

压电智能结构 振动控制系统研究

YADIAN ZHINENG JIEGOU

ZHENDONG KONGZHI XITONG YANJIU



黄全振 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

压电智能结构 振动控制系统研究

YADIAN ZHINENG JIEGOU

ZHENDONG KONGZHI XITONG YANJIU



黄金振 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

压电智能结构振动控制系统研究/黄全振著. —北京: 知识产权出版社, 2017. 4
ISBN 978 - 7 - 5130 - 4605 - 3

I. ①压… II. ①黄… III. ①智能结构—结构振动控制—控制系统—研究 IV. ①TP13
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 281070 号

责任编辑: 贺小霞
封面设计: 刘 伟

责任校对: 谷 洋
责任出版: 刘译文

压电智能结构振动控制系统研究

黄全振 著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司
社 址: 北京市海淀区西外太平庄 55 号
责编电话: 010 - 82000860 转 8129
发行电话: 010 - 82000860 转 8101/8102
印 刷: 北京科信印刷有限公司
开 本: 720mm × 1000mm 1/16
版 次: 2017 年 4 月第 1 版
字 数: 200 千字

网 址: <http://www.ipph.cn>
邮 编: 100081
责编邮箱: 2006HeXiaoXia@sina.com
发行传真: 010 - 82000893/82005070/82000270
经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店
印 张: 11
印 次: 2017 年 4 月第 1 次印刷
定 价: 48.00 元

ISBN 978-7-5130-4605-3

出版权专有 侵权必究
如有印装质量问题, 本社负责调换。

前 言

压电智能结构振动主动控制方法与技术涉及先进材料、控制理论、力学分析、数学建模、科学计算、实验技术等诸多领域，是多学科交叉的前沿课题，具有重要的科研学术意义和工程应用价值。作为压电智能结构主动减振研究的一个重要发展方向，自适应控制策略成为当前研究的热点，其中自适应滤波控制在理论方法和实验验证方面取得了较好的效果。但目前面向压电智能结构振动主动控制的自适应滤波控制方法依然存在很多不足，突出体现在控制器设计和算法过程的具体实施适应性上，同时算法缺乏比较完善的系统稳定性及控制效果分析方法，并在工程实现方面也存在较多的问题，需要进一步深入探索和研究。

本书以一种模拟临近空间飞行器压电智能框架结构为实验模型对象，着重进行自适应滤波振动控制方法及其实现算法研究，同时针对模型结构动力学分析方法与压电元件优化配置策略进行积极探索，并在此基础上构建整体实验平台和开发综合测控系统，以验证相关方法技术的可行性和有效性。全书可分为结构动力学分析与压电元件优化配置、自适应滤波振动控制方法与控制器设计、实验平台构建与实验验证分析三大部分。所做主要内容如下：

(1) 以压电智能框架结构为实验对象，将分布式压电元件作为传感器和驱动器粘贴于结构表面，构建了一种模拟临近空间飞行器压电智能框架实验模型结构，并与开发的自适应滤波振动控制系统结合，形成了一套压电智能结构自适应滤波振动主动控制实验系统。

(2) 采用行波分析法，对压电智能结构进行动力学分析，同时引入智能结构振动模态有限元分析技术，结合压电智能结构振动特性，分析了压电传感器/作动器的位置优化问题，并以框架组成单元梁为研究对象，给出优化目标函数，引入粒子群优化方法针对目标函数进行优化，实现分布式压电传感器/作动器元件的优化配置。



(3) 鉴于经典自适应滤波 - X LMS 算法过程中需要预知与外激励信号相关的参考信号, 导致该方法存在工程适用性和技术实用性缺陷。本书提出了一种基于滤波 - X 改进型的参考信号自提取振动控制算法, 着重考虑通过从振动结构中直接提取振动响应残差信号, 进而基于控制器结构和算法过程数据构造出参考信号, 满足与激励信号的相关性并进入算法控制过程; 仿真分析和实验验证表明: 所提出改进的控制算法控制效果良好, 不仅实现了参考信号的振动结构直接提取策略, 并具有较快的收敛速度和良好的控制效果。

