



非线性
动力学丛书

23

时滞反馈控制 及其实验

Delayed Feedback Control
and Experiments

蔡国平 陈龙祥 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

非线性动力学丛书 23

时滞反馈控制及其实验

Delayed Feedback Control and Experiments

蔡国平 陈龙祥 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以结构振动控制为对象,介绍时滞反馈控制的设计方法与实验,主要是作者近些年来在时滞问题上的研究成果。本书内容涉及时滞辨识、时滞控制律设计、时滞实验等,研究对象包括线性振动系统和非线性振动系统,时滞问题处理方法包括离散时间形式的处理方法和连续时间形式的处理方法,时滞技术包括时滞消除技术和时滞利用技术,控制方法涉及最优控制、变结构控制、鲁棒控制等。本书中包含有大量的时滞实验验证,这也是本书的特点之一。

本书可供从事结构振动主动控制和时滞问题研究的研究生、科研人员、工程技术人员阅读和使用,也可以为其他学科领域从事时滞问题研究的学者提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

时滞反馈控制及其实验/蔡国平,陈龙祥著. —北京:科学出版社,2017.3
(非线性动力学丛书:23)

ISBN 978-7-03-051752-4

I. ①时… II. ①蔡… ②陈… III. ①时滞系统-反馈控制-研究

IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017) 第 027071 号

责任编辑:刘信力/责任校对:钟 洋

责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京数图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张:16 1/4 插页:1

字数:310 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“非线性动力学丛书”序

真实的动力系统几乎都含有各种各样的非线性因素，诸如机械系统中的间隙、干摩擦，结构系统中的材料弹塑性、构件大变形，控制系统中的元器件饱和特性、变结构控制策略等。实践中，人们经常试图用线性模型来替代实际的非线性系统，以方便地获得其动力学行为的某种逼近。然而，被忽略的非线性因素常常会在分析和计算中引起无法接受的误差，使得线性逼近成为一场徒劳。特别对于系统的长时间历程动力学问题，有时即使略去很微弱的非线性因素，也会在分析和计算中出现本质性的错误。

因此，人们很早就开始关注非线性系统的动力学问题。早期研究可追溯到 1673 年 Huygens 对单摆大幅摆动非等时性的观察。从 19 世纪末起，Poincaré, Lyapunov, Birkhoff, Andronov, Arnold 和 Smale 等数学家和力学家相继对非线性动力系统的理论进行了奠基性研究，Duffing, van der Pol, Lorenz, Ueda 等物理学家和工程师则在实验和数值模拟中获得了许多启示性发现。他们的杰出贡献相辅相成，形成了分岔、混沌、分形的理论框架，使非线性动力学在 20 世纪 70 年代成为一门重要的前沿学科，并促进了非线性科学的形成和发展。

近 20 年来，非线性动力学在理论和应用两个方面均取得了很大进展。这促使越来越多的学者基于非线性动力学观点来思考问题，采用非线性动力学理论和方法，对工程科学、生命科学、社会科学等领域中的非线性系统建立数学模型，预测其长期的动力学行为，揭示内在的规律性，提出改善系统品质的控制策略。一系列成功的实践使人们认识到：许多过去无法解决的难题源于系统的非线性，而解决难题的关键在于对问题所呈现的分岔、混沌、分形、孤立子等复杂非线性动力学现象具有正确的认识和理解。

近年来，非线性动力学理论和方法正从低维向高维乃至无穷维发展。伴随着计算机代数、数值模拟和图形技术的进步，非线性动力学所处理的问题规模和难度不断提高，已逐步接近一些实际系统。在工程科学界，以往研究人员对于非线性问题绕道而行的现象正在发生变化。人们不仅力求深入分析非线性对系统动力学的影响，使系统和产品的动态设计、加工、运行与控制满足日益提高的运行速度和精度需求，而且开始探索利用分岔、混沌等非线性现象造福人类。

