

文章编号: 1000-6893(2000)01-0060-04

## 振动结构的多输入/多输出实时辨识控制与试验研究

马扣根, 顾仲权

(南京航空航天大学 直升机技术研究所, 江苏 南京 210016)

### M M O REAL-TIME IDENTIFICATION CONTROL AND EXPERIMENT OF VIBRATIONAL STRUCTURES

MA Kou-gen, GU Zhong-quan

(Research Institute of Heli Tech., Nanjing Univ. of Aero. and Astro., Nanjing 210016, China)

**摘要:** 发展了一种多输入/多输出、具有实时辨识和控制能力的自适应控制方法和控制系统, 并将其应用于某自由-自由结构的振动控制。采用最小均方算法统一处理系统的实时辨识与控制问题, 在没有任何受控结构特征信息的情况下, 实现了对结构振动的自适应控制。控制系统由 TM S320C30 数字信号处理器和多通道数据采集卡构成, 辨识与控制方法由 TM S320C30 数字信号处理器实现。对周期激励, 在激励信号恒频率/恒振幅、变频率、变振幅时, 受控结构的振动显著减小, 各传感器测得加速度的平方和为无控时的 1% 或更小。

**关键词:** 自适应控制; 振动; 系统辨识; 计算机控制

**中图分类号:** TP273; TN16; V249.122 **文献标识码:** A

**Abstract** A M M O adaptive control system which performs both system identification and control in real time has been developed and applied to a free-free vibrational structure. The identification and control are realized in unison by the recursive least mean square. Vibrational structures without any information known in advance are controlled. The control system consists of a TM S320C30 data signal processing board, which is to calculate the identification and control algorithm, and a multi-channel data acquisition board. For periodic excitations, the controller provides satisfactory vibration reduction in the cases of constant frequency/constant amplitude, varied frequency, and varied amplitude excitations. The sums of the squared accelerations in controlled cases are decreased to 1% of those in uncontrolled cases.

**Key words:** adaptive control; vibration; system identification; computer control

结构振动主动控制是被航空、航天、土木、机械等领域的研究者广泛关注的一门高新技术<sup>[1]</sup>。采用的控制方法有前馈控制与反馈控制两类, 而基于自适应滤波技术的前馈控制是减小结构强迫振动的有效手段<sup>[2-5]</sup>, 如柔性结构的控制、土木结构在 seismic 激励下的振动控制和在风载下的振动控制、直升机结构的振动控制、机翼颤振的主动抑制等。这些前馈控制都是采用一个传感器及一个作动器, 因此它们均属于单输入/单输出控制。另外, 这些控制中认为受控结构的特性是预先可知且不变的, 从而它们对受控结构特性的变化的适应能力不强。虽然随着以数字信号处理器(DSP)为代表的计算机控制硬件水平的提高, 使得对具有多个作动器和多个传感器的多输入/多输出控制的研究与实现成为可能, 但至目前发表的相关文献很少。文献[6]研究了多输入/多输出的快速

模式(FTF)自适应控制, 并进行了计算机仿真。文献[7]研究了隔振平台的振动控制, 进行了试验。

本文在作者研究的单输入/单输出控制的基础上, 进一步进行振动结构的多输入/多输出实时辨识与控制方法研究, 并以 DSP 为核心组成的多输入/多输出控制系统进行试验。

### 1 多输入/多输出自适应控制方法

描述受控结构动力学特性的方法有多种, 如传递函数、状态方程、脉冲响应等。在此, 采用脉冲响应。对具有  $M$  个作动器、 $L$  个传感器, 且受持续外激励的线性受控结构, 其传感器的测量可表述为外激励引起的响应与控制引起的响应的叠加, 即

$$E = D + HU \quad (1)$$

式中:  $E = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_L]^T$ ,  $e_j$  为第  $j$  个传感器的测量;  $D = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_L]$ ,  $d_j$  为外激励引起的第  $j$  个传感器的测量;  $U = [U_1^T \ U_2^T \ \dots \ U_M^T]^T$  为控制信号构成的序列;  $U_i = [u_i(n) \ u_i(n-1) \ \dots \ u_i(n-J+1)]$  为第  $i$  个控制信号构成的序

