

振动主动控制

胡作波 马永强 陈玉东 著



国防工业出版社

振 动 主 动 控 制

顾仲权 马扣根 陈卫东 著

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的航空、航天、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金
第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾铎		
秘书长	刘琯德		
委员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

4016624

前 言

振动主动控制作为固体力学、自动控制、计算机、材料与测试技术等多学科的交叉,是振动工程领域中的一项高新技术,有着重要的应用价值与发展前景,目前已成为振动工程研究领域中的热点之一。据我们所知,至今国内外还没有一本较全面系统地介绍与论述这项高新技术的专著。近 10 多年来,我们对这项高新技术进行了探索性的研究,很愿意将研究成果与体会整理成册,以飨读者。

我们的研究工作得到了多项国家自然科学基金与航空科学基金等的支持,为此,首先应对各项科学基金的支持表示衷心的感谢。

我们还要感谢中国科学院院士胡海昌教授与振动控制界的老前辈严济宽教授对本书的推荐。也感谢国防科技图书出版基金评审委员会及有关编审的宝贵意见与建议。南京航空航天大学孙平凡编审为本书的问世、博士研究生彭福军对本书的写成都给予很大的支持,对此致以诚挚的谢意。

振动主动控制涉及面宽,各项内容起点高低不一,要在有限的篇幅内较全面系统地论述与介绍这项高新技术是很困难的,我们尽力做到既面面俱到,又突出重点。书中列入的参考文献可给读者提供更深入的信息,以弥补我们叙述的不足。本书还引用了国内外同行专家学者的研究成果,在此一并致谢。

本书内容涉及动力响应与动稳定性主动控制问题的理论、方法与应用。全书除引论外共分六章进行介绍:第二章讨论数学模型,这是问题分析和综合的基础;第三章讨论控制律的设计方法,

这是振动主动控制研究的核心环节,论述目前常用的时域法;第四章阐述控制律设计中的若干重要问题,这是提高控制器设计质量必然遇到的共性问题;第五、六章介绍主动控制技术在动力响应与动稳定性控制中的具体应用;第七章介绍这项高新技术的近期进展。

最后,欢迎读者对本书批评与指正。

目 录

第一章 引 论	1
1.1 振动控制的任务与实现途径	1
1.2 振动控制的分类	2
1.3 振动主动控制及其发展	3
参考文献	10
第二章 数学模型	12
2.1 连续控制系统的模型描述	13
2.1.1 状态空间描述	13
2.1.2 传递函数描述	14
2.1.3 权函数描述	15
2.2 离散控制系统的模型描述	16
2.2.1 离散状态空间描述	17
2.2.2 脉冲传递函数描述	18
2.2.3 权序列描述	20
2.3 振动主动控制问题的数学模型	21
2.3.1 基于状态空间描述的数学模型	21
2.3.2 基于传递函数描述的数学模型	26
参考文献	30
第三章 控制律设计方法	31
3.1 特征结构配置法	33
3.1.1 基于状态反馈控制的鲁棒特征结构配置法	34
3.1.2 基于输出反馈控制的鲁棒特征结构配置法 ——物理空间实现	44
3.1.3 基于输出反馈控制的鲁棒特征结构配置法 ——模态空间实现	52

3.2	最优控制法	67
3.2.1	确定最优控制	68
3.2.2	随机最优控制	75
3.2.3	瞬时最优控制	80
3.2.4	观测器	82
3.3	次最优控制法	86
3.3.1	次最优控制的导出	87
3.3.2	次最优控制的解法	89
3.4	模态控制法	94
3.4.1	两类模态控制法	94
3.4.2	模态坐标的估计	99
3.5	自适应控制法	103
3.5.1	简化自适应控制	104
3.5.2	基于超稳定性的自适应控制	109
3.5.3	基于自适应滤波的前馈控制	116
3.6	预测控制法	122
3.7	时域—频域联合设计法	125
	参考文献	127
第四章	控制律设计中的若干重要问题	131
4.1	模型降阶	131
4.1.1	代价分析法	132
4.1.2	平衡降阶法	135
4.1.3	最优投影法	140
4.2	溢出	142
4.2.1	观测溢出与控制溢出	142
4.2.2	稳定性分析	143
4.2.3	溢出抑制	144
4.3	传感器与作动器的定位	153
4.3.1	基于输出可控度准则的方法	154
4.3.2	基于模态坐标提取精度准则的方法	157
4.4	鲁棒性	164
4.4.1	条件作用与稳定鲁棒性问题	165

