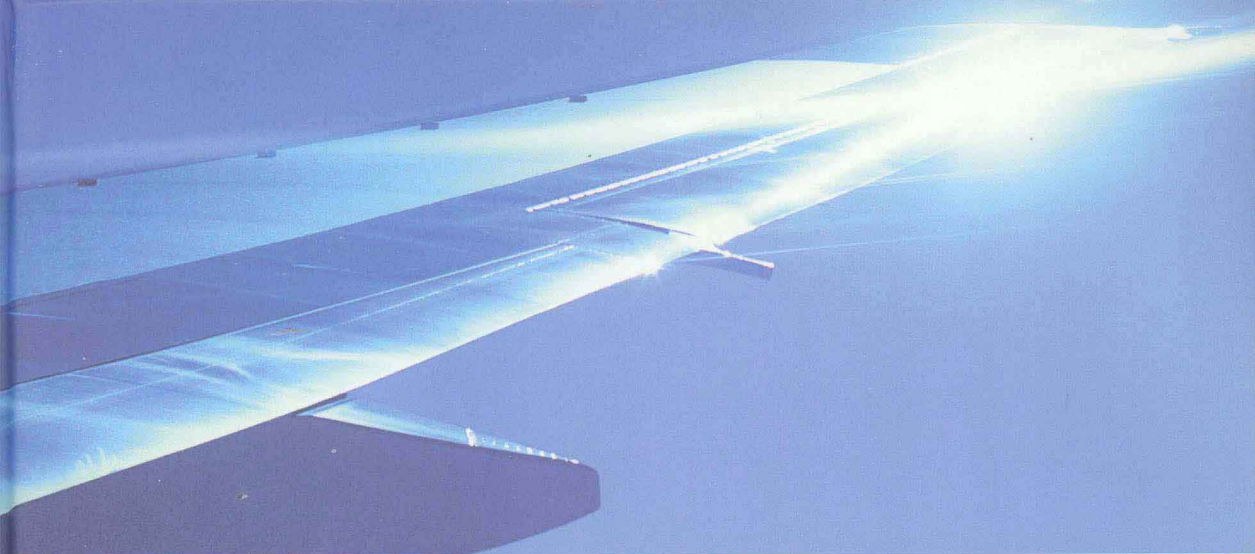




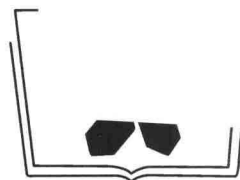
# 智能结构动力学与控制

毛剑琴 李琳 张臻 李超 马艳华 著

1



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

# 智能结构动力学与控制

毛剑琴 李 琳 张 臻 著  
李 超 马艳华

科 学 出 版 社

## 内 容 简 介

本书论述了智能结构的动力学分析、建模、控制及其设计。书中论述的内容处于自动控制、结构力学等学科的前沿交叉领域,除了参考当前国内外已有的论著外,还融入了作者多年的教学和研究成果。书中着重于计算机仿真与实验相结合以及理论分析与应用实例相结合。

与当前国内外已有相关论著相比,本书是一部机械力学和自动控制学科深度交叉、系统反映最新成果的参考书,可供对智能结构动力学分析、建模、控制、设计及其应用,迟滞非线性控制系统建模与控制、机电系统动力学分析和设计感兴趣的高校学生、教师、科研人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

智能结构动力学与控制/毛剑琴等著. —北京:科学出版社,2013  
ISBN 978-7-03-036900-0

I. ①智… II. ①毛… III. ①智能结构-动力学 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 041533 号

责任编辑:刘宝莉 张艳芬 / 责任校对:钟 洋  
责任印制:张 倩 / 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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张:26 1/4

字数:514 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序

材料的智能化是材料科学发展的趋势。智能材料系统和结构是处于材料、信息和力学等学科前沿交叉领域的研究热点,它除了具有普通材料结构的承载功能外,还具有传感、分析、诊断、执行等综合功能,是一种具有“生命”功能的结构。正因为如此,世界各国的国防、工业部门对智能材料结构非常重视并投巨资开展该领域的研究。经过近 10 年的发展,智能材料和结构在航空航天等国防及民用工业领域的应用得到很大发展,已从基础性研究逐步发展到原理性样机及实用化阶段。

“智能”是人和动物所具备的一种能进行分析、判断和动作的高级智慧能力。20 世纪 80 年代末期,科学家将“智能”概念与材料及结构相结合,提出智能材料结构的概念。智能材料结构和系统通常包括传感器、作动器、控制系统和母体材料等部分,由传感器对外界环境变化进行监测,并将此信息实时地反馈到控制系统中,经过分析、判断并发出动作指令给作动器,对环境变化做出及时响应。智能材料结构涉及材料、电子、光学、力学、信息等多学科的综合性研究领域,它的发展也将带动这些相关学科的发展。相信在不久的将来,智能材料结构将在我们的生活中发挥更大的作用。

1999 年,由北京航空航天大学材料学院、自动化学院和动力学院的 20 多名教授和研究生组成了一支交叉学科的研究团队。该团队 10 多年来承担了多项国家自然科学基金重点项目、国防基础研究项目,在他们的努力下取得了一系列创新成果,特别是在超磁致伸缩智能结构方面成果丰硕。