列,  $u_i(n)$  为第  $i$  个控制信号在  $n$  时刻的值,  $J$  为受控结构脉冲响应序列的长度;  $H = [H_{ji}]_{j=1,2,\dots,L; i=1,2,\dots,M}$  为脉冲响应组成的矩阵;  $H_{ji} = [h_{ji0} \ h_{ji1} \ \dots \ h_{ji(Q-1)}]$  为第  $i$  个控制与第  $j$  个传感器通道脉冲响应序列。

控制器设计的过程就是确定适当的控制, 使得给定的性能指标极小化。本文选定  $L$  个传感器信号的平方和为性能指标, 即

$$J_e = E^T E \quad (2)$$

采用 FIR 滤波器形式的控制规律, 即

$$u_i(n) = W_i^T X_c \quad (3)$$

式中:  $W_i = [w_{i1} \ w_{i2} \ \dots \ w_{iI}]^T$  对应第  $i$  个控制器的权系数序列,  $I$  为各控制器权系数序列的长度;  $X_c = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-I+1)]^T$  为参考信号序列,  $x$  为参考信号。

由式(1)、式(3)知, 为获得最佳控制效果, 必须确定两组系数, 一是受控结构脉冲响应矩阵  $H$  和控制器权系数序列  $W$ 。确定  $H$  的过程称为系统辨识, 确定  $W_i$  的过程称为系统控制。对定常受控对象,  $H$  可通过离线估计得到。对时变受控对象, 由于离线估计的精度不足, 将使控制性能变差, 甚至使控制系统失稳。因此, 最理想的方案是自适应地在线确定  $H$  和  $W_i$ , 如图 1。

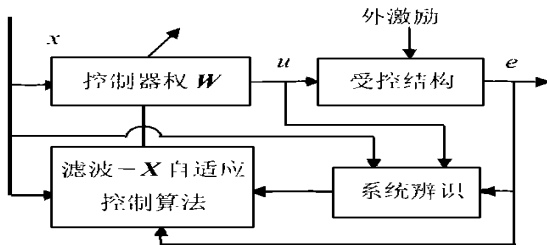


图 1 具有实时辨识与控制功能的自适应控制系统

(1) 系统辨识 在线系统辨识的过程即在线自适应确定  $H$ 。由式(1)有

$$e_j = d_j + H_j U \quad (4)$$

式中:  $H_j = [H_{j1} \ H_{j2} \ \dots \ H_{jM}]$ 。

假定外激励引起的响应可由参考信号线性表示, 即

$$d_j = C_j X \quad (5)$$

式中:  $X = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-K+1)]^T$ ;  $C_j = [c_{j0} \ c_{j1} \ \dots \ c_{j(K-1)}]$

则式(4)可改写为

$$e_j = \Theta_j^T \Phi_j \quad (6)$$

式中:  $\Theta_j = [H_j \ C_j]^T$  为待辨识参数;  $\Phi_j = [U \ X]^T$ 。则待辨识参数可由下列递推公式求得

$$\hat{\Theta}_j(n+1) = \hat{\Theta}_j(n) + \gamma [e_j(n) - \hat{\Theta}_j^T(n) \hat{\Phi}_j(n)] \quad (7)$$

式中:  $\gamma$  为收敛因子;  $\hat{\Theta}_j$  为  $\Theta_j$  的实时估计;  $\hat{\Theta}_j$  将使传感器的测量值与其估计值的差最小。

(2) 系统控制 将式(3)代入式(1), 并假定控制器的权系数在各时刻变化不大, 经适当整理后, 式(1)可改写成

$$E = D + RW \quad (8)$$

式中:  $W = [W_1^T \ W_2^T \ \dots \ W_M^T]^T$ ;  $R = [R_{ji}]_{j=1,2,\dots,L; i=1,2,\dots,M}$  称为滤波- $X$  信号矩阵,  $R_{ji} = [r_{ji0} \ r_{ji1} \ \dots \ r_{ji(Q-1)}]$ , 矩阵中的元素为