在这样的背景下，有必要组织在工程科学、生命科学、社会科学等领域中从事非线性动力学研究的学者撰写一套“非线性动力学丛书”，着重介绍近几年来非线

性动力学理论和方法在上述领域的一些研究进展,特别是我国学者的研究成果,为从事非线性动力学理论及应用研究的人员,包括硕士研究生和博士研究生等,提供最新的理论、方法及应用范例。在科学出版社的大力支持下,我们组织了这套“非线性动力学丛书”。

本套丛书在选题和内容上有别于郝柏林先生主编的“非线性科学丛书”(上海教育出版社出版),它更加侧重于对工程科学、生命科学、社会科学等领域中的非线性动力学问题进行建模、理论分析、计算和实验。与国外的同类丛书相比,它更具有整体的出版思想,每分册阐述一个主题,互不重复。丛书的选题主要来自我国学者在国家自然科学基金等资助下取得的研究成果,有些研究成果已被国内外学者广泛引用或应用于工程和社会实践,还有一些选题取自作者多年的教学成果。

希望作者、读者、丛书编委会和科学出版社共同努力,使这套丛书取得成功。

胡海岩

2001年8月

前 言

随着科学技术的发展,时滞系统动力学的研究得到了许多学者的大量关注,人们在时滞系统的动态特性和控制设计等方面开展了大量的研究工作,取得了许多研究成果。目前,时滞问题不仅在数学、力学、控制、机械、经济等学科领域有着大量的研究,而且在电力系统运行、网络信息传输、金融市场评估等领域获得了许多成功应用。

本书介绍结构主动控制中的时滞问题。结构主动控制为反馈控制系统,是利用系统的状态信息实时地进行控制反馈,以达到对结构进行主动调节和控制的目的。结构主动控制系统中不可避免地存在着时滞现象,传感器信号的采集和传输、控制器的计算和作动器的作动过程等,都会导致最后作用于结构的控制力产生时滞,使得作动器在系统不需要能量时向其输入能量,有可能引起控制效率的下降或导致控制系统失稳。另一方面,现有的研究结果显示,时滞也存在可利用的价值,人为地向控制系统中引入时滞量可以改善系统稳定性和抑制结构振动等。

本书内容是作者多年来从事时滞系统动力学研究的总结,章节安排是按照作者前后的研究顺序排列的。本书不但介绍了线性和非线性结构系统的时滞控制律的设计方法,还介绍了时滞辨识、参数鲁棒性和时滞正反馈控制技术等。为了保持科学研究的完整性,多年来作者在完成时滞问题理论研究的同时,还开展了大量的实验验证工作,这些时滞实验是本书值得参考和借鉴的亮点之一。目前国内关于时滞问题的研究大多是在理论上进行探索,实验研究相对很少。

感谢北京理工大学胡海岩教授主编的“非线性动力学丛书”和科学出版社对于本书的出版所给予的支持。感谢国家自然科学基金(项目编号:10772112,11272202,11002087,11472171,11132001)多年来的大力支持,使得本书所研究内容得以顺利进行。本书所有内容是陈龙祥博士、刘锟博士、赵童硕士和李施宏学士在学位论文创作期间完成的,他们在这期间进行了积极和卓有成效的科研探索,对于他们的贡献作者表示衷心的感谢。陈龙祥博士和刘锟博士的学位论文荣获上海市优秀博士学位论文称号,赵童硕士的学位论文荣获上海市优秀硕士学位论文称号。本书在撰写中还参考了国内外许多专家和学者的成果,在本书中皆已给出参考文献注释,在此一并对他们表示感谢。作者希望本书内容在对我国时滞动力学的研究有所裨益的同时,也衷心希望各位专家和学者能够提出宝贵意见,以使得我们今后可以做进一步的研究和探索。