该书既总结了该团队 10 余年的研究成果,也反映了该领域其他方面的最新成就,充分体现了学科交叉和融合,既有理论深度且展望了应用前景,相信该书是智能材料体系和结构科技工作者的一部有重要价值的参考书,也可作为高等院校有关专业研究生的重要参考书。该书的问世将推动我国智能材料的研究和发展。



2011 年 6 月

## 前 言

智能材料是对外界或内部刺激(如应力、应变、热、光、电、磁、化学和辐射等)具有感知和响应功能的材料。含有智能材料的结构称为智能材料结构或智能结构。该结构是一种可感知外界刺激,并以一种可控的方式作出响应的结构,是一个在结构中集成了传感器、作动器和控制器的系统。

智能结构是 20 多年来,特别是 20 世纪 90 年代以来兴起的一个崭新的研究方向,处于先进控制、新材料及结构动力学等学科的交叉领域。若从仿生的角度来理解和比喻一个智能结构中三个学科的关系,则智能材料及其作动器可比喻为机体的肌肉;自动控制则可比喻为机体的大脑和神经系统;结构动力学则可比喻为机体的关节与骨骼。可见,这三个学科缺一不可。本书重点论述智能结构的动力学及其控制,有关智能材料的内容请读者参阅相关的文献。

在多种智能结构中,本书重点论述基于智能材料作动器的空间柔性并联智能机构和模块化智能结构。书中讨论的智能结构虽多为基于超磁致伸缩材料和压电陶瓷材料的智能结构,但所论述的智能结构动力学与控制的理论与方法同样也适用于其他智能材料结构。特别值得指出的是,书中所论述的有关迟滞非线性系统的建模与控制的理论和方法不仅适用于智能结构,同时也适用于存在迟滞非线性系统。

随着航空航天和制造业等的发展,对瞄准、定位和隔振致稳等的要求越来越高,而高精度瞄准、定位以及超静度隔振致稳等要求往往可归结为对微位移和微振动控制的高要求。例如,空间飞行器发射中的隔振致稳、直升机旋翼的减振、各类工程问题中空间微米级的瞄准和定位、计算机芯片制造中环境的隔振致稳和磁盘的微米级控制等,都普遍存在对象的多维微位移与微振动的高精度操作与控制问题。由于微位移和微振动的控制在国防和国民经济的现代化中具有重要意义,而智能结构在高精度微位移和微振动控制中又具有传统方法所不能代替的优势,故其受到国内外有关领域学者的关注。我国也已将智能材料和智能结构的研究列入国家科技重点研究发展方向之一。

从学科发展的角度看,在结构力学领域,传统的结构动力学分析和设计的理论与方法已不完全适用于机电一体的智能结构动力学分析和设计,智能结构耦合动力学理论、分析和设计成为该领域的前沿研究方向之一。在控制领域,智能结构所涉及的迟滞非线性系统的建模与控制是极具挑战性的问题,目前尚无成熟的、系统的理论和方法,也属于该领域的研究热点之一。故智能结构动力学与控制不仅处

于学科的交叉领域,同时也处于各相关学科领域研究的前沿。

本书便是在这样的需求牵引和学科发展的必然趋势下应运而生的。

本书除了用一些篇幅介绍近年来国内外在智能结构动力学与控制方面的最新研究动态和成果外,主要的篇幅涵盖了作者近十年来在国家自然科学基金和国防基础研究基金等资助下取得的较系统的研究成果,其中多数已发表在国内外重要期刊上,部分已通过鉴定,有些成果曾获多项国家和部级奖。虽然近年来包括本课题组在内的一批国内学者已在本领域做出了重要贡献,使我国在智能结构动力学与控制方面取得了跨越式进展,但比起该领域的国际整体水平,我们还有诸多不足和差距,特别是在理论的系统研究和应用的广泛深入方面,还有大量挑战性问题有待研究。希望通过本书的出版达到与同行学者交流,促进交叉学科发展,对智能结构动力学与控制的科研与教学起到积极推动作用的目的。

与已出版的有关著作相比,本书的主要特点是:

(1) 在内容上,主要论述了采用智能材料的结构设计、动力学分析和建模与控制,为处于机电一体结构动力学与自动控制的交叉研究内容。至于智能材料的性能与研制等内容,仅对与本书有关的压电和磁致伸缩作动器原理作介绍时有所涉及。更多的详情,由于篇幅有限未能尽述,有兴趣者请参阅国内外已出版的相关著作,或从本书的参考文献中找到有关信息。

(2) 在论述有关智能结构的建模与控制时,本书不仅阐述了迟滞非线性系统的建模与控制的经典理论与方法,而且也阐述了近十年来学界所关注的率相关与应力相关的动态迟滞非线性系统的建模与控制的理论与方法。这部分内容在已出版的著作中实为鲜见。

(3) 本书注重理论与实验的结合,注重实时控制算法和 DSP 控制器的研制,为验证理论方法的可行性,有关的实验设计和实验设备的设计和研制凝聚了作者十多年来创新的科研成果。这方面的大部分内容在已出版的著作中未见论述。