(4) 在经典的自适应滤波 - X LMS 算法实施过程中, 存在控制通道模型参数辨识问题, 一般可采用离线辨识策略获得控制通道模型参数, 但也很大程度上导致该方法在工程实际应用时具有较大的不实现性。本书提出一种控制通道模型在线辨识的自适应滤波振动主动控制方法, 其基本思想是在控制输出端引入一个随机噪声信号, 采用 FIR 滤波器作为受控通道模型进行实时在线辨识, 同时控制环节采用滤波 - X 控制算法。经过仿真分析和实验验证表明, 本书所提的在线辨识控制器设计方法及其实现算法控制效果良好, 为进一步深入实用化研究奠定了基础。

(5) 由于滤波 - X 控制器的传输函数是一个全零点的结构, 其不考虑控制输出信号的反馈对参考信号的影响, 而在实际的系统中这种影响是不能忽略的。滤波 - U 结构的传输函数中含有零极点, 它可以在一定程度上解决振动反馈可能带来的控制系统的不稳定问题。本书以滤波 - U 为基础结构, 研究了参考信号自提和控制通道在线辨识问题, 分别提出了基于滤波 - U 的参考信号自提取振动控制方法和控制通道在线辨识的振动控制方法。经过仿真分析和实验验证表明, 所提控制方法及其实现算法控制效果良好。

(6) 在完成压电智能框架结构振动主动控制平台构建, 以及结构振动控制系统软件开发的基础上, 对本书所研究的自适应滤波振动控制方法及其实现算法进行了实验分析与验证工作。方法研究与实验验证表明, 多通道自适应滤波结构振动控制方法具有较强的自适应能力, 能够较快地跟踪受控结构系统参数及外扰响应的变化; 本书所提出的自适应滤波振动控制算法与经典滤波 - X、滤波 - U 算法相比, 虽然收敛速度略慢, 但控制效果良好, 尤其为提高自适应滤波控制方法的技术实用性和工程适用性, 提供了有益的技术方法思路。

在本书编写过程中, 高守玮副教授在控制算法的设计、实验平台的构建、实验系统的开发等方面给予很多指导和帮助, 在此表示衷心感谢。另外, 本书

还参考了一些国内外同行发表的研究成果，在此一并表示最诚挚的感谢。

随着社会的发展、科学技术的进步，本书中提出的一些理论和方法也会相应得到优化和改进。由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请各位专家、学者批评指正。

黄全振

2016年9月

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 课题研究的目的和意义	1
1.2 压电智能结构振动控制的研究概况	3
1.3 自适应滤波振动主动控制技术	11
1.4 本书的主要研究内容及章节分配	17
1.5 本章小结	18
第二章 压电智能结构动力学分析	19
2.1 引 言	19
2.2 压电智能结构的动力学建模概况	19
2.3 压电传感作动原理	20
2.4 压电智能梁的动力学	26
2.5 压电智能框架结构的动力学	31
2.6 本章小结	37
第三章 压电智能结构的传感器/作动器优化配置	38
3.1 引 言	38
3.2 压电元件优化配置的研究现状	38
3.3 传感器/作动器优化配置准则	40
3.4 基于粒子群的传感器/作动器优化算法	45
3.5 压电智能框架结构的构建	53
3.6 本章小结	57

第四章 自适应滤波器原理及其最小均方算法	58
4.1 引言	58
4.2 自适应滤波器的基本原理	60
4.3 最小均方算法	63
4.4 算法收敛条件讨论	65
4.5 本章小结	69
第五章 滤波-E LMS 自适应滤波控制算法	70
5.1 引言	70
5.2 滤波-E LMS (FELMS) 算法的提出	70
5.3 FELMS 算法流程分析	73
5.4 FELMS 算法稳定性分析	83
5.5 算法仿真分析	88
5.6 本章小结	90
第六章 有限脉冲响应自适应滤波控制策略	91
6.1 引言	91
6.2 自适应滤波-X LMS 振动控制算法	91
6.3 改进型滤波-X LMS 算法	93
6.4 算法仿真分析	100
6.5 本章小结	105
第七章 无限脉冲响应自适应滤波控制策略	106
7.1 引言	106
7.2 自适应滤波-U LMS 振动控制算法	106
7.3 改进型滤波-U LMS 算法	112
7.4 算法的性能分析	114
7.5 算法仿真分析	119
7.6 本章小结	127
第八章 实验平台构建与实验结果分析	128
8.1 引言	128