由于作者水平有限，本书不当之处在所难免，敬请读者批评与指正。

作 者

2016 年 5 月于上海交通大学

目 录

“非线性动力学丛书”序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 结构振动主动控制	2
1.3 时滞问题及其研究现状	6
1.3.1 问题描述	6
1.3.2 稳定性问题	7
1.3.3 时滞消除技术	8
1.3.4 时滞利用技术	12
1.3.5 其他	13
1.4 本书的主要内容	14
参考文献	15
第 2 章 时滞辨识	24
2.1 前言	24
2.2 时滞辨识问题描述	24
2.3 基于粒子群优化算法的时滞参数辨识	26
2.4 数值仿真	28
2.5 本章小结	30
参考文献	30
第 3 章 时滞反馈控制的离散时间方法与实验	32
3.1 前言	32
3.2 动力学方程	32
3.3 动力学方程的离散化和标准化	33
3.3.1 时滞量是采样周期整数倍的情况	34
3.3.2 时滞量是采样周期非整数倍的情况	36
3.4 系统稳定性分析	37
3.4.1 无时滞稳定性分析	38
3.4.2 有时滞稳定性分析	39
3.5 控制律的设计	39

3.5.1 离散最优控制律	39
3.5.2 离散变结构控制律	44
3.6 矩阵参数的迭代计算	45
3.7 参数矩阵的收敛性	48
3.8 数值仿真和实验研究	49
3.8.1 柔性悬臂梁	49
3.8.2 柔性悬臂板	73
3.9 本章小结	85
参考文献	85
第 4 章 时滞反馈控制的连续时间方法与实验	87
4.1 前言	87
4.2 动力学方程	87
4.3 连续系统控制律设计	88
4.4 数值仿真与实验研究	90
4.4.1 实验平台与实验流程图	92
4.4.2 电机、差分电路与 DSP 模块	94
4.4.3 摩擦补偿	99
4.4.4 仿真与实验结果	100
4.5 本章小结	110
参考文献	110
第 5 章 时滞反馈的参数鲁棒控制设计与实验	112
5.1 前言	112
5.2 动力学方程	113
5.3 H_∞ 控制律设计	113
5.4 数值仿真与实验研究	115
5.4.1 无时滞控制	117
5.4.2 有时滞控制	119
5.4.3 控制律对固有频率变化的鲁棒性	122
5.4.4 控制律对时滞变化的鲁棒性	127
5.5 本章小结	130
参考文献	130
第 6 章 时滞反馈控制的鲁棒 H_∞ 控制设计与实验	131
6.1 前言	131
6.2 动力学方程	132
6.3 矩阵不等式定理证明和三种时滞控制情况	133

6.3.1	矩阵不等式定理	133
6.3.2	利用矩阵不等式定理求解控制律	138
6.3.3	已知控制律求解时滞稳定区间	139
6.3.4	已知时滞量上限求解 H_∞ 控制律	140
6.3.5	能够使得系统稳定的最大时滞量及 H_∞ 控制律	141
6.4	数值仿真与实验研究	141
6.4.1	柔性悬臂板数值仿真与实验	141
6.4.2	建筑结构数值仿真	150
6.5	本章小结	162
	参考文献	162
第 7 章	时滞正反馈控制设计与实验	164
7.1	前言	164
7.2	动力学方程	165
7.3	控制律设计	165
7.4	时滞量的选取	166
7.5	数值仿真与实验研究	167
7.5.1	柔性悬臂梁	167
7.5.2	柔性悬臂板	176
7.6	本章小结	185
	参考文献	185
第 8 章	双线性滞回特征结构的时滞反馈控制设计	187
8.1	前言	187
8.2	非线性动力学方程	187
8.2.1	双线性滞回模型	187
8.2.2	动力学方程	188
8.3	LQG 控制器设计	189
8.3.1	最优控制律设计	190
8.3.2	状态观测器	190
8.4	数值仿真	191
8.4.1	算例 1: 三层建筑结构	191
8.4.2	算例 2: 20 层建筑结构	200
8.5	本章小结	207
	参考文献	207
第 9 章	Bouc-Wen 滞回特征结构的时滞反馈控制设计与实验	209
9.1	前言	209