十多年来,北京航空航天大学已形成一支控制、材料、结构三学科交叉的研究团队,并曾在学校领导的支持下,作为交叉学科的研究平台,成立了智能结构动力学与控制研究中心。在本书出版之际,我们向曾经合作过的几位教授徐惠彬、蒋成保、张虎,以及从本课题组出站的博士后张天丽;毕业和在读的博士生和硕士生卜庆忠、宋召青、丁海山、郭振凯、张文广、高艳蕾、杨勇、郭雪莲、王贞艳、郭咏新、柳萍、王宝峰、权渭峰、马颖劲、刘会田、张媛媛、刘花果、徐康、雷玮、陈文丽、曹亚君、金桩、王蕊,致以诚挚的感谢,他(她)们为书中的很多内容曾付出了辛勤的劳动。特别值得一提的是,虽然本书未展开讨论材料和作动器的研制,但是书中实验与应用实例中所用的磁致伸缩作动器大多是由北京航空航天大学材料学院研制的,在此亦向他们致谢。

本书内容所涵盖的研究工作先后得到资助的项目是:国家自然科学基金重点

项目“大载荷对象的微位移与微振动的高精度智能控制研究”，国家自然科学基金重大研究计划“空天飞行器的若干重大基础问题”中的子课题“基于磁致伸缩材料的微位移与微振动智能化主动控制研究”，教育部博士点基金“率相关迟滞非线性系统建模、控制及应用原理性研究”和国防科工委基础研究项目，在此特向所有资助单位表示衷心感谢。

全书共 11 章，第 0 章为绪论。第 1、2 章分别论述智能结构动力学和智能结构迟滞非线性系统的理论基础；第 3、4 章分别论述智能结构中的压电作动器和超磁致伸缩作动器的耦合动力学原理和特性；第 5 章论述智能结构中的柔性元件包括柔性铰和位移放大机构的设计原理与方法；第 6 章论述几类基于超磁致伸缩作动器的智能结构动力学分析、设计；第 7 章论述智能结构迟滞非线性系统的建模理论与方法；第 8 章论述智能结构跟踪控制的原理、方法及实时控制系统的设计；第 9 章论述智能结构主动振动控制原理、方法及实时控制系统设计；第 10 章论述智能结构控制的几种应用。

本书的撰写分工如下：第 0 章、第 8 章和第 9 章由毛剑琴撰写；第 1 章、第 4 章和第 5 章由李琳撰写；第 2 章和第 7 章由张臻撰写；第 3 章由李琳和李超共同撰写，第 6 章由李超撰写；第 10 章由马艳华撰写。第 1 章及第 3~6 章经李琳审定；第 2 章及第 7~10 章经毛剑琴审定。全书由毛剑琴定稿。

回顾历史，人们通常将某种材料、机械结构和控制技术当作一个历史阶段的象征，如青铜器、汽轮机等都起过划时代的作用，也许我们可以预料智能材料、结构与控制技术将成为后人评述当代的标志之一。当然，这方面的研究远未达到鼎盛时期，本书也仅为该领域的沧海一粟。