4.4.2	对称反馈控制下的稳定鲁棒性分析	167
4.4.3	基于 H^∞ 控制理论的鲁棒控制问题	170
4.4.4	基于容限控制的响应鲁棒性问题	174
4.5	时滞	176
4.5.1	时滞的影响	177
4.5.2	时滞补偿	178
4.6	控制律的设计途径	182
4.6.1	高阶受控对象—低阶受控对象—低阶控制器	183
4.6.2	高阶受控对象—高阶控制器—低阶控制器	183
4.6.3	高阶受控对象—低阶控制器	186
	参考文献	188
第五章	动力响应的主动控制	193
5.1	主动吸振	193
5.1.1	频率可调谐式动力吸振器	193
5.1.2	非频率可调谐式动力吸振器	201
5.2	主动隔振	203
5.2.1	完全主动隔振	204
5.2.2	半主动隔振	207
5.2.3	主动式动力反共振隔振	210
5.2.4	微重力环境下的主动隔振	212
5.3	主动阻振	215
5.4	主动消振	220
5.4.1	高阶谐波控制	220
5.4.2	结构响应主动控制	221
5.4.3	脉冲控制	223
	参考文献	225
第六章	动稳定性的主动控制	228
6.1	飞机机翼颤振主动抑制	228
6.1.1	最优控制法	230
6.1.2	次最优控制法	234
6.2	直升机旋翼—机体耦合系统动稳定性的主动控制	237
6.3	转子动稳定性的主动控制	241

参考文献	244
第七章 振动主动控制的近期新进展	245
7.1 受控对象与控制器的联合优化设计	245
7.2 新型作动器及其它主动元件	250
7.2.1 反作用式作动器	250
7.2.2 压电式作动器	251
7.2.3 形状记忆材料作动器	252
7.2.4 磁致伸缩材料作动器	253
7.2.5 电流变流体	255
7.3 智能结构	256
7.4 神经网络在振动主动控制中的应用	257
参考文献	259
附录	261

第一章 引 论

1.1 振动控制的任务与实现途径

振动控制是振动工程领域内的一个重要分支,是振动研究的出发点与归宿。从广义上说,振动控制包括两方面的内容:一是振动的利用,充分利用有利的振动,如各类振动机器等;另一是振动的抑制,尽量减小有害的振动,因为振动加速运转机械的磨损,缩短产品与结构的寿命,使人易于疲劳,使仪器易于失灵。本书所讲的振动控制,只是振动的抑制。

振动控制的任务就是通过一定的手段使受控对象的振动水平满足人们的预定要求。这里,受控对象是各类产品、结构或系统的统称。为达到振动控制的目的所采取的手段,通常需经历如下五个环节:

(1)确定振源特性与振动特征:即确定振源的位置,激励的特性(简谐性、周期性、窄带随机性或宽带随机性),振动特征(受迫型、自激型或参激型)等,因为不同性质的振源引起的振动,其解决的方法也不同。

(2)确定振动控制水平:即确定衡量振动水平的量及其指标,这些量可以是位移、速度或加速度、应力等,也可以是其最大值或均方根值。

(3)确定振动控制方法:不同的振动控制方法其适用性不同,这些方法包括隔振、吸振、阻振、消振及结构修改等。

(4)进行分析与设计:包括建立受控对象与控制装置(如吸振器、隔振器、阻尼器等)的力学模型、进行振动分析,以及对控制装置参数与结构的设计。

(5)实现:将控制装置的结构与参数从设计转化为实物。可实现性是振动控制研究中必须注意的重要问题。

1.2 振动控制的分类^[1.1~1.5]

按不同性质的振动区分,振动控制包括动力响应的控制与动稳定性的控制。受控对象对外界随时间变化的扰动都会引起动力响应。各工程领域中大量存在这类响应,如由于受控对象的某个固有频率与外激励频率接近或重合而出现的共振,其大幅度的振动常导致产品或结构在短时间内失效或破坏。动不稳定是由于受控对象内部出现正反馈而引起随时间增长越来越大的振动,即使在无交变外扰(但存在外界常能源)的情况下也会出现,也是一类容易短时间内导致产品或结构严重破坏的振动。

按所采用的抑制振动手段区分,振动控制方法有五种(图 1-1):