8.2 实验平台开发与构建	128
8.3 自适应滤波振动控制实验方法与步骤	131
8.4 自适应滤波-X 实验与结果分析	132
8.5 自适应滤波-U 实验与结果分析	138
8.6 本章小结	143
第九章 结论与展望	144
9.1 结 论	144
9.2 展 望	146
参考文献	148

第一章 绪 论

1.1 课题研究的目的和意义

20 世纪 80 年代末学术界提出了智能材料与结构的概念^[1,2]，它的诞生归功于人类对先进技术的不懈追求和众多学科高新技术的交叉与融合，其基本内涵是实现感知、驱动、信息处理、自主控制等机敏功能与结构本身紧密集成或融合，从而使结构本身具有自诊断、自适应、自学习、自修复、自增值、自衰减等智能化特征。智能材料与结构的出现为解决实际工程中普通材料无法实现的问题开辟了一条新途径，Rogers^[3]将这一概念的出现称为“新材料/结构时代的黎明”。90 年代初美国军方率先将智能材料结构列入军事科研计划项目，并投入大量的科研经费，随后俄罗斯、英国、日本、德国等国也在智能结构领域相继投入较大的人力和物力，对其理论和应用开展了广泛研究。

主动减振智能结构作为智能材料结构研究主要方向之一，着重针对结构振动状况进行自主感知与主动控制，通过将传感器、驱动器和控制器有机地与基体结构集成在一起，采用适当的控制方法和控制策略，使驱动器的控制输出产生准确的动作以改变结构的特性与状态，从而达到自适应实现结构振动控制的目的。当前在航空航天领域，基于智能材料结构内涵实现高性能飞行器的结构自主智能监测与控制，已构成最具优势的研究思路和研究热点，大量理论与实验研究成果充分表明该方法的先进性与可行性。例如，伴随着航天技术的发展，大型柔性结构在航天器上的构成与应用越来越多，由此带来的振动控制问题也愈加严重；常规的振动主动控制系统不仅控制器与结构完全分离，而且采用的是结构型传感器与电磁或液压式动作结构，普遍具有附加重量大、功耗较高、安装困难且为“点”式控制等缺点，对于重量、性能要求极其严格的空间系统，使结构振动主动控制方式难以实现甚至不可能实现，从而基于分布



式测控思想的智能结构振动主动控制方法成为研究的热点^[4-6]。

目前,用于智能结构中的智能材料很多,如形状记忆合金、光纤维材料、电磁流变材料、电磁伸缩材料和压电材料等,不同的智能材料与普通结构结合在一起形成了许多功能各异的智能结构。在诸多智能结构中,应用最广泛、研究最深入的是压电类智能结构^[7]。压电材料由于存在正逆压电效应,不仅能用作机敏传感材料,而且可作为智能致动或驱动元件,并具有低功耗、电操作、频带宽和力由自身内部产生的优异特性,被广泛探索研究于弹性结构的静态形状控制和空间结构的振动控制领域,如自适应光学系统、机器人位移定位器、结构损伤诊断、太阳能帆板和直升机机翼等。尤其是空间结构在轨环境下通常都具有阻尼小、质量轻、刚度低等共同特点,在外部干扰下极易产生变形和振动,过分的变形或振动将致使结构失稳从而降低整个系统的运行功能,缩短结构的使用寿命,严重时甚至会导致结构疲劳和不可预测的破坏,因此,为提高大型柔性空间结构的工作性能和精度,必须针对这类关键结构的振动响应进行有效的控制。

当前压电智能结构振动控制在控制策略和方法上,几乎已涉及现代控制理论的所有分支,并在此基础上发展了多种振动主动控制方法^[8-17],其中以 Sinha 为代表的独立模态控制^[8]、以 Elbuni 为代表的极点配置方法^[9]和以 Hanagud 为代表的最优控制方法^[10]都是基于受控结构精确模型的振动控制方法,因此在应用上具有很大的局限性。如对于空间结构和高速飞行器结构,由于干扰因素的复杂性和大变形非线性效应的存在,建立其精确的数学模型是不可能的,同时空间或飞行器结构的物理特性变化和载荷特性渐变,不仅对控制器提出了鲁棒性要求,而且自适应调整和在线学习问题也必须予以妥善解决。在此情况下,近年来开始探索采用鲁棒控制、自适应控制、智能控制和神经网络控制进行此类系统的控制器设计,并已在理论和实验方面取得了一些有意义的成果^[18-24]。但总体而言,这些方法仅获得了初步实现,发展并不成熟,应用也各有其局限性,还有待于进一步深入探索和研究。