书中难免存在不足之处，望读者指正。

# 目 录

序

前言

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 0 章 绪论                     | 1  |
| 参考文献                         | 12 |
| 第 1 章 智能结构动力学基础              | 15 |
| 1.1 结构动力学基本理论                | 15 |
| 1.1.1 哈密顿原理                  | 15 |
| 1.1.2 拉格朗日运动方程——广义坐标系下的哈密顿原理 | 21 |
| 1.1.3 多自由度线性系统振动的固有频率及振型     | 25 |
| 1.2 结构动力学问题的分析与计算方法          | 30 |
| 1.2.1 弹性结构动力学问题分析的有限元方法      | 30 |
| 1.2.2 模态分析法求解动力学方程           | 33 |
| 1.3 阻尼模型                     | 35 |
| 1.3.1 黏滞阻尼及等效黏滞阻尼            | 35 |
| 1.3.2 结构阻尼                   | 36 |
| 1.3.3 结构分析中的阻尼模型             | 37 |
| 参考文献                         | 39 |
| 第 2 章 智能结构控制理论基础             | 40 |
| 2.1 智能结构的迟滞非线性特性             | 40 |
| 2.1.1 迟滞非线性系统特性              | 40 |
| 2.1.2 智能结构迟滞非线性              | 42 |
| 2.2 迟滞非线性系统建模基础              | 43 |
| 2.2.1 迟滞非线性系统基于物理建模基础        | 44 |
| 2.2.2 迟滞非线性系统基于算子建模基础        | 47 |
| 2.2.3 迟滞非线性系统基于计算智能建模基础      | 53 |
| 2.3 迟滞非线性系统控制基础              | 60 |
| 2.3.1 迟滞非线性系统逆补偿原理           | 61 |
| 2.3.2 迟滞非线性系统复合控制原理          | 63 |
| 2.3.3 迟滞非线性系统反馈控制原理          | 64 |
| 参考文献                         | 65 |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| <b>第3章 智能结构中的压电作动器及机-电耦合动力学原理</b> .....   | 67  |
| 3.1 压电材料概述 .....                          | 67  |
| 3.1.1 压电效应及其应用 .....                      | 67  |
| 3.1.2 压电材料的线弹性本构关系 .....                  | 69  |
| 3.1.3 压电材料的重要参数 .....                     | 71  |
| 3.2 机电耦合系统动力学原理 .....                     | 74  |
| 3.2.1 电路系统的能量泛函 .....                     | 74  |
| 3.2.2 机电耦合系统的能量泛函及哈密顿变分原理的数学表达式 .....     | 78  |
| 3.2.3 机电耦合系统的动力学方程 .....                  | 79  |
| 3.3 压电叠堆作动器及其机电耦合动力学 .....                | 80  |
| 3.3.1 压电叠堆作动器概述 .....                     | 80  |
| 3.3.2 压电叠堆作动器耦合动力学特性 .....                | 82  |
| 参考文献 .....                                | 86  |
| <b>第4章 智能结构中的磁致伸缩作动器及电-磁-力耦合动力学</b> ..... | 87  |
| 4.1 超磁致伸缩材料概述 .....                       | 87  |
| 4.2 超磁致伸缩材料的非线性本构关系 .....                 | 89  |
| 4.2.1 磁化本构关系 .....                        | 91  |
| 4.2.2 磁致伸缩本构关系 .....                      | 92  |
| 4.2.3 应力-应变本构关系 .....                     | 93  |
| 4.3 磁致伸缩作动器的基本原理及输出特性 .....               | 96  |
| 4.3.1 磁致伸缩作动器的基本原理 .....                  | 96  |
| 4.3.2 磁致伸缩作动器的输出特性 .....                  | 97  |
| 4.4 磁致伸缩作动器电-磁-力耦合动力学 .....               | 103 |
| 4.4.1 磁致伸缩作动器的电-磁-力耦合动力学方程 .....          | 103 |
| 4.4.2 磁致伸缩作动器动态位移输出(迟滞响应)的理论解 .....       | 106 |
| 4.5 磁致伸缩作动器的共振频率 .....                    | 109 |
| 4.5.1 无电流输入(作动器不工作)时的共振频率 .....           | 110 |
| 4.5.2 有电流输入(作动器工作)时的共振频率 .....            | 114 |
| 4.5.3 小结 .....                            | 118 |
| 参考文献 .....                                | 119 |
| <b>第5章 智能结构中的柔性元件</b> .....               | 121 |
| 5.1 高精度转动连接结构 .....                       | 122 |
| 5.1.1 高精度转动连接的结构形式及原理 .....               | 122 |
| 5.1.2 复合型万向柔性铰的设计原理及方法 .....              | 124 |
| 5.2 空间对称圆锥曲线切口式柔性转动连接 .....               | 126 |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 5.2.1 空间对称圆锥曲线切口式柔性铰的转动刚度 .....           | 126        |
| 5.2.2 空间对称圆锥曲线切口柔性铰的万向特性 .....            | 134        |
| 5.2.3 空间对称圆锥曲线切口柔性铰的轴向刚度、强度与精度 .....      | 135        |
| 5.2.4 空间对称圆锥曲线切口式柔性铰的设计方法 .....           | 140        |
| 5.2.5 空间对称圆锥曲线切口式柔性铰的设计实例 .....           | 140        |
| 5.3 柔性微位移放大机构 .....                       | 144        |
| 5.3.1 柔性微位移放大机构原理 .....                   | 144        |
| 5.3.2 几种典型的微位移放大机构 .....                  | 145        |
| 5.3.3 柔性微位移放大机构的设计要点及其在工程中的应用 .....       | 150        |
| 参考文献 .....                                | 152        |
| <b>第6章 几类基于超磁致伸缩材料的智能结构动力学分析与设计</b> ..... | <b>154</b> |
| 6.1 智能光轴稳定系统 .....                        | 154        |
| 6.2 智能高精度 Stewart 定位平台 .....              | 158        |
| 6.2.1 智能高精度 Stewart 定位平台的原理与设计 .....      | 158        |
| 6.2.2 智能高精度 Stewart 定位平台的动力学分析 .....      | 161        |
| 6.2.3 智能高精度 Stewart 定位平台的实验分析 .....       | 165        |
| 6.3 大载荷高精度智能隔振平台 .....                    | 165        |
| 6.3.1 大载荷高精度智能隔振平台的原理与设计 .....            | 166        |
| 6.3.2 大载荷高精度智能隔振平台的动力学分析 .....            | 172        |
| 6.3.3 大载荷高精度智能隔振平台的实验分析 .....             | 176        |
| 6.4 大载荷模块式智能隔振平台 .....                    | 180        |
| 6.4.1 大载荷模块式智能隔振平台的原理与设计 .....            | 180        |
| 6.4.2 大载荷模块式智能隔振平台的动力学分析 .....            | 182        |
| 6.4.3 大载荷模块式智能隔振平台的实验分析 .....             | 189        |
| 参考文献 .....                                | 190        |
| <b>第7章 智能结构迟滞非线性系统建模</b> .....            | <b>192</b> |
| 7.1 迟滞系统物理建模理论 .....                      | 192        |
| 7.1.1 Jiles-Atherton 模型 .....             | 192        |
| 7.1.2 归一化模型 .....                         | 199        |
| 7.2 迟滞系统唯象建模理论 .....                      | 201        |
| 7.2.1 Preisach 模型 .....                   | 202        |
| 7.2.2 改进的 PI 模型 .....                     | 206        |
| 7.2.3 Bouc-Wen 迟滞非线性建模 .....              | 211        |
| 7.3 迟滞系统智能建模方法 .....                      | 214        |
| 7.3.1 模糊树建模方法 .....                       | 214        |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 7.3.2 支持向量机建模方法 .....           | 219 |
| 7.3.3 神经网络建模方法 .....            | 221 |
| 7.4 率相关与应力相关迟滞非线性系统建模 .....     | 225 |
| 7.4.1 率相关 Preisach 算子建模 .....   | 225 |
| 7.4.2 应力相关 PI 迟滞模型 .....        | 229 |
| 7.4.3 率相关支持向量机建模 .....          | 232 |
| 参考文献 .....                      | 240 |
| <b>第 8 章 智能结构跟踪控制</b> .....     | 242 |
| 8.1 智能结构前馈控制 .....              | 242 |
| 8.1.1 智能结构前馈控制原理 .....          | 242 |
| 8.1.2 基于 Preisach 模型的前馈控制 ..... | 244 |
| 8.1.3 基于 PI 模型的逆补偿控制器 .....     | 247 |
| 8.1.4 基于模糊树模型的前馈控制 .....        | 248 |
| 8.1.5 基于支持向量机模型的前馈控制 .....      | 251 |
| 8.2 智能结构复合控制 .....              | 254 |
| 8.2.1 前馈+PID 控制 .....           | 254 |
| 8.2.2 具有自适应逆补偿的模型参考控制 .....     | 256 |
| 8.2.3 内模控制 .....                | 259 |
| 8.2.4 鲁棒控制 .....                | 263 |
| 8.3 智能结构反馈控制 .....              | 269 |
| 8.3.1 鲁棒自适应控制 .....             | 269 |
| 8.3.2 反步控制 .....                | 279 |
| 8.3.3 滑模变结构控制 .....             | 284 |
| 8.4 智能结构实时跟踪控制系统设计 .....        | 292 |
| 8.4.1 智能结构实时跟踪控制系统的组成 .....     | 293 |
| 8.4.2 DSP 控制卡硬件设计 .....         | 296 |
| 8.4.3 DSP 控制卡逻辑控制时序设计 .....     | 299 |
| 8.4.4 DSP 控制卡技术参数 .....         | 301 |
| 参考文献 .....                      | 301 |
| <b>第 9 章 智能结构振动主动控制</b> .....   | 303 |
| 9.1 智能结构前馈振动主动控制 .....          | 303 |
| 9.1.1 改进的自适应滤波算法 .....          | 303 |
| 9.1.2 简化超稳定自适应回归滤波算法 .....      | 322 |
| 9.1.3 滑动自适应滤波算法 .....           | 331 |
| 9.2 智能结构积分力反馈振动主动控制 .....       | 346 |

