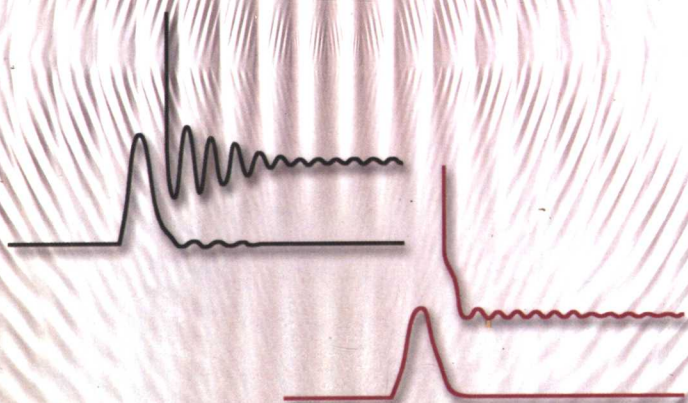


一体化振动控制

——若干理论、技术问题引论

张景绘 李 宁 李新民 李智明 等 著



科学出版社
www.sciencep.com



国家自然科学基金研究成果专著出版基金资助出版

一体化振动控制

——若干理论、技术问题引论

张景绘 李 宁 李新民 李智明 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以近期研究成果为基础,论述了主、被动振动控制一体化理论及技术的基本概念;复杂结构振动控制设计中的主要问题,包括结构动力学建模新方法,鲁棒振动控制的 H_∞ 和 L^1 方法以及阻尼器及阻尼结构;振动控制的优化问题,包括结构的动力学优化、控制器的优化、作动器/传感器数目和位置的优化配置;振动控制中的智能器件和结构。本书详细介绍了智能桁架结构,可控约束阻尼层结构,振动控制中应用压电材料研制的压电堆作动器及书本式作动器,电(磁)流变材料在振动控制中的应用及电(磁)流变阻尼器,振动控制中的试验技术。

本书可供高等院校及科研单位中的结构振动控制研究人员和研究生参考,也可供从事航空航天工程、机械工程、土木工程、地震工程或环境工程的科研人员及减振、隔振结构设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

一体化振动控制:若干理论、技术问题引论/张景绘等著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-014968-8

I. 一… II. 张… III. 振动控制—体化 IV. TB535

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 008075 号

责任编辑:鄢德平 田士勇/责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005年5月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1—2 500 字数:333 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

序

对一个工程结构进行减振、隔振及振动控制不仅是结构力学的重要研究领域,也是工程结构设计中的重大课题。在航天结构系统中,振动环境不仅影响卫星入轨或导弹落点精度,影响航天器发射和飞行可靠性,还往往是导致发射或飞行失败的主要原因之一。深入研究航天结构振动控制理论和技术,研究新的振动控制方法和途径,已成为一个亟待解决的问题。

鉴于上述情况,1997年航天科技集团火箭技术研究院总体设计部、西安交通大学、哈尔滨工业大学联合申请并承担了由国家自然科学基金委员会和航天科技集团火箭技术研究院共同资助的“航天结构系统一体化振动控制理论和技术”课题。该课题是以运载火箭为应用背景,为解决航天结构关键部件的振动抑制问题,对主、被动振动控制一体化理论与技术进行了系统的研究。

经过四年多的共同努力,该课题取得了重大的进展和重要成果,主要体现在以下几个方面:

1. 发展了两类主动阻尼结构的基础理论。(1)对主动阻尼桁架结构,提出了用筒型黏弹性阻尼和压电堆作驱动器替换桁架中若干承力杆组成智能桁架,并给出了设计方法及优化配置计算;(2)在国际上首先提出了可控约束阻尼结构,推导了该结构的运动方程。

2. 提出了两种新的建模方法。(1)对几种典型的航天结构建立了行波分析,引入了虚拟单元概念;(2)对复杂结构中非线性影响分析,引入时-频分析方法,定义了一种时频域定区域淹没算子,建立了非线性动力学系统的骨架线性系统,为非线性系统识别和建模开辟了一条新的途径。