$$r_{ji(m-1)} = \sum_{k=0}^{J-1} h_{jik} x(n-m+1-k) \quad (9)$$

将式(8)代入式(2)有

$$J_e = D^T D + 2D^T R W + W^T R^T R W \quad (10)$$

为获得最优的  $W$ , 必须决定  $J_e$  对  $W$  的导数, 然后根据最小均方法(LMS), 对  $W$  进行递推, 使  $W$  收敛到其最优值, 即

$$W(n+1) = W(n) - \mu R^T E \quad (11)$$

式中:  $\mu$  为收敛系数。

由式(11)可知,  $E$  可由传感器测得,  $R$  可由  $H$  和参考信号根据式(9)计算得到, 而  $H$  可通过系统辨识而得到, 因此收敛系数  $\mu$  对  $W$  有很大的影响。

研究表明,  $\mu$  应小于滤波- $X$  矩阵的自相关矩阵  $R^T R$  最大特征值倒数的 2 倍, 但在实际应用中仍然是以试凑为主, 一般取  $\mu$  为一数值。对于单输入/单输出系统, 取  $\mu$  为一数值可方便地使  $W$  收敛到其最优值。但对于多输入/多输出系统, 特别是对于各通道特性  $M_i$  相差较大的系统, 采用单一的  $\mu$  值就难以满足各通道的要求, 在某些控制器权系数收敛到其最优值时, 其它的控制系数或是发散, 或是收敛过程十分缓慢。因此本文提出在多输入/多输出控制中采用多收敛系数, 即取  $\mu$  为矩阵。

## 2 受控结构与试验系统

图 2 为受控结构与试验系统简图。受控结构为自由-自由钢梁, 以模拟直升机机身。它的尺寸为  $300\text{cm} \times 6\text{cm} \times 2.5\text{cm}$ , 质量为  $35.1\text{kg}$ 。用长  $1\text{m}$  的细铁丝吊起, 悬吊点为自由-自由梁在水平面内一阶弯曲固有模态的节点处。梁的刚体摆振频率为  $0.5\text{Hz}$ , 在水平面内一阶弯曲固有频率为  $14.7\text{Hz}$ 。

作动器为自行研制的电磁式惯性型作动器, 共两个。每个作动器的运动质量为  $0.5\text{kg}$ , 最大允许振幅为  $12\text{mm}$ , 频率  $5\text{Hz}$  时的驱动力为  $6\text{N}$ , 总

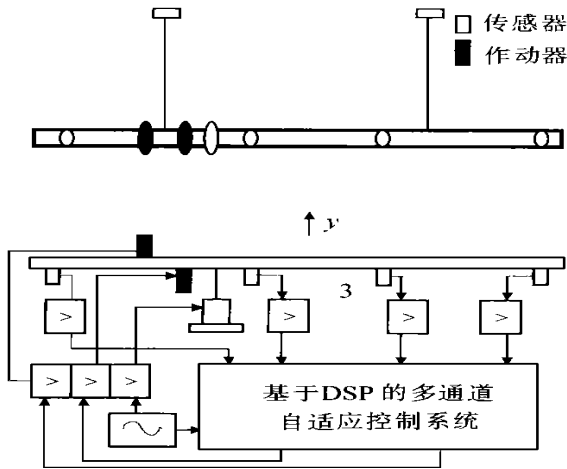


图2 受控结构与试验系统

质量为 1.1kg。

4个加速度传感器分别置于梁的头部、中部、尾部。由2kg激振器激起结构沿y向(在水平面内)振动。控制的目标是使传感器处的结构振动水平达到最小。

测控系统为以TM S320C30A 数字信号处理(DSP)板为核心而组成的主从式计算机系统。主机-PC机辅以8路A/D、4路D/A实现多通道快速数据采集、控制输出与从机DSP的管理。DSP以其机器字位数长、强大的运算能力负责实时系统辨识与控制算法的实现,以提高运算速度、精度和自适应算法数值稳定性。

软件设计采用C语言、80X86宏汇编语言和DSP专用汇编语言编程。C语言与80X86宏汇编语言混合编程,在微机运行。DSP专用汇编语言单独编程,单独加载到DSP板的双寻址存储器中,由DSP控制运行。

