

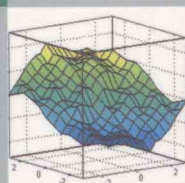
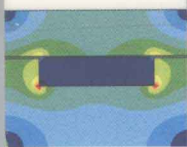
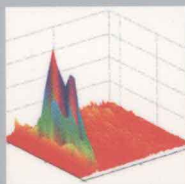


国防特色学术专著·机械工程

振动主动控制及应用

张春良 梅德庆 陈子辰 著

Active Control of
Vibration and Application



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色学术专著·机械工程

振动主动控制及应用

张春良 梅德庆 陈子辰 著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书共 12 章。第 1 章介绍振动主动控制的基本概念、国内外相关研究和应用情况;第 2 章分析振动系统建模问题,并以微制造平台主动隔振系统的建模为例进行了系统深入的分析;第 3 章分析传感器与致动器的优化配置问题,并对复杂激励环境和致动器不同安装方式下隔振系统的动力学特性以及主动控制系统反馈参数优化等问题进行了深入的探讨;第 4 章分析超磁致伸缩致动器的设计,并进行了静态特性和动态特性的实验测试与分析;第 5 章分析多种控制方法在振动主动控制中的应用与振动控制效果;第 6 章对自适应广义预测控制算法进行了分析和改进,提出了一种应用于振动主动控制的模糊广义预测控制方法;第 7 章构建了以工业 PC 机为核心的振动主动控制系统,并对有关理论和控制算法进行了实验测试和效果分析;第 8 至第 12 章对镗削系统切削稳定性与颤振控制方法、磁流变液在镗削振动控制中的应用与磁流变自抑振智能镗杆系统进行了系统深入的分析和讨论。

本书内容丰富,深入浅出,图文并茂,既有理论又有应用。有关研究成果可广泛应用于精密制造、精密测量、航空航天、国防军工等领域中的振动主动控制与精密隔振。本书既可作为高等院校有关专业高年级学生、研究生和教师的参考书,也可供在该领域从事研究和实践的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

振动主动控制及应用/张春良,梅德庆,陈子辰著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2010.12
ISBN 978-7-5603-3154-6

I. ①振… II. ①张… ②梅… ③陈… III. ①振动控制 IV. ①TB53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 265299 号

振动主动控制及应用

张春良 梅德庆 陈子辰 著
责任编辑 许雅莹

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号(150006) 发行部电话:0451-86418760 传真:0451-86414749

<http://hitpress.hit.edu.cn>

哈尔滨市石桥印务有限公司 各地书店经销

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:13.75 字数:335 千字

2011 年 2 月第 1 版 2011 年 2 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5603-3154-6 定价:34.00 元

前 言

振动是自然界和工程界常见的现象。通常情况下振动对系统本身及环境都是有害的,需要将其控制在一定振动量级范围内,一般通过采用消振、隔振、吸振、阻尼等技术措施来减轻机器设备和工程结构的振动并阻止其传播。由于振动被动控制不需要外界能源,装置结构简单,许多场合下减振效果与可靠性较好,已获得广泛应用。但随着科学技术的发展,对振动环境、产品与结构振动特性提出了越来越高的要求,被动振动控制技术已难以满足要求,于是许多发达国家致力于振动主动控制技术的发展,并取得了多项突破。特别是随着信息技术、测控技术的发展,一些控制方法和相应的测控系统日趋成熟,促进了振动主动控制技术的进步,并开始在抑制挠性航天结构振动,控制精密设备或精密产品加工中的振动,控制高挠性土木工程结构振动以及车辆半主动振动控制等领域得到了成功的应用。振动主动控制已成为国内外振动工程界的研究热点,是当前振动工程领域内的高新技术。目前,对振动主动控制的研究工作主要集中在:传感器与致动器及其优化配置、动力学建模、振动控制算法与控制器等技术与应用方面。可以说,发展振动主动控制技术对于促进国防建设和国民经济发展具有重要意义。

本书是作者多年从事振动主动控制技术方面的教学和科研工作的经验及研究成果的总结,并吸收了相关学科的新思想、新理论、新技术。本书从理论研究和工程应用角度,提出了多项针对实际问题的振动控制理论、方法和关键技术,内容涉及振动主动控制技术及其在微制造隔振平台和镗削振动控制中的应用等相关理论与技术。本书在介绍振动主动控制基本概念、研究现状与发展趋势的基础上,分析了振动系统建模问题,特别是微制造平台主动隔振系统的建模;分析了传感器与致动器的优化配置,并对复杂激励环境和致动器不同安装方式下隔振系统的动力学特性以及主动控制系统反馈参数优化等问题进行了深入的探讨。分析了超磁致伸缩致动器的设计,并进行了静态特性和动态特性的实验测试与分析。分析了 PID 控制、LQG 控制、 H_∞ 控制、模糊控制和神经网络控制等多种控制方法在振动主动控制中的应用与振动控制效果。在对自适应广义预测控制算法进行分析和改进的基础上,提出了一种应用于振动主动控制的模糊广义预测控制方法,实现了广义预测控制与模糊控制的优势互补。构建了以工业 PC 机为核心的振动主动控制系统,并对有关理论和控制算法进行了实验测试和效果分析。还对

镗削系统切削稳定性与颤振控制方法、磁流变液在镗削振动控制中的应用与磁流变自抑振智能镗杆系统进行了系统深入的分析 and 讨论。

本书由张春良、梅德庆、陈子辰合作完成,全书由张春良定稿。作者的研究生们做了部分文字、图形处理和校稿工作,在此表示感谢。在写作过程中,参考了大量的相关书籍和文献,特向这些作者致以诚挚的谢意。周云教授和全燕鸣教授在百忙之中审阅了全书,并提出了宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

