

压电智能结构的研究进展

李传兵, 廖昌荣, 张玉麟, 陈伟民, 黄尚廉

(重庆大学 智能结构中心, 重庆 400044)

摘要: 压电智能结构是目前智能结构的研究热点之一, 有着广阔的应用前景, 取得了丰富的研究成果。文章综述了压电智能结构中传感器和执行器、动力学建模以及应用研究等方面的进展, 并提出了压电智能结构工程实用化过程中必须解决的几个问题

关键词: 智能结构; 压电材料; 振动控制; 损伤监测

中图分类号: TB381

文献标识码: A

Advances of Research on Piezo-intelligent Structures

LI Chuan-bing, LIAO Chang-rong, ZHANG Yu-lin, CHEN Wei-min, HUANG Shang-lian

(Center for Intelligent Structures, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract Piezo-structure, which has widely application prospect, is one focus of present investigation on intelligent structures. Many significant advances have been achieved in this field. Some fundamental problems of piezo-structures, such as sensor/actuator, dynamic model, application, are reviewed in detail. The problems, which must be resolved in the process of application of piezo-intelligent structures to practical engineering, are put forward.

Key words intelligent structure; piezoelectric material; vibration control; structural health monitoring

1 引言

由于在航空航天等方面的潜在应用价值, 智能结构在近年来得到了长足的发展^[1,2]。在70年代末80年代初, 美国军方为提高其飞行器的性能, 首先提出了“智能”结构的概念, 并投入了大量的人力物力进行研究。智能结构系统是在结构中集成传感器、执行器和控制器, 赋予结构健康自诊断、环境自适应及损伤自愈合等某些智能功能与生命特征, 以增强结构安全、减轻质量、降低能耗、提高性能的一种仿生结构系统。目前, 这种具有自感觉和控制能力的“主动”结构, 通常是在常规的弹性材料上嵌入或埋入作为传感器和执行器的功能材料来构成, 而控制回路的集成还较为困难, 一般都制成单独的控制系统。功能材料主要有形状记忆合金(SMA)、压电材料(PZT和PVDF)、电流变液(ERF)、磁流变液(MRF)、磁致伸缩材料等。这些功能材料各有优缺点, 而压电材料以其独特的优点在智能结构中得到了广泛的应用。因此, 目前对智能结构的研究热点之

一是将压电材料集成于母体结构的压电智能结构, 并取得了丰硕的研究成果。本文将就这方面的研究进展进行综述

2 压电传感器和执行器

用压电材料制作的压电传感器、执行器是压电智能结构的基础。压电材料在智能结构的应用中的主要优点有以下几个方面:

(1) 压电材料具有正逆压电效应, 这使得压电材料在智能结构中既可作传感元件又可作驱动元件;

(2) 频响范围宽;

(3) 压电效应有较好的线性关系;

(4) 压电材料的输入输出均为电信号, 易于测量与控制;

(5) 压电材料功耗低;

(6) 压电材料容易加工得很薄, 特别适合于柔性结构;

(7) 压电材料在柔性结构的控制中作传感器时

不需要参考点,而作为执行器也不需要支承点;

(8) 压电材料的制备技术也日趋完善和成熟,因此,压电材料被广泛地应用在智能结构中作传感器和执行器

自 1880 年居里兄弟最先发现压电效应以来^[1],目前已知的压电材料已有近千种,智能结构中应用最多的是压电陶瓷 (PZT) 和压电聚合物 (PVDF) 两类。其中 PZT 既可作传感器,又可作执行器。PVDF 产生的驱动力太小,一般只用作传感器。另外,压电漆和压电膜涂层等压电复合材料,可涂于复杂形状的结构上监测结构的工作状态,使用也非常方便

压电类智能结构中,压电材料与主体结构的连结方式有嵌入式与粘贴式两种,而且分布形式又有连续分布与小片离散分布两种形式。分散粘贴点式压电执行器不但制作较为方便,而且有利于有限元建模分析,便于进行结构与控制系统的设计。因此,表面粘贴小片离散分布式压电智能结构的研究相对较多。