### 3 试验结果

试验按下列项目组织:常频常幅周期激励、变频周期激励、变幅周期激励,以模拟直升机机身结构所受的外激励。

试验过程中的采样频率为100Hz。在每一次采样周期内,采入传感器的信号和参考信号,计算控制信号,递推待辨识的系统通道传递函数和控制器的权系数。

(1)常频常幅周期激励 图3为在14Hz定幅激励作用下4个加速度传感器的时间历程。在0~0.5s控制器不工作,在控制器工作约1s后,4个传感器所测得的响应都得到控制。图4为在线辨识时第1个传感器处的误差。图5分别为两控制器的第1个权系数,从中可知约1.5s后,控制

器的权趋于稳定。从性能指标的时间历程(如图6)可知,性能指标由未控制时的1.2降至控制时的0.01,控制后的值约占未控制值的1%。

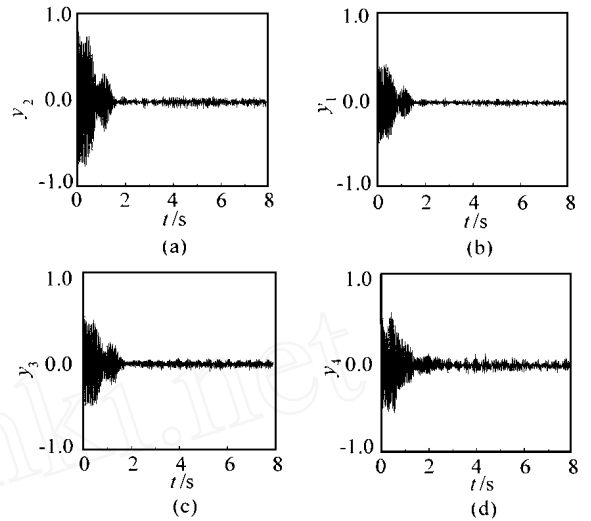


图3 传感器的时间历程

(a)传感器1; (b)传感器2; (c)传感器3; (d)传感器4

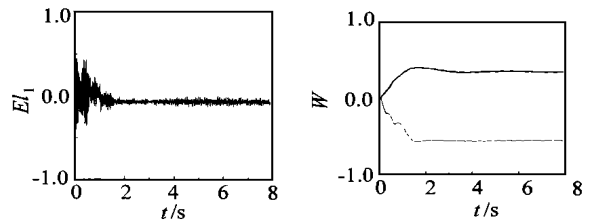


图4 辨识误差

图5 控制器的权

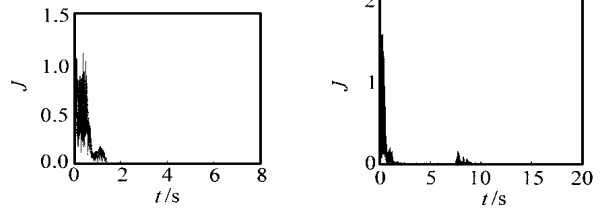


图6 性能指标

图7 性能指标

(2)常频变幅周期激励 图7~图9为定频变幅激励作用下的试验结果。从图9可知,在外扰幅值发生改变时,最优的权系数相应改变,表明了控制器对外扰幅值的改变有良好的适应性。图7、图8表明,除了在外扰幅值改变的瞬时传感器所测得的响应略有跳动外,其它时刻响应均得到有效控制。

(3)变频常幅周期激励 图10为变频定幅激励作用下的时间性能指标。外扰频率的改变方式为:14Hz-15Hz-14Hz-13Hz-14Hz。从图可看

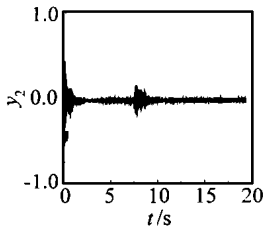


图 8 传感器 2 的时间历程

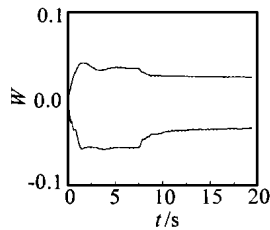


图 9 控制器权

出,除了在外扰频率改变的瞬时传感器所测得的响应有跳动外,其它时刻响应均得到有效控制。从图 11 所示的两控制器第 1 个权系数可知,在外扰频率发生改变时,最优的权系数相应改变,表明了控制器对外扰频率改变的适应性。(由于受测控系统内存的限制,控制器权系数仅记录了 35s)。