鉴于压电主动减振智能结构研究内涵的丰富性和控制问题的复杂性,本课题着重面向压电智能结构振动响应自适应滤波控制方法及实验验证开展探索和研究,研究意义在于通过前沿科学领域的课题研究和科研引导,在学术上探索面向高性能飞行器的主动减振智能结构研究新方法,在技术上获取知识交叉集成的创新能力和开发经验,在应用拓展上为其他科研与工程技术领域提供关键技术基础;同时,本课题构建的实验平台在对所探索方法和技术进行分析与验

证的基础上进一步拓展和完善,还可为主动减振智能结构更深入的研究以及将来的工程实现提供研究基础。

1.2 压电智能结构振动控制的研究概况

1.2.1 智能结构概述

智能结构这一概念提出于 1985 年,是当前先进结构与结构监控方面正在迅速发展的一個崭新领域,由于对它的研究目前尚处初级阶段,众多学科的研究人员往往侧重不同的角度给出自己的表达方式,因此对它的定义也不尽相同,如常将它称为机敏结构、自适应结构或主动结构。当前对其概念较为全面的论述是:智能材料结构是将传感元件、驱动元件,以及包括检测电路、控制电路、信号处理单元、功率放大器等的整个控制系统紧密集成或融合在结构中,从而形成一个整体。由智能材料结构的定义可以看出,智能材料结构具有感知、辨识、寻优和控制 4 种基本功能。为实现这些功能,智能材料结构至少应包含传感元件(传感器)、执行元件(驱动器)和信息处理单元(控制器)等基本组成部分^[25,26]。

(1) 智能结构的传感元件

智能结构的传感元件犹如人类的“神经系统”,可以感受自身的各种信息,并按照一定规律将这些信息转换成有用输出信号,以满足信息的传输、处理、存储、记录、显示和控制等要求。早期的传感元件一般都是结构型的,它们利用机械结构的位移或变形来完成非电量到电量的转换。随着各种半导体材料和功能材料的发展,利用材料的压敏、光敏、热敏、气敏和磁敏等效应,可以把压力、光强、温度、气体成分和磁场强度等物理量变换为电量,由此研制成的传感元件称之为物性传感元件。目前此类传感元件大致有光导纤维传感元件、压电传感元件、电阻应变丝、半导体传感元件等。

压电传感元件主要有 PZT 压电陶瓷、压电复合材料和 PVDF 压电薄膜。压电陶瓷作为传感元件具有响应速度快、测量精度高和性能稳定的优良技术特征,但它的脆性较大,抗冲击能力差,密度大,与结构黏合后对结构的动态性能影响也比较大。PVDF 压电薄膜,柔韧性好,密度低,与基体结合对结构的性能影响小,但是它的使用温度范围低,一般不超过 40℃。压电复合材料保持了压电陶瓷的高压电性能,同时也兼顾了 PVDF 的柔韧性特点,是一种比较

理想的智能材料传感元件。

(2) 智能结构的执行元件

智能结构的执行元件是一种致动器件，其功能是执行信息处理单元发出的控制指令，并按照规定的方式对外界和内部状态或特性发生变化做出合理的反应，以保证结构在各种工作情况下性能最优。因此，执行元件的驱动元件应该和基体很好结合，具有高的结合强度，机械性能好，响应速度快，性能要稳定，驱动力要大且能够控制，同时理想的力学执行元件应能直接将电信号转换为母体材料中的应变或位移。目前智能结构中常用的驱动元件有：形状记忆合金、压电陶瓷、压电薄膜、电致伸缩材料、磁致伸缩材料。形状记忆合金是智能结构中最先应用的一种驱动材料，可以实现多种形式的驱动，易于和基体材料结合，变形量大。但是它激励时所需要的能量大，响应速度慢。压电陶瓷既可以作为传感元件也可以作为驱动元件，它响应速度快，驱动力适中，与基体结合较好，控制方便，但是模量大，与基体粘合对基体性能影响较大。压电薄膜常用材料为聚偏二氟乙烯，它与基体的结合好，响应速度快，缺陷是驱动能力小，适用温度范围小。电致伸缩材料和磁致伸缩材料与基体结合好，应变大，但是它响应频宽小，非线性度高，不易控制。表 1-2-1 给出了常用驱动材料的一些性能。