压电传感器是利用压电材料的正压电效应,即压电材料变形时会在两极感应出电荷,把机械量转换成电量。压电传感器是一种应变传感器,通过应变来进行其他机械量的测量。压电传感器与应变片同属于应变传感器,但压电传感器具有后处理电路及其调式简单,受温度的影响小的优点,在智能结构中得到广泛应用。

压电执行器则是利用压电材料的逆压电效应,通过施加控制电压使压电执行器本身变形来对结构产生驱动作用,是一种应变执行器。

压电执行器产生的驱动力较小,多用于柔性结构的振动主动控制中。用多片压电片叠起来的压电堆可以在一定程度上解决压电执行器驱动力小的问题,如日本从航天结构振动主动控制可实现性的角度研制的压电堆式执行器,可以产生 1 000 N 以上的驱动力,但质量也在 2 kg 以上,在实际应用中也受到了限制。

随着压电传感与驱动研究的深入,已经实现了用同一压电元件既作传感器又作驱动器,即自感知压电驱动技术。自感知驱动技术的关键在于如何区分出加在压电元件上的驱动信号和由于结构变形而产生的电荷信号。一种方式是在压电元件两端并联一个参考电容,再通过适当的调调电路得到压电元件的应变信号^[3]。另外一种方式是利用电桥平衡来从压电元件两端提取感应电荷^[4],原理如图 1 所示。该电路中 A、B 两端的电压为

$$V_{AB} = V_1 \left[\frac{1}{\frac{1}{R_1 C \omega j} - \frac{1}{\frac{1}{R_2 C_{PZT} k_j}}} \right] - V_s \left[\frac{R_2 C_{PZT} k_j}{\frac{1}{R_2 C_{PZT} k_j}} \right] \quad (1)$$

式中 V_1 为激励电压; V_s 为 PZT 因结构变形而产生的电压; k 为激励频率; C_{PZT} 为 PZT 的电容量。可以看出,电桥调平衡后, A、B 两端的电压将不受激励电压的影响而只与传感信号有关系。

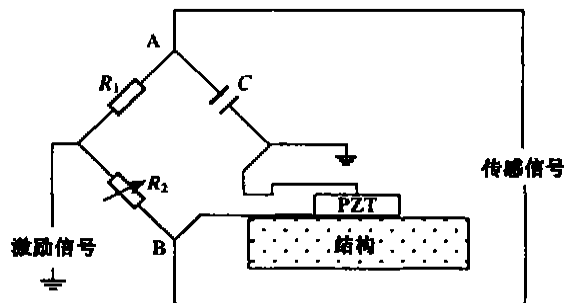


图 1 桥式自感知压电驱动系统

应用自感知压电执行器,可精确实现主动阻尼控制中同位配置的要求。另外,从结构集成的角度讲,自感知压电执行器可大幅度减少结构中的布线,这点对于复杂结构尤为重要。

为了分析压电执行器与其主体结构之间的相互作用力,已提出了多种力学模型。这些模型可分为三大类:第一类是比较简单的模型,比如 Baley^[5]等人提出的点力模型;第二类是基于应变场假设的更先进的模型,比如协调板模型^[6];第三类模型是考虑了横向剪力效应的更为复杂也更为精确的模型,如完全非线性模型^[7]。

传感执行器的数目及位置与结构控制系统的可观性、可控性、稳定性及控制的有效性有直接的关系。因此,传感执行器的优化配置是压电智能结构设计中的一个非常重要的环节。压电智能结构中传感执行器的优化配置问题的研究主要集中在优化准则和优化算法两个基本方面。目前,主要的优化准则有:基于控制系统可控性、可观性的准则^[8];基于系统能量的准则^[9];基于控制系统稳定性、可靠性的准则^[10]。除了这三个被广泛采用的性能准则外,还有一些其他有价值的准则,如最大模态力准则^[11]等。在优化算法方面,模拟退火技术和遗传基因算法等随机搜索技术特别引人注目,这两种算法可望成为大型空间结构控制元件优化配置计算最有前途的方法^[12]。