9.2 非线性动力学方程	210
9.2.1 Bouc-Wen 滞回模型	210
9.2.2 动力学方程	210
9.3 时滞控制律设计	212
9.4 数值仿真和实验研究	213
9.4.1 算例 1: 8 层建筑结构	213
9.4.2 算例 2: 柔性复合悬臂梁	224
9.4.3 算例 3: 柔性复合悬臂板	233
9.5 本章小结	241
参考文献	242
索引	245
“非线性动力学丛书”已出版书目	
彩图	

第 1 章 绪 论

1.1 研究目的和意义

随着科技的发展,现代工程结构朝大型化和复杂化方向发展,一方面是轻质和柔性构件在结构中的大量使用,另一方面对系统性能和定位精度的要求越来越高,由此形成当今所谓的柔性结构系统。柔性结构一般具有较小的模态阻尼,一旦受到某种外部激励,其振动将会持续较长时间,而长时间的振动不但会影响系统的正常工作和系统性能,而且有可能引起构件的疲劳破坏,影响其使用寿命。因此,对柔性结构振动控制的研究具有重要的理论意义和实际应用价值。

最早人们是采用被动控制方法对柔性结构的振动进行控制。被动控制方法无需外部能量输入,它是利用结构中的阻尼元件对振动能量进行耗散,以达到结构振动控制的目的。被动控制具有简单易行、安全可靠等优点,但是这种方法的控制效果制约于外部激励的特性,一般对高频振动有效,对低频振动控制效果不佳。随着现代控制理论的飞速发展和日臻成熟,振动主动控制呈现出日益强大的生命力。主动控制需要外部能量输入,它是利用系统的状态进行实时反馈,以达到对结构响应进行实时调节和控制的目的。由于主动控制方法具有控制效果不依赖于外部激励的特性,而且控制效果明显优于被动控制方法,因此柔性结构的振动主动控制近几十年来得到了众多学者的普遍关注,并且有大量研究成果问世。

然而主动控制系统中不可避免地存在着时滞现象。时滞有时是对象固有的,即系统本身存在时滞,如带式运输机中物料传输的延迟、卫星通信信号传递的延迟、原水多级泵送系统中水流传输的延迟等;有时是由外界无意识地引入系统的,如数字滤波器的使用等。以往人们为了控制设计上的方便总是忽略时滞,但是即使是小时滞,也会致使在系统不需要能量时作动器向系统输入能量,有可能引起控制效率的降低,甚至导致控制系统失稳。

目前数学界和控制界对时滞问题研究较多,研究的重点集中在时滞系统稳定性和最大稳定时滞量的确定问题上。在结构动力学研究领域,时滞问题的研究大体上可以分为两方面:时滞消除技术,时滞利用技术。最早人们认为时滞是“坏”因素,它会引起控制效率的下降或控制系统失稳,因此应设法在控制设计中消除它对控制系统所造成的负面影响,常采用的方法有泰勒技术展开法、移项技术、状态预估法等,这些都为时滞消除技术。近二十多年来人们在研究中发现,时滞也存在