作者感谢“十一五”国防特色学术专著基金对本书出版的支持,感谢哈尔滨工业大学出版社的支持与帮助,感谢国家自然科学基金项目(NO. 50075058, NO. 50375070, NO. 50405036)、国家“863”高技术研究发展计划项目(2008AA04Z407)和“十一五”国防基础科研项目(B0120060585)对本书研究工作的资助。

限于作者的知识水平和经验,书中不足和疏漏在所难免,恳请广大专家和读者不吝赐教。

作者

2010 年 9 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 振动主动控制概述	1
1.2 振动主动控制技术研究现状与发展	2
1.3 精密隔振技术发展现状	7
第2章 振动系统建模	10
2.1 振动系统建模概述	10
2.1.1 振动系统建模的基本概念	10
2.1.2 描述振动系统的方法	10
2.2 振动系统建模	12
2.2.1 单自由度振动系统	12
2.2.2 多自由度振动系统	13
2.2.3 弹性体系统	14
2.2.4 非线性系统	16
2.3 微制造平台主动隔振系统	17
2.3.1 微制造平台隔振系统仿生原理设计	17
2.3.2 微制造平台主动隔振系统结构设计	22
2.3.3 微制造平台主动隔振系统振动模型及其动力学方程	23
2.4 空气弹簧及其振动模型	27
2.5 实验模态分析	29
第3章 振动主动控制系统的动力学分析	33
3.1 致动器与传感器的优化配置	33
3.1.1 致动器的优化配置	33
3.1.2 传感器的优化配置	35
3.2 双层隔振系统致动器安装方式合理性分析	36
3.2.1 致动器仅作用于隔振对象时的动力学分析	36
3.2.2 致动器安装于中间质量与基础之间时的动力学分析	38
3.2.3 致动器安装于隔振对象与中间质量之间时的动力学分析	39
3.3 精密隔振系统的振动传递率	42
3.3.1 单个干扰作用下的振动传递率	42
3.3.2 复杂激励环境下的振动传递率	44
3.4 基于遗传算法的主动控制系统反馈参数优化	48
3.4.1 主动控制系统优化模型	48
3.4.2 基于遗传算法的主动控制系统反馈参数优化	49

3.4.3 主动控制系统反馈参数优化结果·····	50
第4章 超磁致伸缩致动器 ·····	55
4.1 超磁致伸缩材料·····	55
4.2 超磁致伸缩致动器的结构与磁路设计·····	56
4.3 超磁致伸缩致动器电磁特性的有限元分析·····	60
4.3.1 平面电磁场边值问题的有限元法·····	60
4.3.2 超磁致伸缩致动器的磁场有限元分析·····	61
4.4 超磁致伸缩致动器的工作特性·····	64
4.4.1 超磁致伸缩致动器的静态特性·····	64
4.4.2 超磁致伸缩致动器的动态特性·····	68
4.5 超磁致伸缩致动器的非线性模型与分析·····	70
第5章 振动主动控制算法的比较 ·····	72
5.1 PID 控制 ·····	72
5.1.1 数字 PID 控制·····	72
5.1.2 微制造平台振动的 PID 控制仿真·····	73
5.2 LQG 控制 ·····	75
5.2.1 LQG 控制模型 ·····	75
5.2.2 微制造平台振动的 LQG 控制仿真 ·····	76
5.3 H_∞ 控制 ·····	78
5.3.1 H_∞ 控制理论 ·····	78
5.3.2 H_∞ 控制器的设计 ·····	80
5.3.3 微制造平台振动的 H_∞ 控制仿真 ·····	81
5.4 模糊控制·····	83
5.4.1 模糊控制的基本概念·····	83
5.4.2 模糊控制器设计·····	84
5.4.3 微制造平台振动的模糊控制仿真·····	86
5.5 神经网络控制·····	88
5.5.1 神经网络控制模型·····	88
5.5.2 微制造平台振动的神经网络控制仿真·····	89
5.6 控制算法的比较·····	90
第6章 振动的模糊广义预测控制 ·····	94
6.1 广义预测控制理论·····	94
6.2 改进的自适应加权广义预测控制·····	96
6.2.1 改进的加权广义预测控制·····	96
6.2.2 自适应广义预测控制直接算法·····	99
6.3 模糊广义预测控制 ·····	101
6.3.1 模糊广义预测控制模型 ·····	101
6.3.2 加权系数调节器 ·····	101
6.4 振动的模糊广义预测控制律的设计 ·····	103