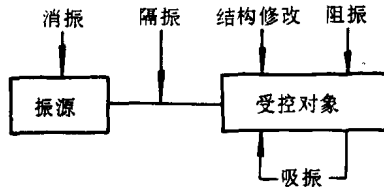


图 1-1 五种振动控制方法

(1)消振:即消除或减弱振源,这是治本的方法。因为受控对象的响应是由振源(激励)引起的,外因消除或减弱,响应自然也消除或减弱。如对不平衡的刚性或柔性转子,采用动平衡方法消除或减弱它们在转动时因质量不平衡出现的离心力及力矩;如对高烟囱、热交换器等结构,由于卡门涡引起的流激振动,可通过加扰流器的方法破坏卡门涡的生成,因而使涡激强度减弱;又如车刀的颤振,可通过加冷却剂的方法减小切削时的车刀与工件之间的摩擦力,破坏出现颤振(一种动不稳定现象)的条件。

另外,消振还有另一个含义——抵消振动,即由控制引起的振动抵消未加控制时的原有振动。

(2)隔振:在振源与受控对象之间串加一个子系统称之为隔振器,用它减小受控对象对振源激励的响应。这是一种应用广泛的减振技术,如飞机座舱内仪表板通过隔振器与机体相连,从而减小机体振动向仪表板的传递;动力机械通过隔振器与基础相连,从而减小机械运转时产生的交变扰力和力矩向基础的传递。

(3)吸振:又称动力吸振。在受控对象上附加一个子系统称之为动力吸振器,用它产生吸振力以减小受控对象对振源激励的响应。这又是一种应用广泛的减振技术,如为减小直升机在飞行中机体振动水平而采用的连于驾驶舱内的弹簧—质量块型吸振器、连于桨毂处的双线摆型吸振器及连于桨叶根部的摆式吸振器;高层建筑顶部安装的有阻尼动力吸振器(又称调谐质量阻尼器(TMD))。

(4)阻振:又称阻尼减振。在受控对象上附加阻尼器或阻尼元件,通过消耗能量而使响应减小,如粘贴阻尼材料的汽车壁板能有效地降低车辆在不平路面上行驶引起的随机激励响应;直升机增加桨叶减摆器的阻尼以防止出现动不稳定现象——“地面共振”。

(5)结构修改:通过修改受控对象的动力学特性参数使振动满足预定的要求,这是一种不需附加任何子系统的振动控制方案,目前是非常引人注目的。所谓动力学特性参数是指影响受控对象质量、刚度与阻尼特性的那些参数,如惯性元件的质量、转动惯量及其分布。对实际存在的受控对象来说,这是个结构修改问题,而对处于初始设计阶段的受控对象来说,则是个动态设计问题。

按要否能源区分,振动控制可分为无源控制与有源控制,前者又称被动控制,后者又称主动控制。

1.3 振动主动控制及其发展

振动被动控制由于不需外界能源,装置结构较简单,易于实

现,经济性与可靠性好,在许多场合下减振效果满意,已广泛地在各工程领域中得到应用。但随着科学技术的发展,以及人们对振动环境、对产品与结构振动特性越来越高的要求,振动被动控制的局限性就暴露出来了,难以满足人们的要求。如无阻尼动力吸振器对频率不变或变化很小的简谐外扰激起的振动能进行有效的抑制,但它不适用于频率变化较大的简谐外扰情况;另外,其吸振器质量块的重量代价与振幅限制也是妨碍这类吸振器更广泛应用的原因。又如被动隔振器对外扰频率大于受控对象—隔振器系统固有频率的 $\sqrt{2}$ 倍时能起减振作用,但对低频(如小于2Hz)外扰的隔振在实现时就会遇到静变形过大与失稳的问题,造成低频隔振难题;另外,隔振器的阻尼是降低隔振效率的因素,而阻尼又是减小共振频率下的响应所必不可少的。再如由粘弹性材料构成的阻尼材料比金属材料有较大的损耗因子,但其值还有待进一步提高。因此,人们除在振动被动控制的研究领域内继续探讨更为有效的减振方案外,又进一步寻求新的振动控制方法。主动控制技术由于具有效果好、适应性强等潜在的优越性,很自然地成为一条重要的新途径。

振动主动控制是主动控制技术在振动领域中的一项重要应用,包括开环与闭环两类控制,如图1-2所示。

开环控制又称程序控制,其控制器中的控制律是预先按规定的要求设置好的,与受控对象的振动状态无关,而闭环控制中的控制器是按受控对象的振动状态为反馈信息而工作的,后者是目前应用最为广泛的一类控制,也是本书讨论的重点。

