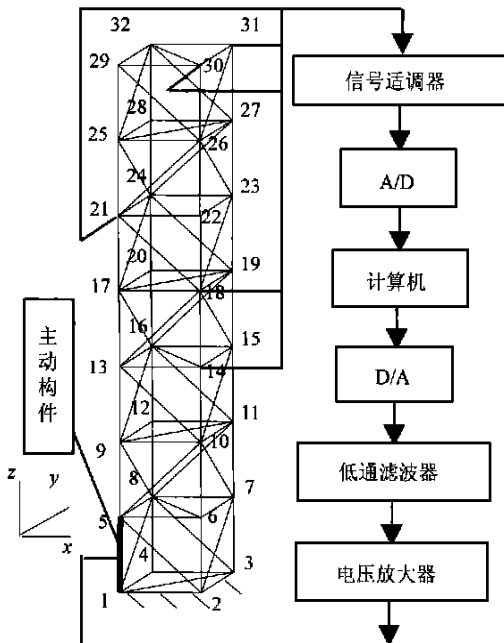


图2 空间智能桁架结构

×0.3m × 2.1m, 有96根杆件, 杆件为∅6 × 1的铝合金制成, 弹性模量为72.7GN/m², 密度为3100kg/m³。底部4个结点(1, 2, 3, 4)全部固定, 以模拟悬臂边界条件, 共84个自由度。根据当传感器用于模态滤波器时的优化配置方法将5个

PCB 加速度传感器配置于节点 14_x, 18_x, 21_x, 30_x, 31_x 方向^[7]。采用PZT5压电材料研制了一个主动构件, 其主要性能参数如表1所示, 并将该主动构件配置于节点1~5之间^[7]。对该智能结构进行模态试验, 利用特征系统实现识别算法得到的频率和阻尼比如表2所示。从表2可知, 第1、2和3、4阶为密集模态。由此可见研制的该智能桁架结构较好地再现了柔性结构频率较低而且密集的特点, 控制的实现具有较大的难度。

表1 主动构件的主要性能参数

刚度	9.58N/μm	工作电压 (50Hz, 峰值)	220V
最大输出位移 (20Hz, 峰值)	5.8μm	最大夹紧力 (20Hz, 峰值)	56N
平均位移增益	25.55nm/V	平均力增益	0.245N/V

实时计算机控制系统框图也表示于图2中。从加速度传感器得到的信号经过放大、抗混滤波后A/D采样, 由Pentium-Pro180计算机进行模态滤波和控制力计算, 然后将控制力信号经过低通滤波, 再送到电压放大器驱动主动构件进行控制。

2.2 模态滤波器的试验提出

采用真实模态试验得到的频响函数来观察用模态滤波器提取模态坐标的效果。在图2中, 采用锤击法逐点敲击, 多点测量响应, 可得到一个频率响应矩阵, 利用文献[6]所述的模态滤波器提取方法, 得到模态滤波器。从图3~图5可知, 采用模态滤波器能较好地提出单模态坐标响应。