6.4.1 振动系统运动方程的离散化	103
6.4.2 振动系统模糊广义预测控制律的设计	104
6.5 振动控制系统稳定性分析	106
6.5.1 一步预测控制的稳定性分析	106
6.5.2 改进型加权广义预测控制的稳定性分析	107
6.6 微制造平台振动的模糊广义预测控制仿真	108
6.6.1 模糊广义预测控制仿真与性能分析	108
6.6.2 微制造平台振动的模糊广义预测控制仿真	110
第7章 微制造平台振动主动控制	112
7.1 微制造平台振动主动控制系统	112
7.2 微制造平台振动主动控制系统软件设计	114
7.2.1 操作系统与编程语言	114
7.2.2 振动主动控制软件的结构组成	115
7.3 微制造平台振动控制效果	117
7.3.1 正弦激励振动控制	117
7.3.2 随机干扰振动控制	119
第8章 镗削系统的切削稳定性及其颤振控制方法	121
8.1 镗削系统的切削稳定性分析	121
8.2 基于主轴变速方法的切削颤振控制机理	124
8.2.1 主轴变速对切削稳定性的影响	124
8.2.2 主轴变速对切削过程中颤振频率的影响	127
8.2.3 主轴变速方法对切削颤振的控制机理	127
8.3 结构刚度变化对镗削系统稳定性的影响	128
8.3.1 结构刚度变化对镗削系统稳定性影响的复平面表示	128
8.3.2 从稳定性极限图上看结构刚度变化对镗削系统稳定性的影响	130
8.3.3 结构刚度连续变化对切削颤振控制机理的研究	131
第9章 磁流变自抑振智能镗杆的工作机理及其设计优化	133
9.1 磁流变技术	133
9.2 磁流变自抑振智能镗杆的研制	134
9.3 磁流变液抑振单元的结构优化	137
9.3.1 磁流变液抑振单元的材料选择	137
9.3.2 磁流变液抑振单元的磁路系统建模	138
9.3.3 磁流变液抑振单元的结构参数优化	140
9.3.4 结构参数优化结果的仿真分析	141
第10章 磁流变自抑振智能镗杆的动力学模型	145
10.1 智能镗杆中磁流变液材料的动力学特性与本构模型	145
10.1.1 磁流变液材料的动态特性区划分	146
10.1.2 磁流变液材料动力学特性分析	147
10.1.3 基于 Maxwell 与 Kelvin 模型的磁流变液材料本构模型	148

10.1.4	磁流变液材料的动态本构特性分析	149
10.2	基于 Euler-Bernoulli 梁模型的智能镗杆动力学特性分析	151
10.2.1	智能镗杆屈服前区的动力学特性分析	152
10.2.2	智能镗杆屈服后区的动力学特性分析	156
10.2.3	智能镗杆屈服时的临界条件	157
10.2.4	智能镗杆动力学特性仿真	159
10.3	基于 Bouc-Wen 模型的智能镗杆动力学模型	160
10.3.1	基于 Bouc-Wen 模型的智能镗杆动力学建模	161
10.3.2	基于 Bouc-Wen 模型的智能镗杆动力学模型相关参数识别	163
10.3.3	基于 Bouc-Wen 模型的智能镗杆动力学特性仿真	164
第 11 章	磁流变自抑振智能镗杆的控制策略	166
11.1	智能镗杆切削颤振控制的非线性随机最优控制策略	166
11.1.1	智能镗杆切削颤振控制的非线性随机最优控制律	167
11.1.2	受控智能镗杆系统的响应与性能准则	171
11.1.3	智能镗杆切削颤振控制的非线性随机最优控制策略的数值模拟	172
11.2	智能镗杆颤振抑制的变刚度控制策略	173
11.2.1	从能量角度分析变刚度控制策略对镗削系统稳定性的影响	174
11.2.2	变刚度控制策略的固有频率改变量参数的优选	176
11.2.3	变刚度控制策略的固有频率变化波形和频率参数的优选	178
第 12 章	磁流变自抑振智能镗杆的切削颤振控制实验	182
12.1	磁流变自抑振智能镗杆切削颤振控制实验平台	182
12.1.1	智能镗杆实验系统硬件配置	182
12.1.2	智能镗杆实验系统软件设计	183
12.2	基于非线性随机最优控制策略的颤振实验	185
12.2.1	加控制前后切削振动信号的时域和频域特性分析	185
12.2.2	非线性随机最优控制策略对颤振预防的作用	186
12.2.3	非线性随机最优控制策略的控制效果与效率	187
12.3	基于变刚度控制策略的颤振实验	188
12.3.1	变刚度控制策略的颤振抑制效果实验	188
12.3.2	控制信号幅值大小与变化波形优选实验	190
12.3.3	控制信号变化频率优选实验	193
参考文献		197

第1章 绪 论

1.1 振动主动控制概述

振动是自然界和工程界常见的现象。虽然工程上有许多利用振动进行工作的设备和工艺,但通常情况下振动对系统本身及环境都是有害的,它直接影响仪器设备功能,降低机械设备的精度和效率,加剧构件磨损,甚至引起结构疲劳破坏,从而影响到机器设备和工程设施的安全性和可靠性。因此,对于大多数机器设备和工程结构来说,一般都要求将其可能产生的振动量级控制在一定范围内。振动控制就是采用消振、隔振、吸振、阻尼等技术措施来减轻机器设备和工程结构的振动并阻止其传播,按对振动控制机理的不同可分为被动控制和主动控制两大类。被动控制由于不需要外界能源,装置结构简单,许多场合下减振效果与可靠性较好,已获得广泛应用。但随着科学技术的发展,以及人们对振动环境、产品与结构振动特性越来越高的要求,被动控制已难以满足要求。振动主动控制是指在振动控制过程中,根据传感器检测到的结构或系统振动,应用一定的控制策略,经过实时计算,驱动致动器对结构或系统施加一定的力或力矩,以抑制结构或系统的振动。主动控制在声学中并不是一个新概念,早在20世纪30年代,Paul Lueg就提出了利用主动噪声抵消法代替被动噪声控制和对低频噪声进行控制的设想。随后人们在这方面做了大量的研究工作,使得噪声的主动控制得以飞速发展。然而,由于振动传递远比声音的传播复杂得多,致使振动主动控制的研究工作进展相对较慢,直到二次世界大战后的军备竞赛才促使其迅速发展。特别是随着信息技术、测控技术的发展,一些控制方法和相应的测控系统日趋成熟,促进了振动主动控制技术的进步,并开始在航空航天、土木建筑、车辆工程及机械工程等领域得到了成功的应用。

振动主动控制系统主要由传感器、控制器和致动器等组成。传感器感受外部激励及系统信息,控制器接受传感器的信息并按照一定的控制算法计算所需控制力,致动器则产生所需的控制力并作用到系统上,从而实现对振动的控制。振动主动控制系统分为前馈控制系统和反馈控制系统。