3 压电智能结构的动力学建模

建立压电智能结构动力学模型是对压电智能结

构进行控制的基础,主要目的在于建立结构力学特性与电学特性的一一对应关系,即传感元件的输出与结构状态的关系(传感方程),驱动元件的输入对结构的作用(驱动方程)。同时,整个结构的变形与运动也是需要研究的。

动力学建模通常是指用力学和数学理论对结构建立精确的数学模型,即理论建模方法。近年来,根据实验数据用系统辨识的实验方法来获得智能结构动力学模型的研究也已取得了很大的进展,如神经网络建模等。

3.1 理论建模

由于压电介质的压电效应力-电耦合具有各向异性,使得求解压电介质问题的解析解变得十分复杂。因此,在解决这类问题时多倾向于使用数值解法,即使用有限元法或边界元法等。

目前压电智能结构的有限元建模方法主要有两种。其一是静刚度法,主要用于智能桁架的理论建模中,由 Preumont A得到的智能桁架的有限元模型为^[13]:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F_e\} + [B]\{F_d\} \quad (2)$$

式中 $\{F_e\}$ 为结构等效节点外力; $\{F_d\}$ 为主动构件的等效节点驱动力。

另一种是基于压电材料的机电耦合本构关系,得用广义变分方程或 Hamilton 原理,推导而得的智能结构有限元方程^[14]:

$$\begin{bmatrix} [M] & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{x}\} \\ \{\ddot{h}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{x}\} \\ \{\dot{h}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{xx}] & [K_{xh}] \\ [K_{hx}] & [K_{hh}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x\} \\ \{h\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{G\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K_{xx}]$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $[K_{xh}]$ 和 $[K_{hx}]$ 为压电矩阵; $[K_{hh}]$ 为介电矩阵; $\{F\}$ 为外力; $\{G\}$ 为外加电荷矢量。

与常规弹性结构动力学方程相比,压电结构的动力学方程有两点不同:一是压电结构的动力学方程比常规弹性结构动力学方程多了有关电荷的项;二是压电结构动力学方程中有电势与位移的耦合项 $[K_{xh}]$ 和 $[K_{hx}]$ 。

边界元法是进行压电智能结构理论建模又一常用方法。用边界元法求解压电智能结构问题时,首先要求出边界积分方程的基本解。丁皓江等从压电介质的基本方程出发,得到了含体积力的基本方程组的一般解,给出了单位集中力和单位点电荷情况的压电介质平面问题的基本解^[15]。丁皓江等还应用位势理论和一种调和函数得到了空间问题中无限域的

压电介质在单位集中力和单位点电荷作用下的基本解^[16]。Hill L R 则用边界元法分析了带有球形空腔的无限域压电介质问题,并将其解与有限元解进行了比较,认为边界元是一种解决三维线性压电介质问题较精确的方法^[17]。

3.2 实验建模

在对压电智能结构进行理论建模时,进行了很多简化和假设,这些简化和假设在有些情况下可能大大地影响模型的精度。并且模型中各种参数的精确测量也是很大的问题。另外,理论建模在考虑这些参数变性时一般比较困难。这些因素都使得理论建模在工程应用中受到一定限制。实验方法不需要测量结构的各种参数,而是通过实验得到的输入输出数据用系统辨识的方法来建立动力学模型,并可通通过在线学习的办法来使所建立的模型适应结构本身参数和环境的变化。动态系统辨识常用的模型结构有神经网络模型、ARX 模型、ARM AX 模型和 DA 模型等。