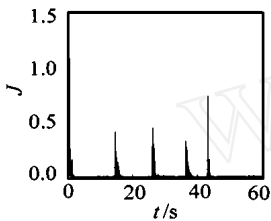


图 10 性能指标

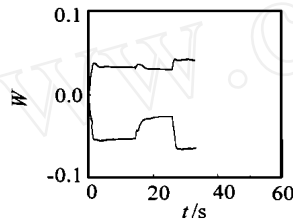


图 11 控制器权

### 参 考 文 献

- [1] 顾仲权, 马扣根, 陈卫东. 振动主动控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [2] Melcher J, Wimmel R. Modern adaptive real-time con-

trollers for actively reacting flexible structures[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1991 (2): 328~ 346

- [3] 马扣根, 陈晔, 顾仲权, 等. 柔性建筑结构风振自适应控制方法与试验研究[J]. 振动工程学报, 1998, 11(2): 131~ 137.
- [4] 马扣根, 顾仲权. 直升机结构响应自适应控制研究[J]. 航空学报, 1997, 18(3): 359~ 362
- [5] Roy ID, Eversman W. Adaptive flutter suppression of an unswept wing [J]. Journal of Aircraft, 1996, 33: 775~ 783
- [6] 彭福军. 直升机结构响应主动控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1997.
- [7] Sommerfeldt S D. Multi-channel adaptive control of structural vibration[J]. J. of Noise Control Engineering, 1991, 37(2): 77~ 89.

### 作者简介:



**马扣根** 1965年2月生,工学博士,副教授,硕士研究生导师。曾获得省部级科技进步奖4次,在国内外学术刊物和会议发表论文60余篇,参与编写专著2部,主要研究领域为振动主动与被动控制,基于高速信号处理器(DSP)的计算机控制系统,用于振动与噪声控制的智能结构,直升机动力学与振动控制,控制系统的故障诊断等。



**顾仲权** 1938年1月生,教授,博士生导师,主要研究方向为振动控制,振动主动控制,直升机动力学与控制,智能结构等。电话: 025-4892119, Email: gzqae@nuaa.edu.cn

## 第四届复合材料专业分会组建会议暨 2000~ 2020 我国复合材料技术发展研讨会在北京举行

中国航空学会“第四届复合材料专业分会组建会议暨 2000~ 2020 我国复合材料技术发展研讨会”于 1999 年 10 月 28~ 30 日在北京举行。专业分会委员和复合材料专家学者共 34 人出席了会议。会议由专业分会主任宋焕成教授主持,专业分会副主任高树理研究员在会上作了“第三届复合材料专业分会工作总结报告”。中国航空学会副秘书长王玉春研究员宣布了“第四届复合材料专业分会委员名单”并讲话。

第四届复合材料专业分会第一次工作会议讨论决定分会下设四个专业委员会: 聚合物基复合材料专业委员会(挂靠北京航空航天大学); 非聚合物基复合材料专业委员会(挂靠西北工业大学); 功能复合材料专业委员会(挂靠济南复合材料特种结构研究所); 复合材料设计与强度专业委员会(挂靠沈阳飞机设计研究所)科技咨询服务部。科技咨询服务部继续聘请第三届专业分会委员于德昌高工任主任。

2000~ 2020 我国复合材料技术发展研讨会由专业分会副主任陈绍杰研究员和高树理研究员共同主持。大会报告与发言,以复合材料技术最新进展和应用为重点,内容涉及国外航空复合材料技术(树脂基体、低成本制造技术和设计技术等)现状和发展趋势; 碳纤维国产化的现状、前途; 透波复合材料和原位复合材料; 以及复合材料在民用建筑基础设施上的应用。会上会下讨论十分热烈,并取得共识。

2000~ 2020 我国航空复合材料技术发展设想与建议,在讨论稿基础上,经补充修改完善将形成正式文本。

(李铁柏)