表 1-2-1 常用驱动材料性能比较

	压电陶瓷	形状记忆合金	压电薄膜	电致伸缩材料	磁致伸缩材料
常用材料	PZT-5H	NiTi 合金	PVDF	PMN	Terfenol D
最大应变	0.13%	2%~8%	0.07%	0.1%	0.2%
频带	100kHz	<10kHz	100kHz	100kHz	<5Hz
模量/GPa	60.6	90	2	64.5	29.7
密度/kg/m ³	7500	7100	1780	7800	9250
能密度/J/kg	6.83	4.13	0.28	6.42	中等
滞后	10%	高	>10%	<1%	2%
温度范围/℃	-20~200	—	0~40	高	低

(3) 智能材料的控制单元

智能结构的控制器就像“人类大脑”，对传感元件感知信号进行分析处理，然后发出指令控制执行元件进行动作，它主要由具有控制功能的硬件电路或电脑芯片与软件组成。结构之所以具有智能特征源于它的自主辨识和分布式控制功能，这意味着需要有一个与其相适应的完善控制策略和分布式的计算结

构。从控制策略上讲,智能结构的控制一般可分为3个层次:局部控制、全局算法控制和智能控制。局部控制的目标是增大阻尼和/或吸收能量并减小残留位移或应变;全局算法控制的目标是镇定结构、控制形状和抑制扰动。前两种控制问题是目前的技术水平可以实现的。智能控制则是未来应重点研究的领域,它通常应具备以下功能:系统辨识、故障诊断和自主隔离/修复或功能重构、精确定位和扰动主动控制、在线自适应学习等。从计算结构上讲,智能结构应主要包括数据总线、连接网络布置和分布式信息处理系统。总线结构的设计应适合大量数据的高速传输;连接网络的布置应适合大量传感元件、执行元件和分布式信息处理单元的互联,并应考虑将对结构完整性的损害降至最低限度;信息处理系统应具有分布式和中央处理方式相协调的特点,对于复杂的时变系统,还应考虑具有较强的鲁棒性和在线学习功能。

1.2.2 压电智能材料在结构振动研究中的应用

虽然早在1880年皮埃尔·居里(Pierre Curie)与其兄长雅克斯·居里(Jacques Curie)一起发现了压电效应,次年Gabriel Lippman根据热力学原理发现了逆压电效应^[27];但是由于压电效应中力电耦合特性相当复杂,很难应用到实际工程中,直到1954年Jaffe^[28]发现了锆钛酸铅(PZT),成为压电材料研究及其应用中的一项重大突破。至今为止,压电材料已成为弹性结构中最受欢迎的智能材料。压电智能材料在结构振动中的研究和应用受到众多研究机构和专家的青睐,成为当前智能结构领域主要研究方向之一。

在航空航天、车辆工程、土木工程等领域中,由于其中的结构或构件在服役或运行期间易遭受外界环境的干扰而发生不期望的振动,过分或长时间的反复振动会导致构件的损伤或疲劳破坏,所以将压电智能材料应用到结构振动主动控制中,已构成最具优势的研究思路和研究热点。如Bailey等率先将压电材料应用到航空航天振动控制领域^[29],随后Crawley和Tzou等也较早开始了这方面的研究^[30,31];S. E. Miller等^[32,33]把压电主动阻尼器成功地应用到各向异性矩形板的振动控制中;Chee C. Y. K等^[34]使用压电技术建立了谐振控制系统;Maillard J. P等^[35]提出通过直接对结构施加主动控制实现结构噪声辐射抑制的思想;Giurgiutiu V等^[36]将压电晶片传感器应用在航空航天领域;Suleman A等^[37]研究了压电作动器在飞机气动弹性振动控制中的可行性;Hansson J等^[38]把压电材料应用在火车体竖向弹性振动控制中;Sethi V等^[39]针对压电智能框架复合结构的多模态进行振动控制研究;Kozek M等^[40]采用粘贴在车体底