路小波等对集成有压电执行器/传感器的柔性梁分别采用 ARX 模型、ARM AX 模型和 DA 模型进行了实验建模,得到了基本相同的辨识结果^[18]。

神经网络由于其非线性能力、自学习能力、自适应能力、并行处理能力以及高度的容错性和鲁棒性被广泛地用作系统辨识模型。压电智能结构的输入输出关系可用下式来描述:

$$y(k+1) = f(y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1); u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)) \quad (4)$$

式中 y 为结构传感输出; u 为结构输入。这种输入输出关系可以利用神经网络模型映射能力来表示。常用作系统辨识的神经网络模型有 BP 网络、径向基函数网络、递归网络等。

BP 神经网络常用来对压电智能结构进行建模,并具有较强的鲁棒性^[19]。动态递归网络具有前馈和反馈连接,能够克服前馈网络不具备动态特性的缺点。魏民祥等用动态递归神经网络对一压电智能悬臂梁进行了实验建模,建立了非线性状态空间方程,为结构控制作出了准备^[20]。

根据结构具体情况选择合适的神经网络模型及学习算法,以保证网络收敛和缩短学习时间,是选用神经网络对压电智能结构进行实验建模的关键。因此,针对压电智能结构的动态特性,研究神经网络模型结构和学习算法具有重要的意义。

4 压电智能结构的应用研究

集成压电传感器和执行器后,结构的自感知和

自控制成为了可能。各国学者在对压电智能结构进行基础性研究的同时,也对其应用进行了广泛的探索。黄文虎等在对航天柔性结构振动控制进行综述时就指出压电智能结构特别适合于大型航天柔性结构的振动控制^[21]。目前,压电智能结构应用研究主要集中在以下几个方面。

4.1 振动主动控制

振动控制是压电智能结构最重要的应用方向之一,这方面的研究开展得最早,研究成果也比较丰富^[2,6]。由于压电执行器产生的作用力一般较小,压电智能结构在振动控制中的应用研究主要集中于柔性结构的振动控制中。压电智能结构振动主动控制中,控制系统的设计通常有三种方法,即主动控制、被动控制及主被动混合控制。

压电被动控制是利用压电材料的正压电效应,通过在压电元件的电极之间并联适当的外部电路来耗散或吸收压电元件所感应到的那部分结构能量^[22]。按照消耗能量的方式,压电被动控制可分为压电粘弹性阻尼器与压电吸振器。前者的外部并联电路为电阻元件,而後者的外部电路为电阻与电感元件。受压电材料自身性能的限制,压电被动控制只适于结构的高频振动控制。被动控制系统结构简单、容易实现、成本低,但缺少控制上的灵活性,对突发性环境变化应变能力差。

与被动控制相比,主动控制以现代控制理论为主要工具,具有较大的灵活性,对环境的适应能力强,是当前振动工程中的一个研究热点。振动主动控制的关键在于控制律的设计,目前已有多种控制方法在智能结构振动主动控制中得到了成功的应用,如极点配置法^[23]、最优控制法^[24]等。近年来,模糊控制^[25]、神经网络控制^[26]等智能控制法的引入为压电智能结构振动主动控制的研究注入了新的活力。压电主动控制法具有修正设计方便、适于低频振动控制等特点,目前已在许多领域得到了应用。当然,这种方法也存在不足,例如当压电传感器与执行器非同位配置时,就可能出现控制失稳的现象。

被动控制与主动控制相结合形成混合控制策略是当前振动工程的一个新兴方向。机敏约束层阻尼控制是压电主被动混合控制中的一个代表。实现压电智能结构混合控制的一种方式是以可控的压电材料代替传统的不可控约束层,通过反馈控制主动调节压电约束层的轴向变形,既而影响被动阻尼层的剪切变形,并同时给机敏结构施加控制力,以抑制智能结构的振动响应^[27]。另外,还可以通过实时调整被动控制网络中电阻、电感的参数来实现压电智能