3. 系统地研究了一体化控制中的优化问题。(1)研究了振动控制的鲁棒控制理论,导出了结构振动控制的 H_∞ 和 L^1 控制律;(2)将遗传算法和退火算法应用到传感器和驱动器的优化配置问题的求解。

4. 理论与工程实践密切结合。进行了系统的试验研究,验证了理论分析结果,发展了一体化振动控制中的技术。研究了四种必需硬件,填补了国内空白;研制了一体化振动控制软件平台,深入研究了ZN系列阻尼材料的动力学性能及应用问题;系统地对两个火箭仪器舱做了动力学分析和试验,并给出了其动力学特性;从振动控制角度,提出了局部模态和整体模态的控制策略,并进行了多种试验,发展了相应技术。实现了宽频带的一体化振动控制。

本书是上述课题研究成果的一个全面、系统的总结,内容新颖,具有较高的理论水平和实用价值,是一本难得的好书。

王心清

前 言

本书是国家自然科学基金重点项目（项目编号：19632010）研究成果。

二十多年来，众多科学家研究了振动控制问题，建议了很多控制策略，包括控制律及控制装置等诸多方面的问题，并出版了有关专著来介绍振动控制的基本理论及方法。这些研究和专著不但为工程实现奠定了基础，也推动了振动控制的深入研究。然而从工程要求出发，尚有诸多问题亟待解决，方能达到实际应用。尤其是复杂结构，如航天结构、高可靠的建筑结构等，结构复杂，振动环境条件（载荷）强度大、频带宽、不确定性强，冲击响应时间短，要求高可靠性、低附加能源、小附加质量等。传统的减（隔）振和主动振动控制的单一技术对复杂结构难以实现上述对振动控制的要求。在这种背景下，国家自然科学基金于1997～2001年把“航天结构系统一体化振动控制理论和技术”列为重点研究项目，由火箭技术研究院总体设计部、哈尔滨工业大学、西安交通大学的三十多位教授、高级工程师及博士生联合研究，建立和发展一体化振动控制的基本概念，研究相关的理论和技术问题。作者特别注明，下列研究成果是本书的基础：吕刚博士对筒型黏弹性阻尼器的研制及应用研究；朱桂东博士对行波建模方法的研究；王丽博士对时-频分析及建模的研究；李俊宝博士和吕刚博士对压电堆作动器的研制及应用研究；张希农博士对可控约束阻尼层的研究；谢石林博士对振动鲁棒控制的研究；严天宏博士、闫杰博士等对作动器和传感器优化配置的研究；李俊宝博士、张宏伟博士等对智能结构和振动智能控制的研究；牟全臣博士对主、被动振动控制软件的研究。特别说明的是吕刚博士建立的试验装置为相继研究者的试验奠定了基础；杨智春教授对电流变阻尼器、磁流变阻尼器的研究成果也是本书的重要内容之一。

广义上，一体化振动控制包括系统的动力学优化设计和各种减、隔振的方法及技术，但基金项目的具体研究目标是后者。对结构的系统建模研究主要为更好地实现相应的控制策略，故亦称王、被动振动控制一体化理论及技术。基金项目所研究的主要问题及取得的主要成果系统地总结在本书中。在振动控制中，希望这本书起到桥梁作用：从简单结构到复杂结构，从振动控制一体化理论和技术的研究到工程实现。

复杂结构一体化振动控制理论及技术主要研究的问题包括复杂结构的动力学建模，所建立的数学模型应适合振动控制器的设计和实现，并考虑结构的非线性及时变特性；新的控制策略的研究，主要侧重智能振动控制结构基础、控制装置