---

|                                               |            |
|-----------------------------------------------|------------|
| 9.2.1 sky-hook 阻尼 .....                       | 346        |
| 9.2.2 积分力反馈振动主动控制 .....                       | 348        |
| 9.2.3 单自由度力反馈振动主动控制实验 .....                   | 349        |
| 9.3 智能结构实时振动主动控制系统设计 .....                    | 351        |
| 9.3.1 智能结构实时振动主动控制系统的组成 .....                 | 351        |
| 9.3.2 DSP 控制卡的设计 .....                        | 352        |
| 9.3.3 智能结构控制系统的外围执行电路设计 .....                 | 362        |
| 参考文献 .....                                    | 371        |
| <b>第 10 章 智能结构控制的几种应用 .....</b>               | <b>372</b> |
| 10.1 智能光轴稳定系统的高精度控制 .....                     | 372        |
| 10.1.1 智能光轴稳定系统控制原理 .....                     | 372        |
| 10.1.2 智能光轴稳定系统基于 PMAC 卡的控制器设计 .....          | 373        |
| 10.1.3 智能光轴稳定系统控制实验 .....                     | 373        |
| 10.2 大载荷、高精度智能模块化隔振平台控制 .....                 | 375        |
| 10.2.1 模块化隔振单元主动振动控制系统的组成 .....               | 377        |
| 10.2.2 模块化隔振单元实时振动主动控制实验 .....                | 379        |
| 10.2.3 模块拼装式整体隔振平台主动振动控制仿真 .....              | 386        |
| 10.3 超磁致伸缩 Stewart 平台高精度振动主动控制 .....          | 393        |
| 10.3.1 超磁致伸缩 Stewart 平台集成化振动主动控制系统组成 .....    | 394        |
| 10.3.2 超磁致伸缩 Stewart 平台基于 DSP 控制卡的控制器设计 ..... | 395        |
| 10.3.3 超磁致伸缩 Stewart 平台实时振动主动控制实验 .....       | 396        |
| 10.4 压电 Stewart 平台高精度振动主动控制 .....             | 401        |
| 10.4.1 压电 Stewart 平台振动主动控制系统原理 .....          | 401        |
| 10.4.2 压电 Stewart 平台积分力反馈振动主动控制器设计 .....      | 403        |
| 10.4.3 压电 Stewart 平台实时振动主动控制实验 .....          | 404        |
| 参考文献 .....                                    | 406        |