部的压电致动器实现火车运行过程中振动主动控制的目的;朱军强等^[41]将压电主动杆件应用到单层网壳结构振动主动控制过程中;赵大海等^[42]对安装有压电摩擦阻尼器的模型结构进行了地震模拟振动台试验研究;Gupta V 等^[43]理论分析推导了高温下的压电片本构方程,并通过实验验证了所提出的本构方程。陈震等^[44]将遗传算法和线性二次型最优控制相结合,研究了压电智能悬臂梁振动主动控制;Marinaki M 等^[45]分析比较了简单粒子群优化、带惯性权重的粒子群优化算法以及压缩因子粒子群优化算法等三种粒子群优化算法,并以 LQR 作为控制方法,比较了控制效果。Sahin M 等^[46]分析了压电片的传感作动机理,并采用鲁棒控制对受迫振动悬臂梁的一阶共振响应进行了振动控制实验研究;侯新科等^[47]采用预测函数模型对压电柔性悬臂梁结构进行振动控制研究;Thinh TI 等^[48]依据一阶剪切变形理论,使用有限元方法研究了粘贴压电片的静态变形控制以及振动主动控制;Bruant I 等^[49]使用遗传算法,以能控能观性为指标,并考虑剩余模态,优化了简支板压电传感器与作动器的方向与位置;Balamurugan V 等^[50]探索了使用有限元分析方法,结合 LQR 最优控制进行板壳的控制,并给出了几种压电片布置的实例。

1.2.3 压电智能结构振动控制研究现状

通常压电材料通过粘贴在结构表面或埋置于结构内部两种方式作为传感器和作动器与主结构一起构成智能结构,表面粘贴型的致动器极化方向一般沿其厚度方向,在电场作用下沿长度方向发生伸缩变形,从而对主结构产生拉伸致动的目的。而对于埋置型的致动器则沿其长度方向极化,在垂直极化方向电场作用下会发生剪切变形,从而实现为主结构的变形进行控制的目的。早期的压电智能结构振动控制主要集中在简单的智能梁结构,如 1981 年 Forward R. L. 首先将压电陶瓷应用在圆柱天线结构振动控制中^[51];Liao 等^[52]利用混合变分原理对压电柔性杆件的弹性振动控制进行研究;Ye R. 等^[53]对薄壳上下表面对称粘贴压电材料的系统进行了研究,提出了“智能壳”的概念;Chen 等^[54]以带有 SMA 层和受约束的粘弹性层的柔性梁为对象,进行了振动耗能实验;Trindade M. A. 等^[55]分别对压电片粘贴结构表面和植入结构内部方式进行了振动控制对比研究。板壳结构是工程中最长常见的结构形式,有关压电智能板振动控制的研究也一直很活跃,如 Heeg^[56]利用压电层板通过改变俯仰方向刚度和阻尼,研究二维二自由度翼段的颤振抑制问题,风洞实验证实其装置可以提高颤振临界频率 20%;Lin C. Y. 等^[57]人利用压电应变作动器实现了对一个后

掠角为 30° 的复合材料层板机翼模型的颤振抑制和阵风延缓; Lazarus K. B. 等^[58]人分别利用铝板和环氧树脂作为基体材料, 将压电片布满平直机翼模型上下表面, 研究其振动与颤振抑制效果; Richard^[59]通过优化机翼上的压电贴片传感/作动器对的尺寸和位置, 研究了三角翼的颤振控制; Saunders、Sadri 和 Harari 等^[60-69]分别对压电智能板的弯曲、扭转模态、压电片的植入方式及其位置优化进行了深入的研究, 并得了一定的成果。

我国的压电智能结构振动控制研究兴起于 90 年代中期, 近年来这一领域的研究非常活跃并获得了很大的进展, 如 1997 年进行的重大基金项目“复杂控制系统的几个关键问题”的子课题之一“柔性结构控制系统”, 由哈尔滨工业大学等几个单位合作, 在挠性结构建模、刚度悬殊和频率密集结构的建模和控制、智能结构的振动主动控制等方面进行了系统研究^[35,70,71]; 大连理工大学^[72]研究了压电智能桁架的一体化优化设计; 重庆大学^[73]开展了折叠式柔性结构振动主动控制的研究; 华南理工大学的邱志成教授针对梁、板和壳压电智能结构的振动控制国内外研究现状进行了详细阐述^[74]; 其他如上海交通大学、北京航空航天大学、西安交通大学、东南大学、南京航空航天大学、西北工业大学等研究单位, 在主动减振智能结构方面均取得了众多研究成果^[75-85]。近几年国家自然科学基金委针对压电智能结构方面的研究支持力度较大, 如清华大学李龙土教授主持的“新型压电微电机的驱动机理及优化设计技术的研究”、浙江大学魏燕定教授主持的“基于压电智能驱动器的扭振主动控制技术的研究”、南京航空航天大学陈勇教授主持的“用于飞行器翼面流场主动控制的智能结构基础”、合肥工业大学王建国教授主持的“层状压电结构分析的状态变量法”、武汉科技大学程耕国教授主持的“压电材料在柔性构造物智能控制中的应用研究”、哈尔滨工业大学孙立宁教授主持的“压电陶瓷微驱动器件极化模型与驱动方法的研究”、浙江师范大学阚君武教授主持的“压电液压振动控制器的基础理论与关键技术研究”、重庆大学李以农教授主持的“基于压电堆驱动的齿轮传动系统振动主动控制关键理论与方法研究”、哈尔滨工业大学陈照波教授主持的“高超声速飞行器敏感仪器设备的主动隔振技术及其非线性问题研究”等众多国家自然科学基金资助项目。