(机构)的实现及适应大型结构的鲁棒振动控制律;振动控制的优化问题,包括控制器设计,作动器和传感器位置和数量的多目标优化问题的建立,具体优化目标的实现及优化算法。除上述这些基本问题的研究外,本书还突出了以下两方面的内容:一是阻尼材料,因为它已被广泛应用,减振行之有效,在研究新阻尼材料特性的基础上,研制了新的阻尼器,并在约束阻尼层基础上发展了主动约束层结构和可控约束阻尼层结构,它们属智能结构范畴;二是专门章节介绍火箭仪器舱振动控制试验,以长Ⅲ甲火箭仪器舱作为检验振动控制策略的水准结构(Benchmark Vibration Control Structure),并用它来研究在型号中应用的有关问题。

全书共分8章。第1章综述一体化振动控制的基本概念;第2章叙述在复杂结构振动控制中的建模问题,重点介绍了行波方程的应用及非线性和时变性的处理方法;第3章针对不确定性问题,只介绍了振动鲁棒控制律,经典控制律未列入本书内容;第4章以阻尼材料为基础,介绍阻尼层结构的建模和设计,将约束阻尼结构发展成主动约束结构、可控约束阻尼结构及分流阻尼结构;第5章介绍组合振动控制,它是一体化振动控制的一种形式,在工程中容易实现,其内容包括阻尼器设计、多目标多变量优化问题建立及优化算法;第6章介绍了智能结构的基本概念,重点介绍了智能桁架结构,对该结构中的作动元件——压电堆作动器的设计也做了较详细的介绍,书本式作动器用于智能板、壳结构,这类结构的特性已列入第4章的内容;第7章专门介绍了电流变及磁流变阻尼器,以及在振动控制中的应用;第8章详细介绍了长Ⅲ甲火箭仪器舱的各种振动控制试验,为实现振动控制一体化,提出了局部模态和整体模态控制概念,综述了遇到的各种技术问题,力图使读者了解振动控制试验研究的内容及其重要性。

全书内容由张景绘和李智明确定。初稿于2001年10月完成。各章作者分别为:第1章张景绘,第2章王丽丽,第3章谢石林,第4章李宁、李智明,第5章郭彦峰,第6章李俊宝,第7章杨智春,第8章张景绘。全书由张景绘修订。2004年6月,经各章作者修改后,由张景绘就近年来的发展成果做了补充修订,李宁、李新民完成最终书稿。作者应该说明,虽然全书内容是一个整体,但各章自成体系,未将全书的文字、公式统一。当然这是一个缺陷,但这种形式更适合这个学科的快速发展。

黄文虎院士在 *Proceedings of International Conference on Advanced Problem in Vibration Theory and Applications* 上发表的论文和在大会上做的特邀报告(The Developments of Integrated Passive and Active Vibration Control of Aerospace Structures)高度概括了振动控制一体化理论与实践的研究成果,以此为纲形成了本书体系及内容,作者特此说明,并对黄文虎院士表示致意。

感谢火箭技术研究总院及其总体设计部对课题研究及本书编写给予的支持。

王心清教授是课题组组长，对本书编写付出了很多心血，作者在此表示诚挚的谢意，同时感谢火箭技术研究院总体设计部的史其善高工及有关人员对本书给予的各方面支持。

张景绘

2001年7月初稿于威海

2004年8月修改稿于西安交通大学

目 录

序

前言

第1章 导论	1
1.1 基本概念	2
1.1.1 分类	2
1.1.2 控制材料和元件	5
1.2 振动控制一体化策略	7
1.2.1 全局性问题	7
1.2.2 杂交阻尼结构	9
1.2.3 主动结构及智能结构	11
1.3 研究现状及趋势	14
参考文献	16
第2章 被控结构建模	19
2.1 引言	19
2.2 状态空间方程	19
2.3 行波动力学模型	22
2.3.1 单元模型	22
2.3.2 结点散射模型	23
2.3.3 系统总体方程	24
2.4 非线性动力学系统建模	24
2.4.1 几种时域模型	25
2.4.2 几种频域模型	29
2.4.3 非线性模态理论	30
2.4.4 注释	32
2.5 时频建模	32
2.5.1 非平稳信号的时频分析	32
2.5.2 广义骨架线性系统与骨架曲线	34
2.5.3 骨架曲线的辨识	37
参考文献	41
第3章 振动鲁棒控制	43
3.1 引言	43