结构的主被动混合控制^[28]。

4.2 噪声主动控制

压电智能结构的另一个重要的应用方向是噪声主动控制。压电智能结构噪声主动控制主要用于潜艇、飞行器以及车辆等三维封闭空间内部噪声的控制。三维封闭空间内部噪声的主动控制主要有两种方式:一是以声消声,即通过扬声器发出幅值相同而相位相反的声音去抵消原噪声;二是通过控制三维空腔的壁板的振动来控制噪声。压电智能结构噪声主动控制主要是采用后一种方式,但与壁板振动主动控制不同之处在于,振动控制是控制板的模态,而噪声控制则主要是控制产生声强的部分。Clark 等人于 1992 年基于声发射基本理论,采用经典层合板理论,对利用压电执行器实现各向同性板梁声发射的主动控制问题作了许多理论和实验工作^[29]。

4.3 结构静变形控制

通过控制压电智能结构的变形可以调整结构的几何形状,维护结构准确的外形和位置,这在空间站及其他空间飞行器及柔性机械的控制中具有重要的应用价值。在空间飞行器中,可通过压电执行器来控制精确结构的变形,以保证空间天线反射器、望远镜等精密仪器正常工作。在机器人中,通过压电元件控制柔性机械臂的运动,可提高机械手的运动精度。使用压电智能结构的机械手如图 2 所示^[30]。

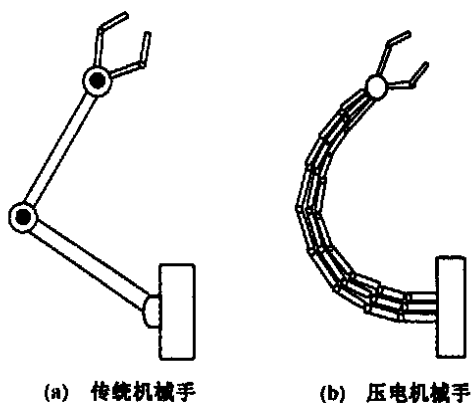


图 2 压电智能结构机械手

4.4 结构损伤监测

损伤探测的方法虽有很多,如工业 CT、 γ 射线等,但这些方法一般都只能在实验室里进行或定期进行,不能实现损伤的在线监测,而结构状态在线监测正是智能结构的任务之一。应用压电传感元件进行结构损伤监测主要有两种方式,其一是用压电传感器性来精确地感知结构力学性质的变化,并通过进一步地计算和分析,对结构的损伤进行预测。Mitsun 等将压电薄膜贴于刻有缺口的受静载或冲击作

用的试件表面,试验表明,与完整试件相比,压电传感器输出发生了变化,特别是在缺口附近区域电压值明显增大^[31]。另一种则是通过分析结构中传播的振动波来进行损伤预测。Shaw n等人将6片压电陶瓷贴于试件的两端分别作为激振器和传感器,通过分析振动波在试件中的传播,找出了损伤部位,并对损伤程度进行了估计^[32]。

5 结束语

压电智能结构以其独特的性能,有着广阔的应用前景,正在受着越来越多的重视,也取得了大量的研究成果。同时,我们也应看到目前的压电智能结构离工程实用还有相当的距离,工程实用化方面的研究还相当薄弱,具体表现在:理论及仿真研究较多,而实验验证则相对较少;研究对象以简单的板梁结构较多,对复杂结构的研究还相当欠缺;压电智能结构在工程中实际应用的报道还比较少见,真正做出压电智能结构硬件的研究还很少。因此,在进行理论研究的同时,还应加强实验研究和工程实用方面的探索,主要包括以下几方面:

(1) 加强对工程中应用最多的复杂结构的研究。

(2) 加强系统集成方面的研究。在压电智能结构的实验系统中,信号放大、滤波、功放、可控电源、AD/DA 计算机等仪器必不可少,而在实际工程结构中要附加上这么多的辅助设备几乎是不可能的。