潜在的利用价值,利用时滞进行控制设计有可能取得良好的系统性能和控制效果,如时滞阻尼器、时滞滤波器、混沌时滞控制、利用时滞改善系统稳定性等,这些都为时滞利用技术。虽然目前人们关于时滞问题已经进行了大量研究,取得了许多成果,但是仍有许多问题有待深入探讨。例如,目前关于时滞问题的研究大多是在理论上进行探讨,实验研究很少;以往对于主动反馈控制中时滞问题的研究,大多是针对线性时滞结构系统,而对于非线性时滞结构系统中的时滞问题的研究很少;以往的时滞反馈控制器设计大多是针对确定性结构系统,但是在实际工程中,数学建模和实际结构之间会存在误差,模型参数也有可能在一定范围内是变化的,当前关于不确定性结构系统的时滞反馈控制设计的研究较少;目前关于时滞问题的研究大多是在假定系统中的时滞量已知的前提下进行的,回避了系统中的时滞量到底是多少这个基本问题,即时滞辨识问题。时滞系统动力学是一门新兴的交叉学科,涉及数学、力学、结构工程、自动化等多个学科领域,它的发展也依赖于多个学科的有效综合,其理论体系的发展和完善无疑具有重要的理论意义和实际应用价值。

1.2 结构振动主动控制

结构振动控制方法大致可以分为三种:被动控制、主动控制、混合控制。被动控制又称为无源控制,它无需外部能量输入,而是通过在结构上附加各种耗能或储能材料,以耗散结构的振动能量,从而达到降低结构振动的目的。被动控制的控制力是控制装置随结构一起振动变形、因控制装置本身的运动而被动产生的。被动控制具有构造简单、便于实现和应用的特点,但是被动控制的控制效果有限,控制频带较窄,一旦被控结构或者外部激励发生改变,则已设计好的被动控制方法亦需要相应地作出调整。一般来讲,被动控制对高频振动较为有效,但是对低频振动控制效果较差。主动控制需要借助外部能源向被控系统中输入能量,从而达到对结构进行主动调节和镇定的目的。由于主动控制所具有的诸多优点,因此其成为近几十年来学者们广泛关注的研究问题。目前常用的结构振动主动控制方法有以下几种:

(1) **PPF 控制 (positive position feedback control)**: 正位反馈控制最初是由 Caughey 和 Goh^[1] 于 1985 年提出的,其基本思想是采用位置测量,将受控结构的位置坐标直接反馈给控制器,而将控制器的位置坐标正反馈给受控系统,以达到控制受控系统振动的目的。正位反馈控制算法非常适合作动器/传感器对位控制。陈岩^[2] 通过实验研究了压电陶瓷作动器作动下柔性悬臂梁的正位反馈控制。Song 等^[3] 以使用压电材料作为作动器和传感器的柔性梁为对象,对 PPF 控制设计方法的鲁棒性问题进行了理论和实验研究。

(2) **PID 控制^[4,5]**: PID 控制是最早发展起来的控制策略之一。在 PID 控制中,控制律是控制偏差量的比例 P、积分 I 和微分 D 的线性组合。由于 PID 控制的简

单、有效和实用,该控制方法在实际工程中得到了大量应用,其有效性得到了广泛验证。对于结构的主动控制,一般是仅采用 P、D 环节。Qiu 等^[6]对柔性悬臂板的主动控制进行了理论和实验研究,首先通过 H_2 范数的最大可控性和可观性准则对作动器和传感器进行位置优化,然后结合 PPF 方法和 PD 方法进行了控制律的设计。Ozen^[7]提出了一种控制柔性机械臂端点位置轨迹跟踪的控制策略,控制律在传统的 PD 控制器和非线性控制器之间遵循开关规则,且比传统的 PD 控制方法具有很大的优越性。