3.2 不确定性建模	45
3.2.1 结构动力学模型的不确定	45
3.2.2 外界激励的不确定	47
3.3 H_∞ 振动主动鲁棒控制	48
3.3.1 H_∞ 控制基本理论	48
3.3.2 频域不确定 H_∞ 混合灵敏度设计	50
3.3.3 参数不确定 H_∞ 主动鲁棒控制设计	54
3.4 冲击响应界限控制的 L^1 方法	57
3.4.1 数学准备	57
3.4.2 冲击响应界限控制问题描述	58
3.4.3 与 LQR 和 H_∞ 最优控制的比较	64
3.5 关于振动鲁棒控制	67
参考文献	68
第 4 章 阻尼材料及阻尼结构	71
4.1 引言	71
4.2 阻尼材料的动态特性	71
4.2.1 阻尼材料的类型	71
4.2.2 黏弹性材料的本构关系	72
4.2.3 影响黏弹性材料性能的主要因素	73
4.2.4 ZN 系列阻尼材料及其性能	75
4.3 黏-弹性复合结构建模及分析	78
4.3.1 标准模型	79
4.3.2 分数导数模型	81
4.3.3 GHM 模型	82
4.3.4 ATF/ADF 模型	82
4.3.5 材料模型参数的拟合	83
4.3.6 模型自由度减缩	84
4.4 被动阻尼层结构	86
4.4.1 自由阻尼层结构	86
4.4.2 约束阻尼层结构	87
4.5 黏弹性阻尼器	93
4.5.1 阻尼器结构和力学模型	93
4.5.2 黏弹性阻尼器的理论分析	94
4.5.3 阻尼器的设计	98
4.5.4 阻尼器的应用	99
4.5.5 温度影响	101

4.6 可控约束阻尼层板	102
4.6.1 基本方程	103
4.6.2 方程求解	107
4.6.3 其他形式方程	108
4.7 主动约束阻尼	109
4.7.1 基本方程	110
4.7.2 离散化与控制方程	111
4.8 压电分路阻尼系统	112
4.8.1 被动分路阻尼结构	112
4.8.2 半主动分路阻尼结构	116
4.8.3 杂交分路阻尼结构	118
参考文献	119
第5章 组合振动控制	122
5.1 引言	122
5.2 空间桁架及组合振动控制	124
5.2.1 空间桁架	124
5.2.2 组合振动控制	124
5.2.3 组合桁架	125
5.3 组合桁架设计	128
5.3.1 绝对值模态应变能法	128
5.3.2 模态阻尼比的灵敏度分析	130
5.3.3 黏弹性阻尼杆设计	130
5.4 组合桁架有限元建模	133
5.4.1 压电作动杆单元建模	133
5.4.2 黏弹性阻尼杆单元建模	133
5.4.3 组合桁架的控制方程	135
5.5 被动阻尼对主动控制的影响	136
5.5.1 评价函数选取	136
5.5.2 试验研究分析	137
5.6 优化问题	139
5.6.1 优化问题建立及求解	139
5.6.2 位置配置指标	143
5.6.3 模拟退火算法	147
5.6.4 遗传算法	151
5.7 阻尼杆和作动杆的位置优化	157
5.7.1 黏弹性阻尼杆的位置优化	157