## 第 0 章 绪 论

### 1. 智能结构与学科交叉

控制论的奠基人维纳在 20 世纪 40 年代末曾说：“如果我说，第一次工业革命是革‘阴暗的魔鬼的磨房’的命，是人手由于和机器竞争而贬值……；那么现代的工业革命就在于人脑的贬值，至少人脑所起的较简单的、较具有常规性质的判断作用将被贬值。”钱学森曾引用这一句话来说明控制论和自动化在人类生产力发展中的重要性<sup>[1]</sup>。

然而，人类并未满足于实现“人脑所起的较简单的、较具有常规性质的判断作用”。自从计算机问世以来，人工智能虽然经历了几起几落的发展历程，但科学家们仍未言弃，真可谓“上下求索”。例如，家喻户晓的国际象棋大师卡斯帕罗夫与超级计算机深蓝的对决，以及美国有 46 年历史的电视知识竞赛冠军 Jeopardy 与超级计算机沃森的竞赛都表明人脑和电脑谁更聪明、更机敏的角逐从未停止过。这便是 20 世纪以来自动控制领域中“智能化”兴起的背景。

顾名思义，“智能”是指人和动物具有的一种能获取外部或内部信息，对所获得的信息进行分析、判断后做出有目的的动作的高级能力。“智能化”中一个重要的方面是研究如何使计算机具有人类的逻辑推理、分析判断、语言，甚至情感等能力，即人工智能，它属于计算机科学中的一个重要研究领域。“智能化”的另一个方面是研究如何使某个结构具有获取信息，并对信息进行分析判断后做出适当的响应等能力，这就是具有“仿生”功能的“智能结构”。这是一个处于材料科学、控制科学和机械科学交叉领域前沿的重要研究方向，本书的内容即属于这一领域。

关于智能材料，在一些书中已有详细的论述<sup>[2,3]</sup>。我国《大百科全书》中有关智能材料有这样的阐述<sup>[4]</sup>：“智能材料就是指具有感知环境（包括内环境和外环境）刺激，对之进行分析、处理、判断，并采取一定的措施进行适度响应的智能特征的材料。”

含有智能材料的结构称为智能结构，它与一般结构的主要区别在于：①在构成方面，除了一般的结构材料外，还含有“智能材料”，故智能结构也称为智能材料结构；②在功能方面，除了承载等一般的机械功能外，还具有获取结构外部或内部信息并对该信息进行分析、判断后做出适当响应的能力。事实上，这一功能是由智能结构中的控制系统实现的，而智能材料则起到了控制系统中传感器或作动器的作用。

在美国出版的《大百科全书》中有这样的诠释:“An intelligent or smart structure is generally considered an integrated system of structure, sensors, actuators, and a control module. Currently, there is a great deal of interest in applying smart structure technology to various physical systems. Active vibration, noise, aero-elastic stability, damping, shape control, health monitoring, process monitoring, and damage and delamination detection are a few examples.”译成中文为:“一般认为,一个智能结构是集结构、传感器、作动器和控制模块为一体的系统。当前大量的兴趣在于在各种物理系统中应用智能结构技术,如主动振动、噪声、气弹性稳定性、阻尼、形状控制、健康监测、过程监测和损伤与分层的探测等。”

以上的这些定义和概念,将作为本书的基础。

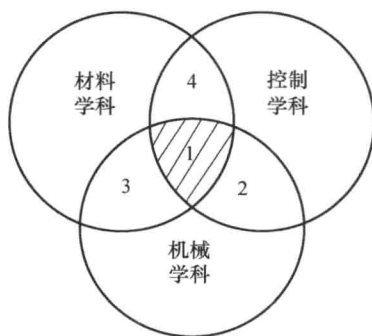


图 0.1 学科交叉示意图

区域 1, 2, 3, 4 代表智能结构的研究领域;

区域 2+1 代表机电学研究领域

20 世纪 80 年代以来,智能材料和智能结构的研究一直方兴未艾,形成了一个材料、控制和机械等学科交叉的相关研究领域。图 0.1 为材料、控制和机械三学科的交叉示意图。

由于篇幅所限,本书主要论述采用智能材料的结构的设计、动力学分析和建模与控制,即本书的内容主要为图 0.1 中的区域 2 和区域 1 中的部分。换言之,主要涉及机电一体结构动力学与自动控制的交叉领域。至于智能材料的性能与研制等内容,仅对论述与本书有关的压电和磁致伸缩作动器的原理时有所涉及,更多的详情未能尽述。