由图1-2可见,振动闭环控制即根据受控对象的振动状态进行实时的外加控制,使其振动满足人们的预定要求。具体地说,就是装在受控对象上的传感器感受其振动,传感器的输出信号(经适调、放大后)传至控制器,控制器实现所需的控制律,其输出为作动器动作的指令,作动器通过附加子系统或直接施加作用于受控对象,这样,构成一个闭环振动控制系统。

由图1-2可见,一个振动主动控制系统由以下几个环节组

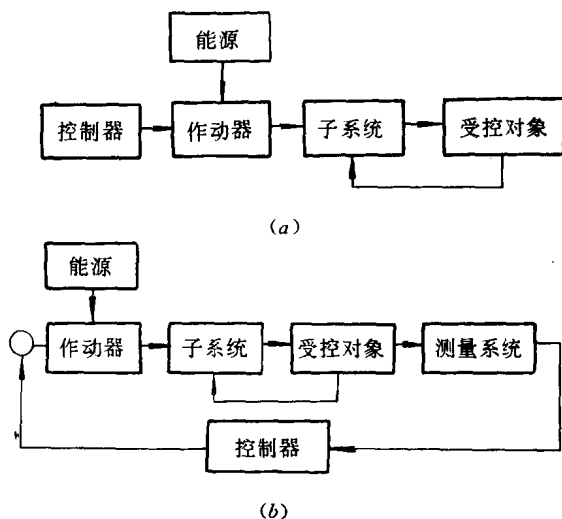


图 1-2 两类振动主动控制

(a)开环控制;(b)闭环控制。

成：

(1) 受控对象：这是控制对象——产品、结构或系统的总称，它可以是单自由度系统、多自由度系统，更多的是无限自由度（又称弹性体）系统。直升机减振问题中的机身、高层建筑抗震问题中的建筑物都属于受控对象。

(2) 作动器：也称作动机构。它是一种能提供作用力（或力矩）的装置。作用力（或力矩）可以直接施加于受控对象上，如主动隔振系统中连于运动基础与受控（隔振）对象之间的作动器（如伺服液压作动器），它直接施力于受控对象上；又如机器人臂的振动主动控制中关节内的电动力矩马达，它直接施力矩于受控对象（机器人臂）上。作用力（或力矩）也可以通过附加子系统提供对受控对象的作用力（或力矩），如飞机机翼颤振主动抑制系统中装在机翼上的

伺服液压作动器驱动气动操纵面(又称控制面),从而产生附加的气动力,此力作用于受控对象——机翼上。常用的作动器有伺服液压式、伺服气动式、电磁式、电动式和压电式等。

(3) 控制器:它是主动控制系统中的核心环节,由它实现所需的控制律。控制律就是控制器输入与输出之间的传递关系。对开环控制来说,控制器的输入是按一定的程序预先设置好的;对闭环控制来说,控制器的输出来自从测量系统感受到的受控对象的振动信息。控制器的输出是用于驱动作动器所需的指令。控制律可以由模拟电路或模拟电子计算机、数字计算机实现,前者属模拟控制,后者属数字控制。

(4) 测量系统:包括传感器、适调器、放大器乃至滤波器等将受控对象的振动信息转换并传输到控制器输入端的各个环节。常用的传感器有压电式和压阻式加速度计、电位计式位移传感器、光电式位移传感器等。

(5) 能源:它是用来供给作动器工作所需的外界能量,与作动器形式相对应的有液压油源、气源、电源等。

(6) 附加子系统:这是附加的控制子结构或子系统的总称,有时作动器不直接施力于受控对象上,而是先施力或运动于附加子系统,通过附加子系统的运动进而产生施加于受控对象的作用力,如前所述的飞机机翼颤振主动抑制系统中就有这样的附加子系统——控制面。当然,不是任何的振动主动控制系统都必须有附加子系统,而前面五个环节却是必不可少的。

与振动领域中两大类问题——动力响应与动稳定性相对应,存在两类振动主动控制问题:

(1) 动力响应的主动控制:即控制在特定的外扰作用下受控对象的响应使预定的要求得到满足。方法有直接法与间接法之分,前者以受控对象的响应为目标来设计控制律,后者是通过控制模态参数(模态频率、模态阻尼、振型等)达到上述目的。

(2) 动稳定性的主动控制:即控制受控对象各阶模态的稳定程度,如使原不稳定的模态变成稳定的模态,或使原来稳定的模态具