(3) 开发性能更优越的压电介质。作为驱动器的压电陶瓷都比较脆,在工程中的应用受到了很大的限制。另外,目前的压电驱动器一般都要加上百伏的驱动电压,很难想象在一个实际结构中到处都有上百伏的高压。

(4) 进行压电智能结构的可靠性和稳定性研究。如何保证集成压电元件后的系统的可靠性和稳定性是压电智能结构工程实用化过程中必须解决的问题。

(5) 开发分析压电问题的通用工具软件,提高压电智能结构系统设计与分析效率也是非常重要的一个工作。

参考文献:

- [1] 黄尚廉.智能结构——工程学科萌生的一场革命[J].压电与声光,1993,15(1):13-15.
- [2] 李俊宝,张景绘,任勇生,等.振动工程中智能结构的研究进展[J].力学进展,1999,29(2):165-177.
- [3] ANDERSON E H, HAGOOD N W. Self-sensing piezo-

electric actuation: analysis and application to controlled structures[C]. Proc of the 33rd AIAA SDM Conference, 1992 2 141-2 155.

- [4] PARDO de Vera C, GUEMES J A. Embedded self-sensing piezoelectric for damage detection[J]. J of Intelligent Material Systems and Structures, 1998, 9(11): 876-882.
- [5] BAILEY T, HUBBARD J E. Distributed piezoelectric-polymer active vibration control of a cantilever beam [J]. J of Guidance, Control, and Dynamics, 1985, 8(5): 605-611.
- [6] CRAWLEY E F, LAZARUS K B. Induced strain actuation of isotropic and anisotropic plates[J]. AIAA Journal, 1991, 29(6): 944-951.
- [7] PAI P F, NAYEEI A H, OH K. A nonlinear theory of laminated piezoelectric plate[C]. AIAA Paper No. 92-2407, Proceedings of the 33rd SDM Conference, Dallas, TX, 1992 577-585.
- [8] ARBER A . Controllability measures and actuator placement in oscillatory systems[J]. International Journal of Control, 1981, 33(3): 565-574.
- [9] SCHULZ G, HEIMBOLD G. Dislocated actuator/sensor positioning and feedback design for flexible structures [J]. J of Guidance, Control, and Dynamics, 1983, 6(5): 361-366.
- [10] V ANDER Vede W E, CARIGN AN T C R. Number and placement of control system components considering possible failures[J]. J of Guidance, Control, and Dynamics, 1984, 7(6): 703-709.
- [11] 李 宾,李玉刚,殷学纲,等.智能结构压电执行器位置优化的模态力准则 [J].中国空间科学技术,2000(1): 1-5.
- [12] RAO S S, PAN T S. Modeling, control, and design of flexible structures: a survey [J]. Applied Mechanics Review, 1990, 43(5): 99-117.
- [13] PREUMONT A. Application of piezoelectric actuators to the active damping of a truss structure [C]. Proc of 31st AIAA SDM conference, AIAA Paper 90-0950, 1990 1 907-1913.
- [14] TZOU H S, TSENG C I. Distributed piezoelectric sensor/actuator design for dynamic measurement/control of distributed parameter system: a piezoelectric finite element approach [J]. J of Sound and Vibration, 1990, 138(1): 17-34.
- [15] 丁皓江,王国庆,梁 剑.压电介质平面问题的一般解和基本解 [J].力学学报,1996,28(4): 441-448.
- [16] DING H J, LIANG J, CHEN B. Fundamental solutions of transversely isotropic piezoelectric media [J]. Science in China(Series A), 1996, 39(7): 766-775.