前馈控制系统是直接利用输入或扰动信号进行控制,它是在干扰发生后,被控量还未显现出变化之前,控制器就产生了控制作用。因此,当干扰到达时,控制器必须有足够的时间收到参考信号,且在此时间内能产生必需的控制信号,并输出到控制源,其结构如图1.1所示。前馈控制系统只要能及时而准确地获取参考信号,就可以实现对扰动的完全补偿,使被控量成为对扰动绝对不灵敏的系统。对于静态或缓慢变化的周期性干扰,参考信号的获取相对比较容易。对于随机或非周期性干扰,如果难以获得满意的参考信号,就有必要引入干扰预估测定以产生合适的抵消干扰。前馈控制属于开环控制,对补偿结果无法检测,前馈控制系统要求对每个干扰均设计一套前馈控制装置,前馈控制的这些局限性限制了前馈控制系统的广泛应用。

反馈控制系统是利用传感器对受控对象的输出状态进行检测,检测信号经适调、放大后传至控制器,控制器按照所需的控制律产生必需的控制信号,通过致动器对受控对象进行控制,使其振动满足预定的要求,其结构如图1.2所示。反馈控制系统获取控制信号的方式与前馈

控制系统不同。反馈控制系统通过比较系统输出与期望行为之间的偏差来获取控制信号,其目标是减小系统的输出量与参考输入量之间的偏差以获得预期的系统性能。在反馈控制系统中,既存在由输入到输出的信号前向通路,也包含从输出端到输入端的信号反馈通路,两者组成一个闭合的回路。因此,反馈控制系统又称为闭环控制系统。反馈控制是自动控制的主要形式,它不需要提前获取参考信号就能降低受控对象的振动,因而在振动控制领域的应用比较普遍。然而,在反馈控制系统中,偏差信号不可能达到零,这就限制了控制系统的性能。

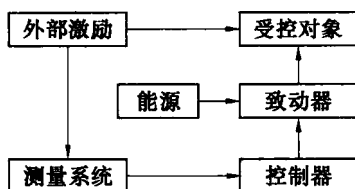


图 1.1 前馈主动控制系统

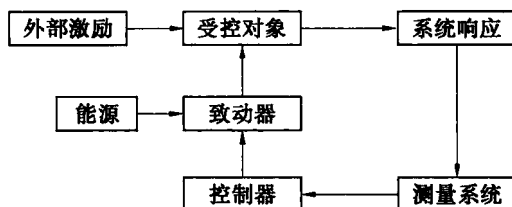


图 1.2 反馈主动控制系统

1.2 振动主动控制技术研究现状与发展

振动主动控制是当前振动工程领域内的高新技术,已成为国内外振动工程界的研究热点。振动主动控制技术研究始于 20 世纪 50 年代。纵观振动主动控制的发展过程,可将其划分为重点突破、广泛探索和重点攻关三个阶段。从 20 世纪 50 年代起,振动主动控制取得了三项突破,即实现了机翼颤振的主动阻尼,提高了飞机航速;磁浮轴承控制离心机转子成功,创造出分离铀同位素的新工艺;振动主动控制提供超静环境,保证惯导系统满足核潜艇和洲际导弹导航的精度要求。20 世纪五六十年代成为振动主动控制发展的重点突破阶段。上述成就迅速吸引了众多的专家研究这项技术,于是 20 世纪 70 年代便成为广泛探索振动主动控制在各工程领域应用的阶段。进入 20 世纪 80 年代,振动主动控制技术在几个工程领域的应用前景相当明朗,这就是用振动主动控制技术抑制挠性航天结构振动、控制精密设备或精密产品加工中的振动、控制高挠性土木工程结构振动以及车辆半主动振动控制,于是振动主动控制研究进入重点攻关阶段。目前,对振动主动控制的研究工作主要集中在:传感器、致动器、动力学建模及其振动控制、传感器/致动器的优化配置等几方面。

1. 振动主动控制中致动器与传感器的研究

(1) 致动器

致动器(Actuator)又称作动器或执行机构,其作用是将控制器输出的电量等非机械量转变为应变、位移、力等机械力学量,以实现对控制对象的应变驱动、位移驱动、力驱动的目的,因此,它是振动主动控制系统中必不可少的一个环节。实际应用对致动器提出的基本性能要求包括:最大极限应变量、刚度、频带、线性、强度、温度、灵敏度、有效性和可靠性等。目前,用于振动主动控制的执行机构主要有:气动伺服致动器、液压伺服致动器、电磁式致动器、压电致动器、电致伸缩致动器、形状记忆合金致动器以及超磁致伸缩致动器等。

气动伺服致动器通常由一个气缸和一个供气泵组成,通过改变二位四通的气阀,可以控制

气缸活塞的上下运动,实现控制杆的位移和力的输出,从而对振动进行控制。使用气动伺服致动器的优点主要是由于气动伺服致动器系统结构简单并且容易维持,致动器零件价格相对低廉,对于一般的控制系统尤其是对控制精度要求不是很高的控制系统容易达到控制的目的,操作安全易行,有很好的力输出和位移输出,稳定性和可靠性高;其缺点是机构时延大,容易出现迟滞现象,对于气泵的输入输出管道要求高。

液压伺服致动器是一个液压作动筒,其工作原理和气动式类似,由于液压式致动器控制力(位移)大、稳定性及可靠性高,因此得到广泛的应用。其缺点是机构延时大,容易出现迟滞、爬行、蠕动等缺点。主要适用于低频、控制力大的场合。