近 30 年来,在微位移和微振动的控制等领域开辟了一条传统方法所不及的全新的技术途径。例如,对于低频(100Hz 以下)的微振动,传统的抑振方法已力所不及,而此类振动又往往是飞行器飞行时经常遇到的,借助智能结构的主动振动控制技术便是解决这一问题的有效途径。诸如此类,使得智能结构的应用范围不断扩大,据国内外已发表的资料所述,有的智能结构已用于超精密定位、激光微加工、原子力显微镜、飞机机翼的精密调节以及结构的主动振动控制,从而为在航空航天、能源、交通、医疗、建筑以及国防等领域的微位移与微振动主动控制问题的解决提供了一条可供选择的途径。

值得指出的是,智能材料和智能结构已被列入我国中长期科学发展规划中的重点研究领域之一,体现了我国发展国民经济的强烈需求。

众所周知,工程中常用的智能材料有压电陶瓷、超磁致伸缩材料、电致伸缩材料、形状记忆合金、磁(电)流变体材料、电活化聚合体等,它们都表现出电、磁、热、力场中的耦合特性,并利用这些特性设计出作动器或传感器<sup>[2,3,5]</sup>。

需要说明的是,本书中的智能结构除少数采用压电陶瓷外,大多数采用超磁致伸缩材料。

由于大多数智能材料在输入/输出关系上存在复杂的迟滞非线性,故在智能结构的控制中,控制对象的迟滞非线性是一个不可避免的问题,而已有的迟滞非线性系统建模与控制的经典理论与方法已不足以解决智能结构中的率相关、应力相关等动态迟滞非线性系统建模与控制问题。本书介绍了作者十几年来解决这一问题的探索和若干成果。

从机械学科的角度看,智能结构是一种包含结构、机构和系统动能的广义结构,故智能结构的动力学基础也必然是结构动力学、机构动力学和系统动力学三者的深度交叉与耦合。

## 2. 智能结构中迟滞非线性系统的建模与控制

### 1) 迟滞非线性概述

(1) 历史的回顾与展望。迟滞一词起源于希腊,语源意味着“迟来的(lag behind)”,由苏格兰物理学家 Alfred Ewing 于 1881 年在铁磁学的研究中提出<sup>[2]</sup>。之后,人们发现铁磁学中的现象仅为迟滞非线性的一个特例。事实上,迟滞非线性普遍存在于科学技术的许多学科中,如物理、机械、生物、土木工程等。有关的一般性内容在本书的第 2 章中有些介绍。然而,重点则是讨论智能结构中的迟滞非线性。

半个多世纪以来,很多学者在迟滞非线性的研究领域做出了卓越的贡献,使其成为非线性动力学中一个独立的分支,也成为控制理论及应用的研究热点和难点之一。

(2) 回忆发展的历史。首先提到的是苏联学者 Krasnosel'skii。他于 20 世纪 70 年代在莫斯科自动控制和机械研究所工作期间,在研究多种实际的自动控制系统问题中发现迟滞非线性是一个重要的常见现象,对其产生了浓厚的兴趣,于是他和他的同事、学生们组织了研讨班,来研究这一问题。其中有一位学生 Pokrovskii 后成为他的同事。1983 年 Krasnosel'skii 和 Pokrovskii 的专著 *Sistemy s Rgisterisom* 问世<sup>[6]</sup>,由 Publisher NAUKA 出版,1989 年由 Niezgodka 译成英文<sup>[7]</sup>。该书被公认为迟滞非线性研究领域的经典著作,为迟滞非线性系统的研究奠定了重要的基础,标志着这方面的研究进入了新的阶段。几乎在研讨班成立的同时,有一位青年学生首次听说了迟滞非线性和 Preisach 模型,在与 Krasnosel'skii 和 Pokrovskii 简短的讨论后,对此产生了浓厚兴趣。后来这位年轻人来到美国,得到了美国能源部的支持,在非局部记忆迟滞非线性的数学模型,特别是 Preisach 算子方法方面发表了一系列杰出的论文和著作,他就是 Mayergozy。他 1991 年由 Springer-Verlag 出版的著作 *Mathematical Models of Hysteresis*<sup>[8]</sup> 和 2006 年主

编的 *The Science of Hysteresis* 中对迟滞非线性的数学建模,特别是 Preisach 算子方法做出了重要的贡献,因而文献[8]也被公认为是 Preisach 算子方法研究的经典著作之一。在讲到迟滞非线性研究中的算子方法时,学者们公认德国教授 Preisach 于 1935 年用德文发表在 *Zeitschrift für Physik* 杂志上的论文<sup>[9]</sup>是经典的,该论文最早提出的算子被命名为 Preisach 算子。同样经典的还有德国教授 Prandtl 在 1928 年用德文发表的论文<sup>[10]</sup>。他在论文中提出的算子被命名为 Prandtl 算子,后也被称为 PI 算子。