(3) **最优控制**:最优控制首先定义一个性能指标函数,然后针对控制系统计算最优控制律,使得性能指标函数达到最优。性能指标函数通常兼顾了响应和控制两方面的要求,通过调整各自的增益矩阵来达到平衡。最优控制是主动控制中发展最为成熟的控制理论,目前已经形成了系统的数学计算方法,非常适合在实际工程中应用。蔡国平等^[8-10]分别采用连续和离散最优控制方法研究了控制输入中存在时滞时的柔性结构的主动控制问题。Yu 等^[11]采用 Bouc-Wen 模型来描述磁流变阻尼器中的滞回特性,并采用 LQR 方法分别对建筑结构和海洋平台进行振动控制。Ma 等^[12]在最优控制律设计时考虑了随机波浪外激励,提出了一种前馈-反馈最优控制器,并将其应用到海洋平台的振动控制中。Lu 等^[13]采用平衡降阶法对模型进行降阶,同时考虑了控制系统中的时滞,采用离散最优控制方法对结构进行振动控制的研究。邵敏强^[14]通过随机游走模型将受到外扰的系统转换为不显含系统外扰的状态方程,采用 Kalman 滤波器估计系统响应状态,在使用 LQG 方法设计控制律时考虑了未知外部扰动,使得到的控制律中包含有未知外扰的估计值。Yang^[15]将非线性航天器动力模型简化成线性降阶的四元数模型,并采用 LQR 方法进行了控制律设计。

(4) **变结构控制**^[5]:变结构控制又称滑模控制,是一种不连续的反馈控制系统,其中滑动模态是该控制方法的显著特点。控制律根据到达条件进行设计,驱使系统的相点于有限时间内到达切换面上,然后向原点(或平衡位置)趋近。在切换面上,滑动模态具有强鲁棒性,对系统参数变化和外部扰动不敏感,并且滑动模态具有优良的稳定性质。但是变结构控制方法也有其缺点,即抖振。抖振源于系统相点在接近切换面时由于惯性而不断穿越切换面。对该问题常用的处理方法有:一是采用饱和函数来代替变结构控制律中的符号函数;二是从到达条件上进行设计,以减缓相点在接近切换面时的运动速度。目前变结构控制方法在机器人、电机工程领域得到了深入研究和应用,控制效果显著。Ingole 和 Bandyopadhyay^[16]Li 和 Kang^[17]、樊晓平^[18]、刘才山^[19]、李元春^[20]、蔡国平^[21]等学者对变结构滑模控制进行了深入的研究。

(5) **自适应控制**^[22]:自适应控制能通过测取过程状态的连续信息,自动调节控制器的参数以适应环境条件或过程参数的变化,使系统获得较强的鲁棒性,维持

控制系统所要求的性能准则。马扣根等^[23]基于惯性质量型作动器与自适应滤波技术,对柔性建筑结构风振控制进行了研究。Lin 和 Yeh^[24]结合关节子系统的自适应控制与柔性连杆操作器的可变量反馈进行了主动控制的研究,复合全柔性臂系统由关节子系统和柔性子系统构成,研究中首次使用了线性参数化法来设计自适应规则,以找出仅考虑关节子系统的柔性操作器的未知参数,这样就可以通过对未知参数的估算,用导出的稳定非线性自适应控制来完成关节角轨道的跟踪。张治国和李俊峰^[25]对卫星编队飞行中的控制问题进行了研究,考虑如何控制追踪星在失效的目标卫星附近飞行以追踪目标卫星特定面的问题,基于线性反馈和 Lyapunov 稳定性理论设计了控制策略,考虑目标卫星转动惯量的不确定性,通过自适应控制的方法获得正确的转动惯量比率。