电磁式致动器近年来在振动主动控制中逐渐受到重视,从主磁路磁场形成机理的不同,可分为永磁性和电磁性两类。电磁式致动器的优点是频率范围宽、可控性好、易于对复杂周期振动及随机振动实施控制,主要适用于较高频率、控制力不大的场合,而且电源通常比气源、液压源简单易行。

对于压电材料,电场与机械应变场具有一阶近似线性关系,且是双极性的,即正、逆压电效应。压电式致动器就是利用压电材料的正、逆压电效应进行工作,可以分为薄片(或薄膜)型和叠层(或厚)型。薄膜型可以进一步分成压电陶瓷片(PZT)或压电薄膜(PVDF)。薄膜型通常粘结在激励的结构上,通过向该结构施加弯矩来产生激励。压电式执行器具有精度高、不发热、响应速度较快、重量轻、机电转换效率高等优点,但输出力小,所需驱动电压高,且压电材料存在滞后现象,主要用于高频、控制力不大的场合。

形状记忆合金(SMA)是近几十年发展起来的一种新型智能材料,具有“智能”特性。形状记忆合金致动器既有传感功能(感知并接收应力、应变、电、热等信号),又具有驱动功能(对激励产生响应),而且形状记忆合金具有源于热弹性马氏体相变的所谓形状记忆效应,可根据热、力、电各种物理参变量之间的关系对响应进行主、被动控制。形状记忆合金致动器只需SMA一种材料,其体积可以很小,而且还能被做成纤维状。形状记忆合金致动器具有很强的抗疲劳破坏能力,每次被驱动所产生的应力、应变的大小都基本相同,而且也不易受环境因素如湿度或真空的影响,但其具有实时性差等缺点,也不适用于高精度的微制造隔振平台的控制。

超磁致伸缩致动器(GMA)是在超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material, GMM)的基础上发展起来的一种新型致动器,与常用的压电材料、形状记忆合金致动器相比,超磁致伸缩致动器具有响应速度快、应变大、使用频带宽($0 \sim 3\,000\text{ Hz}$)、驱动电压低等优点,因而受到众多研究者和研究机构的关注。早在1842年,焦耳发现:磁性材料所处的磁场变化时,其长度(主要的)和体积也随之发生微小的变化,此现象称为磁致伸缩,又称焦耳效应。长期以来,作为磁致伸缩材料的主要是镍、铁等金属或合金,由于磁致伸缩值较小,功率密度不高,故应用面较窄,主要用于声纳、超声波发射等方面。所谓“稀土超磁致伸缩材料”则指国外20世纪80年代末新开发的新型功能材料,主要是指稀土-铁系金属间化合物。这类材料具有比铁、镍等大得多的磁致伸缩值,其磁致伸缩系数 λ 比一般磁致伸缩材料高约 $10^2 \sim 10^3$ 倍,因此被称为巨或超磁致伸缩材料。迄今为止,比较理想、性能稳定、应用较广的一种超磁致伸缩材料是Terfenol-D(铽镧铁磁致伸缩合金)。在高精度稳定平台等特殊结构中, Terfenol-D是一种很有前途的材料,它在磁场作用下机械形变能力为压电材料的10倍,杨氏模量相当高,约为 $(2.5 \sim 3.5) \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,因此能够提供较大的控制力。

(2) 传感器

传感器是振动主动控制系统中的重要元件,其作用是将机械量(应变、位移、速度、加速度)转化为非机械量(电、光等)。从传感器的工作原理看,既有诸如加速度传感器、应变仪、接近式检测仪等传统类型传感,又有基于压电材料、光导纤维和形状记忆合金的新型传感器及先进的非接触式传感器。电阻应变片只能感受结构一点的平均应变变量,而光导纤维可以感受结构连续的应变变量。传感器的选择取决于所检测的系统变量以及所采用的信号处理方式。用于振动主动控制的传感器主要有加速度传感器、速度传感器和位移传感器。尽管位移传感器的动态范围小于加速度传感器的动态范围,但位移传感器在低频($0 \sim 10$ Hz)时更实用,此时要测量的加速度值太小。同样,在一些振动系统中,位移是首选的控制变量,对加速度信号进行双重积分来得到位移信号常常导致过大的电磁噪声干扰。

2. 系统建模与模型简化

建模的目的是建立结构或控制系统在外部动态载荷作用下的动力响应模型,尽量真实地描述整个系统的行为。通常建模方法可分为理论建模和实验建模两类。理论建模主要是根据牛顿力学原理建立系统的数学模型。近年来,理论建模已逐渐发展形成了静态法、动态有限元法和阻抗建模分析法三种分析方法。静态法从原理上又称为静刚度等效法。动态有限元建模法有两种,其中一种相应于上述的静刚度方法;另一种是基于机电耦合本构关系,利用广义变分方程或 Hamilton 原理,推导得到结构的有限元方程。阻抗建模分析法是采用机电比拟的等效阻抗(力学阻抗和电学阻抗)来进行分析建模。Chen 和 Luire 等利用机电系统的阻抗比拟,提出了压电主动构件和智能结构的等效力学阻抗建模的思想,并仿造电学系统中的阻抗匹配理论,将其运用于机械阻抗网络分析中,成功地实现了智能结构的主动阻抗阻尼控制研究。对于复杂结构,这类模型往往维数较高或者是分布系统,多用于系统动力学响应分析与对闭环系统的性能评价方面。实验建模则是利用系统的输入、输出数据采用控制中的系统辨识算法辨识出系统的模型,辨识算法不同,则得到的描述模型也不尽相同,如由状态方程、神经元网络、模糊规则集等描述的模型。辨识方法可分为参数辨识与非参数辨识。