(下转第 60 页)

- Research, 1988, 3(5): 1 043-1 049.
- [5] SCHERER George W. Drying Gels II . Film and flat plate [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1987, 89 217-238.
- [6] FRANCIS Lorraine Falter, PAYNE David A. Thin-layer dielectrics in the $\text{Pb}[(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{1-x}\text{Ti}_x]\text{O}_3$ system [J]. J Am Ceram Soc, 1991, 74(12): 3 000-3 010.
- [7] SUMI K, QIU H, KAMEI H, et al. Effect of the annealing temperature on structural and piezoelectric properties of the Sol-Gel $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.56}\text{Ti}_{0.44})_{0.90}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.10}\text{O}_3$ films [J]. Thin Solid Films, 1998, 315 77-85.
- [8] 曲喜新, 过璧君. 薄膜物理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.
- [9] JAN G Hyun M, CHO Mun K. Sol-Gel processing and pyroelectric properties of highly oriented $\text{Pb}[(\text{Mg}, \text{Zn})_{1/3}\text{Nb}_{2/3}]\text{O}_3$ thin films [J]. J Am Ceram Soc, 1996, 79(6): 1 435-1 440.
- [10] CHEN Chiahong, RYDER Daniel F. Synthesis and microstructure of highly oriented lead titanate thin films prepared by a Sol-Gel method [J]. J Am Ceram Soc, 1989, 72(80): 1 495-1 498.
- (上接第 46 页)
- [17] HILL L R, FARRIS T N. Three dimensional piezoelectric boundary element method[J]. AIAA Journal, 1998, 36(1): 102-108.
- [18] 路小波, 陶云刚, 周洁敏, 等. 柔性智能结构实验建模方法 [J]. 压电与声光, 2000, 22(1): 29-31.
- [19] YANG S M, LEE G S. System identification of smart structures using neural networks [J]. J of Intelligent Material System and Structures, 1997, 8(10): 883-890.
- [20] 魏民祥, 闫桂荣, 沈亚鹏. 基于动态神经网络非线性结构辨识的研究 [J]. 应用力学学报, 2000, 17(2): 110-113.
- [21] 黄文虎, 王心清, 张景绘, 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.
- [22] HAGOOD N W, VON Floate A. Damping of structural vibration with piezoelectric materials and passive electrical networks[J]. J Sound and Vibration, 1991, 146(2): 243-268.
- [23] 路小波, 陶云刚, 何延伟. 基于极点配置的柔性智能结构主动控制 [J]. 压电与声光, 1997, 19(4): 282-284.
- [24] RAY M C. Optimal control of laminated plate with piezoelectric sensor and actuator layers[J]. AIAA Journal, 1998, 36(12): 2 204-2 207.
- [25] 屈文忠, 邱 阳, 唐建中. 模糊控制理论在柔性结构振动主动控制中的应用 [J]. 机械科学与技术, 1998, 17(2): 194-199.
- [26] 路小波, 陶云刚, 周洁敏. 基于神经网络的柔性结构振动主动控制研究 [J]. 振动工程学报, 2000, 13(1): 107-111.
- [27] 唐永杰, 晏砺堂, 胡选利, 等. 结构振动控制中压电阻尼技术研究: (三) 机敏约束层阻尼技术 [J]. 压电与声光, 1996, 18(2): 92-95.
- [28] MORGAN Ronald A, WANG K W. An integrated active-parametric control approach for active-passive hybrid piezoelectric network with variable resistance[J]. J of Intelligent Material Systems and Structures, 1998, 9(7): 564-573.
- [29] CLARK R L, FULLER C R. Experiments on active control of structurally radiated sound using multiple piezoceramic actuators[J]. J Acoust Soc Am, 1992, 91(6): 3 313-3 320.
- [30] ISOBE Daigoro. Aparallel control system for continuous architecture using finite element method[J]. J of Intelligent Material Systems and Structures, 1998, 9(12): 1 038-1 045.
- [31] EGASHIRA Mitsuru, SHIN YA Norio. Local strain sensing using piezoelectric polymer[J]. J of Intelligent Material Systems and Structures, 1993, 4(7): 558-560.
- [32] BEARD Shawn, CHANG Fu-kuo. Active damage detection in filament wound composite tubes using built-in sensors and actutors [J]. Intelligent Material Systems and Structures, 1997, 8(10): 891-897.