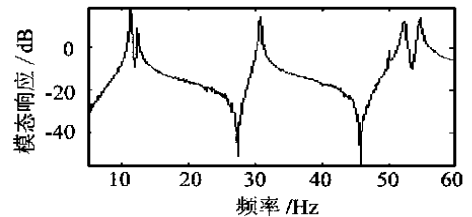


图3 21y方向的原点频响函数

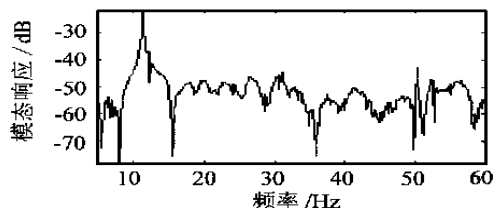


图4 模态滤波器提出的第1阶模态响应

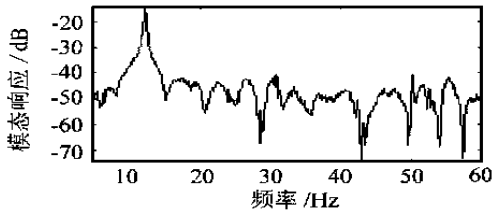


图 5 模态滤波器提出的第 2 阶模态响应

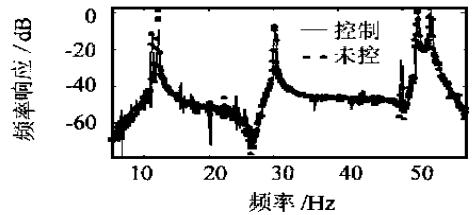


图 7 控制第 2 阶模态时 30y 方向频率响应

2.3 实验结果与分析

采用 C 语言和汇编语言混合编程来实现控制算法。直接采用主动构件为扰动源, 首先给智能桁架结构一定的扰动, 然后让智能桁架结构自由衰减, 这时再将主动构件用作控制器, 对柔性智能桁架结构施加控制作用。对正弦扰动、正弦扫频扰动和随机扰动 3 种情况进行了控制实验研究。由于篇幅所限, 这里只介绍随机扰动作用下实时控制实验结果。控制前/后固有频率和阻尼比的变化情况列于表 2 中。而控制前/后主动构件扰动节点 30y 方向的频响函数如图 6 和图 7 所示, 这里频

表 2 实时计算机振动主动控制实验结果

控制		第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 4 阶	第 5 阶
未控	频率/Hz	11.38	12.21	30.28	52.57	54.62
	阻尼比/%	0.301	0.284	0.101	0.171	0.227
控制第 1 阶	频率/Hz	11.32	12.22	30.28	52.57	54.64
	阻尼比/%	1.937	0.271	0.104	0.168	0.241
控制第 2 阶	频率/Hz	11.28	12.20	30.27	52.60	54.60
	阻尼比/%	0.297	1.102	0.092	0.186	0.219

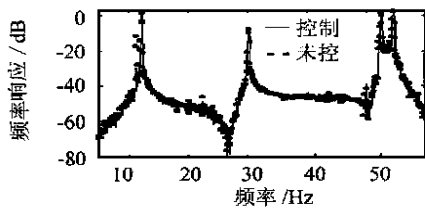


图 6 控制第 1 阶模态时 30y 方向频率响应

响函数为 10 次平均的结果。当分别控制第 1 至第 2 阶模态时, 被控模态阻尼比分别增加了 1.636%, 0.818%; 而节点 30y 方向的频响函数分别衰减了 17.93dB, 10.72dB。

参 考 文 献

- [1] 李俊宝. 智能桁架结构设计、建模与阻尼控制的理论和实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1996
- [2] 黄文虎, 等. 航天柔性结构振动控制的若干新进展[J]. 力学进展, 1997, 27(1): 5~ 18
- [3] Meirovitch L, Baruh H. Control of self-adjoint distributed-parameter system [J]. Journal of Guidance and Control, 1982, 5(1): 60~ 66
- [4] Balas M J. Feedback control of flexible structures[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1978, 23(4): 673 ~ 679
- [5] Zhang Q, Allemang R J, Brown D L. Modal filters: Concept and Application [A]. In: Proceedings of the 8th International Modal Analysis Conference [C], Hyatt Orlando, Kissimmee, Florida, 1990. 487~ 496
- [6] 卢连成, 吴琼, 张令弥. 智能空间桁架结构的独立模态控制方法[J]. 振动工程学报, 1997, 10(4): 480~ 485
- [7] 刘福强. 柔性智能桁架结构振动主动控制及相关问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1999

作者简介:



刘福强 男, 汉族, 1968 年 7 月生, 博士。毕业于南京航空航天大学, 研究方向: 智能结构和振动控制。电话: 025-4892126, E-mail: fuqliu@163.net