与建模密切相关的是模型简化,包括模型的解耦与降阶。由于离散结构模型往往维数很高,不便于结构控制设计与分析,需要对模型进行降阶。俞一梅等评述了一些降阶方法,如 Pade 逼近、模态截断、平衡降阶、Hankel 平衡降阶等。Meyer D 和 Srinivasan S 针对二阶形式结构动力学方程提出了一种平衡降阶方法。由于计算机技术的发展及主动控制技术越来越高的实时计算要求,计算机在振动主动控制中的应用越来越普遍,这就涉及模型的时间离散化问题。

3. 振动主动控制中控制器的研究

控制器是振动主动控制中的一个重要研究内容。采用不同的控制技术与控制算法来设计控制器,在一定程度上决定了在不同的环境条件以及要求精度下所达到的对控制对象的控制效果。就目前振动主动控制的应用来看,控制器的设计主要有以下方法。

(1) 独立模态空间控制

独立模态空间控制是将系统运动方程从物理坐标系线性转换到模态坐标系,将各模态耦合的物理坐标转换为在模态坐标系中表示的模态坐标,达到解耦的目的。从控制方程方面来

看,就是将解一个复杂的高阶微分方程问题转换为解多个低阶微分方程的问题。对于复杂结构,这种方法需要对模态进行截断,从而造成剩余模态(未控制模态)的溢出。

(2) 直接输出反馈

直接输出反馈就是将传感器的信号经过增益放大后直接送到对应致动器来进行控制,它可以避免独立模态空间控制方法中的模态溢出等问题,并可以保证所有的模态均是稳定的。但 R. L. Clark 认为如果考虑传感器件动力学和电路信号放大、调节的情况,直接输出反馈将面临稳定性、鲁棒性的问题。

(3) 最优控制

根据所受的载荷及振动系统反应值,应用控制理论中的极大极小原理、随机分析原理、动态规划以及最优滤波等,对控制机构的参数进行优化,求解最优控制力,以使系统的振动达到理想的控制效果,这就是最优控制算法。该算法目前应用最多,存在形式也最多,其中的线性二次优化控制应用最广。

(4) 自适应控制

自适应控制是基于一定的数学模型和一定的性能指标综合出来的,但由于先验知识很少,需要根据系统运行的信息,应用在线辨识的方法,使模型逐步完善,从而使控制系统获得了一定的适应能力。自适应控制的研究对象是具有不确定的系统,所谓的“不确定性”是指被控对象的数学模型不是完全确定的,其中包含一些未知因素和随机因素。现在比较成熟的自适应控制系统有以下两类:参考模型自适应控制系统和具有被控对象数学模型在线辨识的自适应控制系统,而在振动控制中多采用后一种控制方法。由于复杂系统中往往含有未知参数,因此自适应控制在振动控制中也得到了广泛应用。

(5) 神经网络控制

人工神经网络由许多处理单元(神经元)相互连接组成,具有并行处理信息的能力,可以用来描述几乎任意的非线性系统。神经元能够模拟人脑功能,综合由连接权获得的信息并依据某种激励函数进行处理,根据一定的学习规则,实现网络的学习和关系映射。神经网络具有高度自适应学习能力、鲁棒性、容错性和自组织离散分布处理能力,不仅可以用于系统模型的辨识,也可用于系统振动控制。

(6) 模糊控制

自从 1965 年美国自动控制理论专家 L. A. Zadeh 提出了用模糊集合描述事物以来,模糊数学及应用的发展十分迅速,1974 年英国的 E. H. Mamdani 首先把模糊集理论应用于锅炉和蒸汽机的控制,效果良好,从此模糊控制诞生了。目前,模糊技术在振动控制中得到了较广泛的应用,其中研究较多的问题是对隶属度函数的改进,如使用优化技术以获得最优隶属度函数;使用遗传算法调整隶属度函数的形状与参数;基于 ANFIS 模型使用神经网络得到隶属度函数。

(7) 鲁棒控制

当系统有一个小扰动时,实际模态可能发生很大的变化,基于模态控制的方法对此无能为力,因此在振动控制设计中必须考虑鲁棒性问题。鲁棒控制器设计方法如 H_∞ 等在振动控制中得到了广泛的应用。Spencer 总结了 H_∞ 在振动控制中的一些应用;Nishimura 在振动控制中采用了结合极点配置的鲁棒控制技术;Nishitani 给出了使用降阶模型的 H_∞ 结构响应控制;Katsuhide W 等采用 H_∞ 与 PI 控制相结合应用于磁浮隔振系统;毛剑琴等利用 LMI 技术研究了

系统中含参数不确定性时基于输出反馈的控制器设计。

4. 振动主动控制中传感器/致动器的优化配置

传感器/致动器的优化配置问题是振动主动控制中的一个重要环节。传感器/致动器的优化配置包括在系统中的配置位置和配置数目,这直接决定了振动控制系统的稳定性、可控性、可观性以及控制的有效性。

随着控制技术的发展,传感器/致动器在振动系统中的优化配置问题日趋重要。尽管有些情况利用经验就可以确定合理的配置,但对于较为复杂的结构,经验判断方法就显得无能为力了,而必须借助于适当的优化计算方法来完成。目前在该领域大量的研究主要集中在寻求合理的、能反映设计要求的优化准则与研究适合于所求解优化问题的有效的计算方法两个方面。