Brokate 教授在迟滞非线性系统的算子方法,特别是 PI 算子方面做出了卓越的贡献。Visintin<sup>[11]</sup>和 Krejčí<sup>[12]</sup>等学者在具有迟滞非线性的波动方程和热传导方程的研究中也做出了重要贡献,从而完善了迟滞非线性的数学研究。值得一提的是,2000 年左右,爱尔兰的一些数学家将 Preisach 算子的基本计算方法编成程序在互联网上公布,引起了更多研究者的兴趣。近年来,我国也有越来越多的关于迟滞非线性研究的论文与著作发表<sup>[13,14]</sup>。虽然近 50 年来,在国内外几代学者的努力下,迟滞非线性在非线性和动力学研究领域已形成一个独立的分支,但应该说还处于起步阶段。这主要表现在:一方面的研究重点在于从物理和工程实际问题中发现和提出迟滞非线性现象和问题,另一方面的研究重点则在数学上对迟滞非线性的描述和各种性质的证明。比较起来关于如何将现有的理论方法应用于解决工程实际系统问题方面的研究成果较为鲜见。特别是在自动控制领域中,早期有关非线性理论的书中迟滞非线性系统建模与控制的内容涉及很少。所幸近十几年来,这方面的论著呈迅速上升趋势,其研究的主要背景是智能结构或智能作动器<sup>[14-20]</sup>,主要目的是对迟滞非线性系统进行建模和控制。由于实际的系统往往是非局部记忆的、率相关的,甚至与温度、磁场等相关,故一些学者在已有迟滞非线性系统理论与方法的基础上,在动态迟滞非线性的建模与控制等研究方面取得了卓越的成绩<sup>[16,17,20-22]</sup>。从而在进一步完善迟滞非线性理论的同时也对其在工程中的应用起到了促进作用。由此可见,迟滞非线性系统的理论与应用还存在相当大的发展空间,许多问题有待进一步的研究和解决。

如上所述,由于问题处于学科交叉领域,故引起国内外有关物理、控制、机电、数学等领域学者的兴趣。与之前 50 多年的发展相比,可以预期迟滞非线性系统的理论与应用将会迎来更大的发展。

## 2) 经典的迟滞非线性

经典的迟滞非线性定义为一种具有率不相关性的记忆性质<sup>[6]</sup>。记忆性质通常分为两类:具有局部记忆性和非局部记忆性。具有局部记忆的迟滞非线性特征如下:在某一初始时刻  $t_0$  的输出值  $f(t_0)$  与在  $t \geq t_0$  时的输入值  $u(t)$ ,唯一确定  $t > t_0$  时的输出值  $f(t)$ 。对于具有非局部记忆的迟滞非线性,未来( $t \geq t_0$ )的输出值不仅

取决于输出  $f(t_0)$  的当前值,还取决于过去输入的极值。换言之,在迟滞曲线的任一点,仅存在一条或两条曲线可以描述具有局部记忆迟滞非线性的轨迹,如图 0.2 所示。

至于非局部记忆迟滞非线性,情况则有所不同:在迟滞区域的任何可达点上,存在无限条可能轨迹,如图 0.3 所示。其中,每一条轨迹取决于过去的一个特定历史,也就是取决于过去输入极值的特定顺序。显然,非局部记忆迟滞非线性更为复杂。

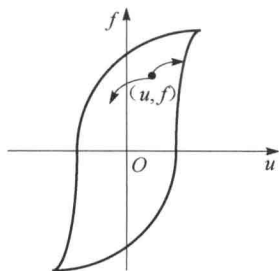


图 0.2 局部记忆迟滞非线性曲线

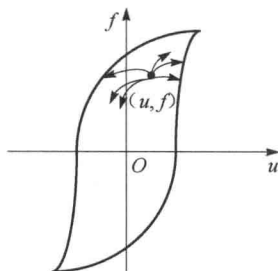


图 0.3 非局部记忆迟滞非线性曲线

以上相关的内容详见本书第 2 章,需要说明的是,智能结构中的迟滞非线性多为非局部记忆性的。

### 3) 动态迟滞非线性和广义动态迟滞非线性

事实上,在大部分典型的迟滞现象中,如铁磁学、铁电学、塑性中,记忆性通常都不是率无关的。输出随着输入速率而变化,即率相关迟滞非线性。因此,在实际应用中,经典的迟滞非线性的定义有它的局限性。

当迟滞非线性随外界环境因素(如输入的速率、应力场、温度场等)的变化而变化时,称为动态迟滞非线性<sup>[17]</sup>。通常讨论的几种外界相关因素有率相关迟滞非线性(rate-dependent)和应力相关迟滞非线性(stress-dependent)等。

率相关性指的是迟滞非线性系统的输出随输入速率的不同而不同。工程上大多数的智能材料如压电陶瓷、超磁致伸缩材料、形状记忆合金材料、磁流变材料等其输入/输出关系间的迟滞特性都表现出率相关的特点。文献[17]对超磁致伸缩智能作动器的率相关迟滞非线性建模与控制进行了深入讨论。

应力相关性指的是迟滞非线性系统的输出随自身所处应力场的变化而变化。实验表明,当智能材料承受较大应力时这种特性是不能忽略的。这种输入/输出关系之间的特性在超磁致伸缩材料、压电、形状记忆合金等智能材料上都存在<sup>[23,24]</sup>。

当几个外界因素及其耦合共同作用影响迟滞非线性时,称为广义动态迟滞非