5.7.2	压电作动杆的位置优化	158
5.7.3	组合控制中主、被动构件的位置优化	159
5.7.4	优化算例	161
5.7.5	位置优化鲁棒分析	162
	参考文献	162
第6章	振动控制中的智能结构	167
6.1	引言	167
6.2	智能结构的基本概念	168
6.2.1	定义	168
6.2.2	主要研究的问题	169
6.3	压电主动构件	173
6.3.1	结构和设计原理	173
6.3.2	压电作动器的实验	175
6.4	智能空间桁架结构	182
6.4.1	机电耦合有限元模型	182
6.4.2	智能桁架结构实验模态建模	185
6.4.3	智能桁架结构振动阻尼控制	187
6.4.4	应用实例	188
6.5	书本式作动器	190
6.5.1	结构形式	190
6.5.2	作动器位置选择	191
6.5.3	作动器控制效果分析	192
6.6	MSC/NASTRAN-MATLAB 建模过程	194
6.6.1	计算公式	194
6.6.2	MSC/NASTRAN-MATLAB 实现过程	195
	参考文献	196
第7章	电流(磁)变技术在振动控制中的应用	200
7.1	引言	200
7.2	电流变材料特性	201
7.2.1	电流变液	201
7.2.2	电流变机理	201
7.2.3	电流变液的力学模型	204
7.2.4	常用的电流变液	205
7.2.5	影响电流变液性能的主要因素	207
7.3	电流变阻尼器件	210
7.3.1	电流变阻尼器的工作原理	210

7.3.2	电流变阻尼器	212
7.3.3	电流变阻尼器性能实验	214
7.3.4	电流变液阻尼器的力学模型	219
7.4	电流变技术在结构振动控制中的应用	220
7.4.1	电流变液在夹层结构振动控制中的应用	221
7.4.2	电流变阻尼器在转子振动控制中的应用	222
7.4.3	电流变阻尼铰在颤振控制中的应用	223
7.5	磁流变技术及其在振动控制中的应用	224
7.5.1	磁流变液的力学性能	225
7.5.2	磁流变阻尼器的设计	226
7.5.3	磁流变阻尼器在减振中的应用	229
	参考文献	230
第8章	长Ⅲ甲火箭仪器舱的一体化振动控制	232
8.1	结构和试验项目	232
8.1.1	意义和目标	232
8.1.2	试验项目	234
8.2	仪器舱的动力学特性	235
8.2.1	对试验结构的预分析	235
8.2.2	仪器舱试验边界条件	236
8.2.3	整体结构的低频模态测试	237
8.2.4	局部模态测试	239
8.2.5	整体结构的中、高频模态测试	243
8.2.6	有限元模态分析	244
8.3	振动控制试验	246
8.3.1	仪器安装板的约束阻尼	246
8.3.2	黏弹性阻尼器抑制全局模态	248
8.3.3	可控约束阻尼层抑制局部模态	251
8.3.4	压电堆作动器的应用和 H_∞ 控制	255
8.3.5	进一步试验研究	258
8.4	主、被动一体化振动控制试验平台	258
8.4.1	试验平台功能	259
8.4.2	实现方式	259
	参考文献	260
索引		262

第1章 导 论

研究振动的根本目的是控制振动,包括振动的抑制和利用两方面。本书中研究的振动控制主要是振动的抑制。振动控制的对象(称为被控结构或被控系统)可以是建筑结构,如楼房、桥梁等,可以是一个机械系统,如陀螺仪、计算机硬盘系统、机械手等,也可以是一个电系统,或机电耦合系统。被控系统有简单系统和复杂系统之分,通过研究简单系统可发展振动控制的基本理论。本书针对复杂结构系统,以航天结构为背景,研究振动控制理论及其相关技术。

复杂结构振动控制的突出问题有:

(1) 被控系统的数学模型(一般是有限元模型)的自由度过大,不适合振动控制器设计使用,而且由于技术条件限制,或控制设备复杂、昂贵,实现控制比较困难。因此,针对具有振动控制子结构的各种新型结构,需要进一步研究有限元建模过程,以及在控制律求解中的应用问题。另外,必须研究和发展新的建模方法,如波动方程用于杆件系统的建模,神经网络和时间序列模型用于未知激励系统的控制,综合使用力学定律和神经网络思想的杂交建模策略等。