(1) 传感器/致动器优化配置准则

①基于控制系统可控性、可观性的准则。传感器/致动器在系统中的配置情形,直接决定了振动控制系统的可控性和可观性。Arbel、Longman 和 Viswanatham 等首先将系统可控性/可控度的概念应用于致动器优化配置中。Harnden 等论述了模态可控性、可观性测量的概念,并将其应用于线性系统中传感器/致动器的优化配置。Lim 通过定义传感器/致动器的可控子空间和可观子空间的交集子空间的维数和相应的正交基,致动器/传感器应配置在系统中的这些位置,使得其对应的可控、可观交集子空间的维数最大。系统的可控性和可观性可分别利用各自的格拉姆矩阵的奇异值来度量。在平衡坐标系中,Hankel 矩阵可同时表示系统的可控和可观格拉姆矩阵,因此 Hankel 矩阵的奇异值大小可同时用来度量系统的可控性和可观性。

②基于系统能量的准则。控制器的作用就是通过将外界能量输入系统,以消耗系统的振动能量,因此,系统的耗散能的大小直接反映了控制系统作用的有效性。闭环系统的耗散能直接相关于致动器的位置,Schulz、Kondoh 和 Chen 等推导了常增益速度反馈条件下,闭环系统的耗散能表达式,它通过 Lyapunov 方程的解直接相关于致动器的位置和数目,利用最大化耗散能准则,进行了结构振动阻尼控制中致动器的优化配置。闭环系统的振动能量是又一表征控制系统有效性的准则。Chen 和 Lee 等推导了系统总能量与致动器位置之间的内在联系,基于最小化系统能量准则,研究了同位和非同位速度反馈控制系统中致动器的配置问题。Kondoh 等还利用二次型优化控制理论中的性能指标直接表示为系统能量和控制能量之和的特点,最小化该性能指标相当于同时最小化系统能量和控制能量,通过求解 Riccati 方程,可同时实现控制增益和致动器配置的优化计算。由于能量性能指标函数都与系统的初态有直接关系,这可能会影响最终的优化结果。

③其他准则。除了上述已被广泛采用的性能准则外,还有一些有价值的优化准则,如 Horner 以振动控制系统阻尼矩阵的迹满足适当的约束条件为准则来确定阻尼元件的优化配置;Choe 等定义了控制系统性能的度量准则,并在模态控制中基于致动器影响矩阵,在一定的物理控制力约束条件下,考虑最大化模态控制力(能量)、最小化模态溢出能量,提出了多种优化目标函数,研究了致动器在分布参数系统中的优化配置问题;Lindberg 和 Longman 则研究了独立模态空间控制中,基于最小化物理控制力思想,直接利用致动器影响矩阵的奇异值,来建立致动器优化配置的性能准则。

(2) 致动器/传感器配置的优化计算

由于问题的特殊性,致动器/传感器优化计算通常涉及离散优化问题,实际上致动器/传感

器优化配置就是处理如何用少量的控制元件实现最优控制的问题。寻求有效的离散优化计算方法,对于进行致动器/传感器优化配置是非常必要的。Haftka 和 Adelman 提出了离散搜索优化算法,用于大型空间结构形状控制中致动器的优化配置计算。模拟退火技术和遗传基因算法是处理离散优化问题的一种有效算法,特别适合于大型空间结构的传感器/致动器优化配置计算。Salama 等首先利用模拟退火随机搜索技术研究了致动器/传感器综合优化配置问题。Chen 和 Bruno 等基于系统耗散能准则,利用模拟退火算法,研究了自适应桁架结构速度反馈控制中主动构件的优化配置问题。该优化计算方法虽然不能保证全局优化,但却是一种快速、有效的次优化算法。遗传基因法是又一种有效的离散随机寻优算法,已由 Onada 和 Rao 等用于解决主动结构系统中致动器的优化配置问题。遗传基因算法和模拟退火算法有望成为大型复杂结构振动控制元件优化配置计算的最有发展前途的方法。

1.3 精密隔振技术发展现状

近年来,微电子技术、计算机技术、超精密机械加工技术、新材料和生物学工程的迅猛发展,极大地推动了微机电系统(MEMS)的发展。微机电系统是指可以批量制作的,集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路,直至接口、通信和电源等于一体的微型器件或系统。这种微机电系统不仅能够采集、处理与发送信息或指令,还能够按照所获取的信息自主地或根据外部的指令采取行动。早在 1959 年,美国物理学家、诺贝尔奖获得者 R. Feynman 就提出了微型机械的设想。1962 年,微小器件的先驱——硅微压力传感器问世,其主要技术基础是硅膜、压敏电阻和体硅腐蚀工艺,继而用硅加工的方法开发出 $50 \sim 500 \mu\text{m}$ 的齿轮、齿轮泵、气动轮及连接件等微型机构。1987 年,转子直径为 $60 \sim 120 \mu\text{m}$ 的硅微静电电机在美国加州大学伯克利分校问世,从而促进了微机电系统研究的全面开展。微机电系统使得人们在认识世界、改造世界方面,又进入了一个崭新的层次,它标志着人类对微观领域的探索又迈出了新的一步,它的发展将引起一场新的工业革命,并将深刻地影响着人们的生活方式。