(6) **鲁棒控制**: 1981 年, Zames 首次用明确的数学语言描述了基于经典设计理论的优化设计问题,提出用传递函数阵的 H_∞ 范数来记述优化指标; 1984 年加拿大学者 Francis 和 Zames 用古典的函数插值理论,提出了这种设计 H_∞ 问题的最初解法; 而英国学者 Glover 则将 H_∞ 设计问题归纳为函数逼近问题,并用 Hankel 算子理论给出了这个问题的解析解; Glover 的解法又被 Doyle 在状态空间上进行了整理并系统地归纳为 H_∞ 控制问题; 至此, H_∞ 控制理论体系初步形成^[26]。汤红吉^[27]对连续和离散的时滞非线性系统分别进行了鲁棒控制律的设计,并使得闭环系统渐近稳定。Zribi 等^[28]基于 Lyapunov 理论分别设计了非线性和鲁棒反馈控制器,对受到随机波浪力的海洋平台进行振动控制,两种控制器均能使被控系统渐近稳定。Han 等^[29]考虑了输入中的时滞,针对持续荷载作用下的海洋平台设计了 H_∞ 控制器。张文首等^[30]利用平衡降阶法对地震荷载作用下的海洋平台动力学模型进行降阶,然后用降阶模型设计 H_∞ 控制器和 H_∞ 观测器,并将其应用到海洋平台地震响应的 ATMD 控制中。Tan 等^[31]针对离散时间动力系统,考虑了前馈环节和控制输入中的时滞,设计了离散形式的前馈-反馈 H_∞ 控制器。Huo 等^[32]考虑了建筑结构质量和刚度的不确定性,采用主动质量阻尼器 (AMD) 对地震荷载作用下的不确定性结构进行振动控制,并设计了 H_∞ 控制器,对不确定性建筑结构的主动振动控制进行了振动台实验。Taflanidis^[33]考虑了随机系统中的不确定性,针对一系列随机系统设计了鲁棒 H_∞ 控制器,并分别采用双线性和 Bouc-Wen 滞回模型对结构中的滞回现象进行描述。赵童等^[34]考虑了柔性悬臂板中控制输入的时滞,对悬臂板进行 H_∞ 控制器的设计,并采用压电材料作为传感器和作动器,对柔性悬臂板进行了振动控制的实验研究。邱志成等^[35]考虑了模型参数的不确定性和外部扰动,采用压电作动器对太阳能帆板类悬臂外伸结构设计了 H_∞ 控制器。Kumar^[36]在柔性梁上粘贴约束层阻尼和压电材料,并考虑了边界条件的不确定性,设计了鲁棒 H_∞ 控制器,并将其控制效果和传统控制方法进行了比较。

(7) **智能控制**: 智能控制是基于知识的专家系统、模糊控制、神经网络控制

及信息论等的控制方法,主要应用于参数不确定性和结构不确定性等复杂的系统及具有较大时间常数和较大纯滞后的线性系统与确定性系统。智能控制研究的主要目标不是被控对象,而是控制器本身,研究的工具不是纯数学解析方法,而是定性和定量相结合、数学解析与直接推理相结合的工程方法。智能控制是一种语言控制器,可反映人在进行控制活动时的思维特点,其主要特点之一是控制系统设计并不需要通常意义上的被控对象的数学模型,而是需要操作者或专家的经验知识、操作数据等。在利用人工神经网络控制方法对结构进行主动控制方面,郭军慧^[37]研究了大跨空间网格结构风致振动的改进神经网络控制方法,建立了一种可预测有效控制力的神经网络预测控制策略。Yesildirek等^[38]将奇异摄动法和神经网络相结合,设计了一个柔性机械臂的跟踪控制器。Yesildirek等^[39]和孙富春等^[40]提出了一种动力学部分已知的柔性连杆机器人的多速率神经网络自适应混合控制器,基于奇异摄动法和两时标分解将系统分为快、慢子系统,并且分别设计控制律,利用神经网络的优点在一定程度上避免了机器人实时性较差的缺陷。Takahashi和Yamada^[41]指出了神经网络控制方法用于柔性机构主动控制的有效性。Talebi和Khorasani^[42,43]利用神经网络控制技术对柔性机械臂进行控制,提出了四种不同的神经网络控制方案。罗晓平和黄海^[44]将仿人智能控制应用于带压电作动器的空间桁架结构的振动主动控制,针对其稳定性差的缺点,提出了包括模糊控制策略在内的三种改进方法。Lee和Vukovich^[45]利用模糊控制方法对没有进行数学建模的柔性机械臂进行控制,提出了模糊逻辑控制器的设计方法。李志军和邓子辰^[46]以建筑结构为研究对象,采用一种含有模糊趋近律的离散变结构控制方法对地震作用下建筑结构的振动控制问题进行了研究。