(2) 系统振动控制的数学模型具有很大的不确定性,主要包括被控结构本身的不确定性和建模过程带来的不确定性两种情况。因而必须研究振动控制中不确定性建模,发展鲁棒振动控制策略。

(3) 被控制的振动频带较宽,主要是由于激振力频带宽(如地震、火箭发射产生的瞬态激振力等)或因结构太复杂。振动包括很多模态,无法在宽频带内(1~2000Hz)实现单一控制方法,客观上也需要研究和发展主、被动控制一体化理论和技术。

(4) 控制作用需要或消耗的能量过大,如控制地震引起的破坏,控制运载火箭发射或级间爆炸分离引起的冲击等,因此也需要发展高性能作动器及其材料。

(5) 被控结构和作动及传感功能的高度集成化,形成新型主动结构和智能结构,这类结构的动力学特性及分析方法需要更深入的研究。

(6) 载荷环境条件变化较快(持续时间一般在毫秒级以下),控制系统时滞将导致控制失败,需要建立新型的控制系统。

(7) 高可靠性、附加质量小及低能源消耗的要求,需要针对具体的结构建立不同的策略,对航天结构尤为突出。

(8) 现代的复杂结构大多使用新材料,如复合材料、机敏材料和高阻尼黏弹性材料等,它们与振动控制系统设计及被控系统设计密切相关。

因此,本书致力于论述振动控制一体化理论和技术,以适应解决复杂结构振

动控制在工程应用中的主要问题。

Yao^[1]首先将控制论的基本概念引入到结构振动控制问题中,众多力学工作者和工程师也得到了很多研究成果,并有多本专著发表。Soong^[2~4]的一系列著作代表了建筑工程结构中振动控制(抗地震和风振)的研究成果;Housner和Masri^[5]等十位权威教授联合发表的 *Structural Control: Past, Present, and Future* 对建筑结构振动控制理论及技术进行了全面论述;欧进萍教授^[6]总结和发展了土木工程结构的被动耗能减振及振动中的主动、半主动智能控制;顾仲权教授等^[7]的专著《振动主动控制》是我国20世纪90年代研究成果的代表;黄文虎院士等^[8]综述了航天结构振动控制的国内外现状及其发展趋势;Preumont^[9]出版的 *Responsive Systems for Active Vibration Control* 中汇集了多位专家关于振动主动控制的现代研究成果。

本书是国家自然科学基金重点项目“航天结构系统一体化振动控制理论和技术”(项目编号:19632010)及相继项目(项目编号:10272087, 10176024)研究成果的总结和发展。在这些项目的支持下,发表论文百余篇,涉及被控复杂结构系统的建模、新型振动控制律和控制元件的发展等问题。需要特别指出的是,本书较详细地介绍了以长征火箭仪器舱为被控结构的振动分析、整体模态和局部模态控制试验中可能出现的各种问题。书中涉及的智能振动控制结构的基础研究和试验内容,以及阻尼材料特性的具体数据,可供直接选用。

1.1 基本概念

早期的振动理论及技术主要着眼于减振和隔振。随着动力学理论及其技术的发展,基于优化算法,发展结构动力学修改理论与方法,进行结构动力学优化设计,是主动意义下的振动控制。把现代控制理论引用到振动控制中,使减振和隔振更具有明显的主动含义。因此,用振动控制这个术语比减振和隔振具有更广泛的含义。

以实现振动控制为目标的被控结构建模是复杂结构振动控制的基础;发展现代控制论中的相应方法,以适应高自由度的复杂结构,是振动控制研究中的一个核心问题;发展新型作动器,利用新型功能材料是振动控制发展的关键;解决被控系统的复杂性、不确定性,是复杂结构振动控制的主要技术问题。振动控制涉及的内容非常广泛,包括系统硬件和软件、动力学、控制论及材料科学等。

1.1.1 分类

图1.1给出了振动控制现代理论及技术发展的各个方面之间的相互关系。

(1) 从被控系统角度分类,广义的振动控制大致可分为三大类:

1) 结构动力学优化设计

- 2) 附加控制器的振动控制
- 3) 自适应结构 (智能振动控制结构)

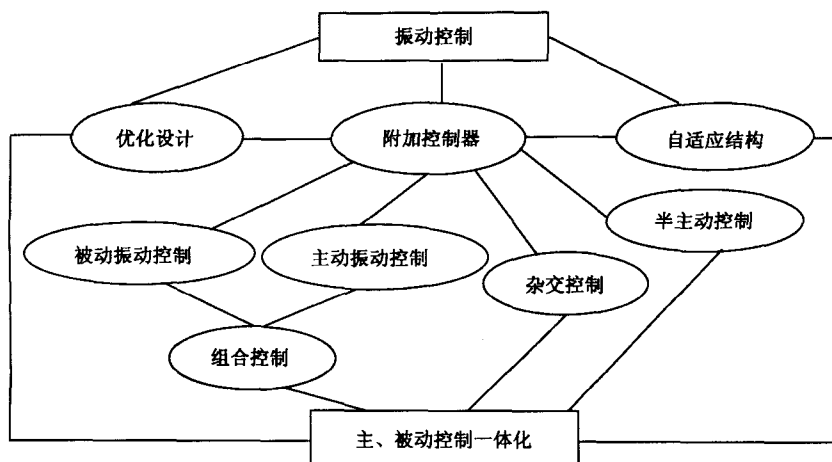


图 1.1 振动控制策略

结构动力学优化设计 可使系统具有良好的动力学特性，达到振动性能指标，而不增加任何附加部件，以振动性能指标组成目标函数，使用优化算法（通常为非线性优化算法）求解结构的设计参数（与质量、刚度和阻尼分布有关的几何和材料参数），是优先选择的振动控制策略。在实际设计过程中，可用优化设计过程发展结构动力学修改技术，在给定初始参数下，利用灵敏度分析或适当的摄动方法，求取设计参数的修改量。该方法更适合产品改进或更新设计。

附加控制器 附加控制器是在原系统基础上的改进措施，或加阻尼器（材料），或加隔振器（材料），一般不影响原结构的设计。这种方法是进行振动控制最直接的方法。

自适应结构 在更广泛意义上，可称为应用智能材料和元件的智能动力学系统。在振动控制范畴内，它是上述两类振动控制的综合，系统和控制器没有明显的分隔，可实现系统设计和控制器设计一体化。

结构动力学修改理论及其方法也得到广泛研究，由于一般不强调振动控制，故不列为本书内容。对第二类 and 第三类振动控制，本书将在相应章节中介绍最新技术和应用数据。

(2) 依据控制器是否需要外界供给能源，可将振动控制划分为三类：

- 1) 被动振动控制
- 2) 主动振动控制
- 3) 主、被动振动控制一体化

被动振动控制 不需要外界供给能源,其作用与系统的运动相关联,系统能量不会增加,减振装置消耗系统能量,隔振装置阻止能量向被控系统传递,因此附加被动振动控制装置可使系统趋于稳定。

主动振动控制 作动器需要外部供给能源,其作用可以与系统运动相关,也可以独立于系统的运动,可使振动减小,也可使振动增大,甚至使系统失稳,这主要与控制器的参数选择有关,最常用的是闭环反馈控制系统。由于作动器的输入信号是系统运动的函数,所以传感器/作动器的个数、位置十分重要。

主、被动振动控制一体化 综合使用被动振动控制和主动振动控制策略,以最少外界能源供给、减少附加装置或质量,达到最佳控制效果。由二者结合的方式,主、被动振动控制一体化又可划分为三类:

- 1) 组合控制
- 2) 半主动控制
- 3) 杂交控制

组合控制 同时使用被动控制元件(或材料)和主动控制器,在幅值或频带方面分担控制作用,或在稳定性方面二者互补。对被控结构的作用互不相关,但都和系统运动有关,故在设计时不独立,而且优化设计十分重要。