微机电系统研究的领域涉及微机械学、微电子学、微光学、流体力学、自动控制、物理、化学、生物学以及材料科学等学科,是一个多学科交叉的、高技术的新兴学科。当微型器件和系统的特征尺寸达到微、纳米级时,许多宏观的规律就不再适用,因此,微机电系统研究提出了许多新的科学问题,从而也推动着科学技术的发展与进步。微尺度效应理论、材料技术、设计技术、微制造技术、微通信技术、微测试技术、微控制技术等,都是微系统技术研究不可或缺的组成部分。一般来说,微机电系统必要技术大致可分为三类:基础技术、机能装置技术和系统化技术,而其中最基本且最重要的是基础技术,主要包括加工、材料、设计、检测、评价、装配等技术。由于 MEMS 的微型性和精密性方面的要求,基础技术中加工、检测和装配等工作必须在一个具有良好隔振性能的微制造隔振平台上进行。而随着科学技术的发展,精密仪器仪表的加工、测量和使用等也对环境振动提出了更严格的要求。例如,单点金刚石超精密切削加工可得到 0.1 nm 级的表面粗糙度,高精度惯性仪表的校准要求具有振动加速度控制在 10^{-6} g 以内的环境。解决精密设备、仪器仪表的防振和抗冲击问题已成为一项迫切的任务。为了做到这一点,必须有高精度的隔振平台。这些高精度隔振平台需要隔离的环境微振动干扰是复杂的,不仅要求隔离如大地脉动、机器运转、车辆行驶、人员走动等引起的地面振动,还要求对空调气流、声音、马达等引起的作用于平台的振动能够迅速消除。通常,大地脉动型地面振动频率主

要在 0 ~ 1 Hz, 实验室工作人员走动所引起的振动频率为 1 ~ 3 Hz, 通风管道、变压器和马达所引起的振动为 6 ~ 65 Hz, 建筑物本身一般在 10 ~ 100 Hz 之间摆动。因此, 精密隔振系统的设计需要考虑的振动频率为 0 ~ 100 Hz, 这就要求所设计的隔振系统不仅对中高频扰力具有良好的隔振效果, 而且对低频和超低频扰力也能进行有效的隔离。然而, 由于被动隔振装置的固有频率不能无限制地降低, 采用传统的被动隔振技术很难有效地隔离超低频振动信号, 特别是无法隔离由试验仪器、气流等所产生的直接干扰。

主动隔振技术是 20 世纪五六十年代发展起来的一种新的振动控制方法, 它是利用外界能源产生控制振动所需的作用力, 具有较强的抗复合干扰能力。同被动隔振技术相比, 主动隔振技术的隔振效果要好得多, 尤其在隔离超低频振动方面的优势更加明显, 因而受到了人们的广泛重视。自从主动隔振技术出现以来, 许多发达国家就致力于高精度隔振平台系统的研究, 尤其是为满足惯性仪表校准技术的要求而开发的一系列气动和液动伺服隔振系统, 如美国空军于 1976 年开始研究的用于惯性仪表的精密隔振平台, 采用气动与电磁支承并用, 并采用主动控制技术, 平台固有频率 1 Hz, 转动角速度允许值为 0.001 rad/min , 以转动半径 0.1 m 计算, 在平台固有频率处的加速度允许值为 $3 \times 10^{-9} \text{ g}$; 日本 20 世纪 80 年代研制的用于惯性仪器校准和标定的主动隔振平台可达到 10^{-8} g 的隔振效果。此外, 各国还相继开展了高精度隔振平台及其相关技术的研究工作。

T. Fujita 等人对一个 $0.7 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ 、质量 80 kg 的铝制台体进行了六自由度微振动主动控制实验研究。致动器采用 8 个压电致动器, 同时将橡胶垫置于台体和致动器之间; 6 个伺服加速度计获取台体的振动信号用于控制, 3 个获取支撑平台的信号用于监控; 控制方法为模态匹配法。实验结果表明, 在 0.3 ~ 100 Hz 频率范围内, 振动加速度可达到 10^{-6} g 。Y. Nakamura 等人采用 8 个超磁致伸缩致动器和 4 个空气弹簧对质量 2 000 kg 的钢制平台进行了六自由度微振动主动控制实验研究。采用 6 个伺服加速度计获取平台的振动信号用于控制, 控制方法也是模态匹配法。实验结果表明, 在 3.0 ~ 20 Hz 频率范围内, 振动加速度衰减到地面振动的 $1/3 \sim 1/10$, 达到了 $8 \times 10^{-6} \text{ g}$ 。Kajiware 等人研究了用压电致动器对半导体加工装置台体的振动进行主动控制, 控制后的微平板印刷精度由原来的 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 提高到 $0.1 \text{ }\mu\text{m}$ 。Z. Jason Geng 等人用 6 个磁致伸缩致动器组成的 Stewart 平台进行六自由度振动主动控制实验研究, 反馈信号为加速度和力, 采用鲁棒自适应滤波控制算法。实验结果表明, 对于 56.2 Hz 的干扰, 采用主动控制可获得 30 dB 的减振效果。T. Takagami 等人用空气弹簧实现台体的振动主动控制, 空气弹簧本身起到被动支承台体的作用; 通过汽缸控制主气室中空气的流入、流出, 实现主动控制; 阻尼由连接主气室和辅助气室之间的节流孔产生。仿真和实验表明, 对于地面干扰, 振幅衰减了 70% 以上, 减振效果较明显。K. Watanabe 等人采用 4 个电磁致动器形成磁悬浮隔振系统, 结合 PI 控制算法对垂直方向的振动进行控制, 振动加速度衰减了 90%, 取得了较好的减振效果。

我国对防微振的研究与工程实践始于 20 世纪 60 年代初期, 对防微振用隔振装置的研究开发始于 20 世纪 80 年代。经历几代人的努力, 已经取得了一定的研究成果, 我国基本解决了彩色胶片涂布、惯导系统测试、集成电路光刻工艺、空间光学系统检测、激光实验等方面的防微振问题。这些系统均采用被动隔振技术, 其中大多是采用空气弹簧隔振装置。为进一步提高隔振效果, 有的系统采用了多级被动隔振技术。如刘平成等人采用多维被动隔振方法, 利用橡胶弹簧和空气弹簧设计了纳米级微动试验台的隔振系统, 但只进行了仿真计算, 未进行实验研