压电智能结构主动控制过程中主要关键性问题之一, 就是如何设计合理的控制方法与控制器, 在当前所采用的主要控制方法中, 模态控制、极点配置和最优控制方法都是基于受控结构精确模型的振动控制方法, 因此在实际工程应用领域具有很大的局限性^[86-90]。如对于航天器大型柔性结构, 由于结构振动



模态的复杂性和大变形非线性效应的存在,建立其精确的数学模型是不可能的,同时航天器结构的物理特性变化和载荷特性渐变,不仅对控制器提出了鲁棒性要求,而且自适应调整和在线学习问题也必须予以妥善解决^[91-93]。在此情况下,近年来开始探索采用自适应控制、鲁棒控制、模糊控制和神经网络等智能控制进行此类系统的控制器设计,并已在理论和实验方面取得了一些有意义的成果^[94,95],下面分别详细地阐述:

自适应控制振动控制主要用于受控对象及其参数存在较严重不确定性的振动系统,其控制的实质为:当外界环境和工作条件改变时,被控过程的反应有较大幅度变化,这时常规的反馈控制往往不能很好地满足对控制性能指标的要求,于是需要控制器本身具有对外界环境变化的能力,即当外界环境和工作条件改变时控制器本身的参数或结构也能自动做出相应的变化,以保证系统的性能指标都尽可能保持最优。自适应控制大致可划分为自适应前馈控制、自校正控制和模型参考自适应控制三大类^[96]。自适应前馈控制^[97]通常假定干扰源可测,如 Vasques 等^[98]分析了被动约束层阻尼控制与主动阻尼控制的控制效果、稳定性和鲁棒性,使用滤波 LMS 算法消除了激励梁的压电片的宽频电压波动;罗剑波等^[99]将三自由度二元机翼颤振模型进行改进后,运用到机翼的颤振主动抑制上,得到了良好的控制效果;Landau 等^[100]考虑自适应前馈补偿系统与机械反馈的耦合效应,在分析机理的基础上,给出了理论证明,并通过实验对比验证了所提算法。自校正控制^[101]是一种将受控结构参数在线辨识与受控器参数整定相结合的控制方式,如 Sun L. 等^[102]采用新型主动径向轴承,使用多变量自校正适应算法控制电机系统的受迫振动;Chen M. Y. 等^[103]设计了自校正控制磁浮导引系统。模型参考自适应控制^[104]是由自适应机构驱动受控结构,使受控结构的输出跟踪参考模型的输出,如 Ko J. 等^[105]采用模型参考自适应控制研究了机翼断面极限震荡环的主动抑制;Nestorovi 等^[106]给出了非线性直接模型参考自适应控制用于斗形压电结构振动控制的仿真;Khoshnood 等^[107]提出了八自由度运载火箭的模型参考自适应振动控制方法;Khoshnood 等^[108]研究了偏航与俯仰通道的对称特性,提出了一种带偏航通道辨识的新型模型参考控制。

鲁棒控制就是采用线性反馈律,使得闭环系统的稳定性或性能对于扰动具有一定的抵抗能力。 H_{∞} 控制^[109]是设计控制器在保证闭环系统各回路稳定的条件下使相对于噪声干扰的输出取极小的一种优化控制法。它将鲁棒性直接反映于控制性能指标上,设计出的控制律具有其他方法无可比拟的稳定鲁棒性,因