半主动控制 被动振动控制的一种特殊形式,没有机械能直接输入到被动控制元件中。目前提出的控制元件都是阻尼器,并且其阻尼作用是可控的,当使用反馈控制时,阻尼大小与系统有关,因此也有学者把它归类于主动振动控制,但它不会使结构失稳,只是阻尼大小的改变。

杂交控制 综合利用被动振动控制和主动振动控制的一种新型控制策略,真正实现了主、被动振动控制一体化的思想,其中被动振动控制可使结构更稳定,而主动振动控制可实现更好的控制效果。杂交控制原理有两类:一类是将主动振动控制复合到被动控制器中,如可控调谐阻尼器和可控隔振器;另一类是使用智能材料或结构,如具有主动元件的智能桁架、各类可控阻尼层结构等。

应该说明的是,这里的被动和主动的含义只对是否有外界能量输入系统而言,结构动力学优化设计是最主要的振动控制策略,但它已超出上述定义范畴。结构动力学优化设计及上述各类振动控制策略之间的区别不是来自数学模型,而是来自物理模型。例如,对于方程

$$(M + \Delta M)\ddot{z}(t) + (E + \Delta E)\dot{z}(t) + (K + \Delta K)z(t) = f(t) + \Delta f \quad (1.1)$$

式中, ΔM 、 ΔE 、 ΔK 和 Δf 分别是质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和力向量的摄动量。优化设计及上述任何一种控制策略都可实现这些摄动量,达到振动控制的目的。从该方程也可给出振动控制的另一种分类形式:

减振——实现 ΔE ,增加阻尼作用。

调谐——实现 ΔM 和 ΔK ,改变原系统的固有频率。

吸振——增加动力吸振器，改变原系统的固有频率。

隔振、阻振——实现 Δf ，减少激振力或隔离振源。

从航天结构系统振动控制的实现角度分析，上述各类控制策略的优缺点如表 1.1 所示。

表 1.1 各类振动控制性能比较

项目	机理	可控性	鲁棒性	稳定性	可靠性	附加质量	所需能源	费用
被动控制	简单	差	好	好	高	小	无	小
主动控制	复杂	中	取决于控制律	取决于控制律	低	较大	大	较大
一体化	复杂	好	好	好	较高	较小	小	较大

1.1.2 控制材料和元件

控制元件和材料是实现振动控制作用的关键。随着新材料的研究和发展，研制了许多新型控制元件，如用高阻尼材料设计的阻尼器，由智能材料组成的阻尼器、作动器和自适应结构等。这里按材料、减振器、隔振器和作动器分别综述。

(1) 材料

这里列出用于制造阻尼器、隔振器及作动器的材料（不包括电子器件）。

高分子阻尼材料 包括聚合物、橡胶、环氧树脂、塑料、聚氨酯、压敏胶合剂等，一般作为黏弹性材料处理，但它们的材料特性与初始变形有关，受温度影响较大，明显呈现非线性和温度相关特性，因此采用黏塑性本构关系，或在系统模型中引入温度变量时，需要进一步研究。

黏性流体 包括硅油和多种润滑油等，用于黏性阻尼器，可产生与速度成正比的阻尼力。

机敏材料 包括压电陶瓷、电流变材料、磁流变材料、磁致伸缩材料、形状记忆合金等，可用于被动阻尼器，也可用于主动振动控制的作动器。

高阻尼合金

(2) 减振器

金属屈曲阻尼器 利用金属构件屈曲时产生塑性变形，力和变形产生的迟滞回线消耗系统的能量。

摩擦阻尼器 利用干摩擦消耗系统的能量，可通过调节正压力来实现半主动控制。

黏弹性阻尼器 利用黏弹性材料的复模量的虚部起到结构阻尼的作用，但与频率有关。

橡胶阻尼器 由高阻尼橡胶材料制成的被动阻尼器。

黏性流体阻尼器 黏性流体通过一个小孔产生黏性阻尼，阻尼的大小与流体