随着材料科学、控制理论和计算机技术的发展,智能材料以其独特的物理耦合效应受到了国内外学者的普遍关注。智能材料具有传感功能和作动功能,它是通过粘贴和填满等方式与构件结为一体,因此非常适合于柔性结构的振动控制。目前常采用的智能材料包括^[47,48]:电/磁流变液,超磁致伸缩材料以及压电材料等。压电材料是指电介质材料在机械变形作用下发生极化而在材料两端表面间出现电位差,或者是在电场作用下产生形变的一类材料。Huang和Hung^[49]在简支金属薄板两侧分别粘贴一片压电片,其中一片作为传感器,另一片作为作动器,建立了复合板的动力学方程,并对传感器和作动器的控制系数进行了参数分析。冯志宏和霍睿^[50]采用加速度反馈控制方法,并考虑了控制输入中的时滞,建立了压电耦合柔性悬臂梁的动力学方程,并讨论了系统的稳定性问题。Bailey和Ubbard^[51]采用分布参数控制理论和压电材料作动器对柔性悬臂梁进行振动控制,并对设计的两种控制器进行分析比较。Qiu等^[52]采用压电材料作为作动器、采用加速度信号作为控制反馈信号,对柔性悬臂梁进行了振动控制研究,并且进行了实验验证。陈龙祥和蔡国平等^[53,54]采用压电材料作为作动器并考虑了控制输入中存在的时滞,采

用离散最优控制和变结构控制等多种控制方法对柔性悬臂梁的振动控制进行了理论与实验研究。潘继等^[55]采用压电材料作为作动器对柔性板的主动控制进行了研究, 研究中考虑了作动器在柔性板上的优化位置。Panda 和 Ray^[56]采用主动约束层阻尼对功能梯度复合板进行振动控制, 结果表明, 主动约束层阻尼能够有效地抑制复合板的非线性强迫振动响应。Mao 和 Fu^[57]根据高阶剪切变形板理论和压电弹性理论得到了压电功能梯度板的几何非线性和本构关系, 然后根据 Hamilton 变分原理得到了系统的非线性动力学方程, 振动控制中的反馈信号采用负速度反馈, 并通过仿真算例分析了各参数对控制效果的影响。随着科学技术特别是航空航天技术的飞速发展, 以智能材料为传感器与作动器而构成的具有自感知及控制能力的智能结构必将具有更广阔的应用前景。

1.3 时滞问题及其研究现状

时滞系统动力学的研究晚于对结构主动控制的研究, 而且研究成果数量也相对很少。近十几年来, 人们逐渐认识到时滞问题的重要性, 研究成果数量呈现上升趋势。胡海岩和徐鉴分别在文献 [58]~[60] 中对时滞动力学的研究进展进行了综述, 胡海岩和王在华 2002 年出版了时滞动力学专著 *Dynamics of Controlled Mechanical Systems with Delayed Feedback*^[61], 对时滞动力学的发展做出了突出贡献。本节参考文献 [58]~[63], 对时滞问题及其研究现状进行简要综述。

1.3.1 问题描述

与用映射和微分方程所描述的动力系统相比, 时滞动力系统的运动不仅依赖于当前的系统状态, 而且与过去一段时间的系统状态有关。对于 n 维线性单时滞反馈控制系统, 所采用微分方程可描述如下:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Hu(t - \tau) \quad (1-1)$$

其中, τ 为滞后时间, $x(t)$ 为系统位移列阵, M 、 C 和 K 分别为系统质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, $u(t)$ 为所施加控制力, H 为与所施加控制力的位置有关的矩阵。

将方程 (1-1) 转到状态空间, 并且进行主动控制设计, 有

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t - \tau) \\ u(t) = -LX(t) \end{cases} \quad (1-2)$$

其中, $X(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}H \end{bmatrix}$, L 为