

黑龙江省精品图书出版工程

结构振动的主动控制

Active Control of Structural Vibration

王 飞 翁震平 何 琳 著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

黑龙江省精品图书出版工程

结构振动的主动控制

Active Control of Structural Vibration

王 飞 翁震平 何 琳 著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书内容涵盖主动控制成功实现所需的各相关理论、概念,例如被控对象建模和控制器设计所需的向量、矩阵运算,有限脉冲响应和无限脉冲响应滤波器的设计以及各种常用的自适应算法等;特点是分别基于梁、平板、圆柱壳这三种典型结构讨论了前馈控制、反馈控制和自适应控制等振动控制方法;且利用遗传算法、模拟退火智能算法讨论了作动器和传感器数量及位置的优化。另外在文中穿插讨论了结构振动控制的现状、热点和未来研究方向。

本书内容适宜以减振降噪为研究方向的研究生、学者或是对减振降噪产品开发感兴趣的工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

结构振动的主动控制/王飞,翁震平,何琳著. —
哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2016.7
ISBN 978-7-5661-1188-3

I. ①结… II. ①王… ②翁… ③何… III. ①结构振
动控制 IV. ①TB123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 317045 号

选题策划 史大伟
责任编辑 张淑娜
封面设计 恒润设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 13.25
字 数 346 千字
版 次 2016 年 7 月第 1 版
印 次 2016 年 7 月第 1 次印刷
定 价 50.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

人类对振动的控制虽然不如利用振动的历史悠久,但是在水能、风能尤其是蒸汽和电能这种可控能源的规模使用后,对振动控制的要求也越来越为广泛与迫切。不仅可以通过减振提高机械系统运行的平稳度与精度、延长使用寿命等,而且基于对振动的控制可以提升各式交通工具内乘客与工作人员的舒适度等。

借助各个领域承前启后工程、技术、研究人员的付出,对结构振动的控制取得了累累硕果。即使平常意义上的弹簧就包括螺旋、拉伸、压缩、扭力、渐进型以及空气弹簧等种类。而且对于不同的控制对象,设计并提出了专用的减振装置和措施。例如乘用车的悬架就有独立悬架(如麦弗逊式悬架、多连杆、横臂式等)和非独立悬架之分。对于柴油机、电动机等动力设备,往往有橡胶减振器、钢丝绳减振器、聚氨酯减振器、空气弹簧等装置,以及浮筏、桁架等措施。

时代在发展,社会在进步,对结构振动控制的要求也变得更为苛刻。当控制的重心从高频转移到低频,传统的减振措施与装置则变得捉襟见肘。在业界,我们将不借助外界能量且无法随工况变化产生自适应改变的装置称为被动振动控制装置(传统被动装置)。被动控制在中高频具有良好的控制效果,但是在低频由于振动源的波长变得很长,为了吸收、抑制这些振动,装置会变得不仅庞大而且沉重,效率也较低。

相对于被动控制,主动控制通过引入外界能量,系统通常会有测量单元和控制单元,可以输出与振动源相抵消的振动,理论上可以完全消除振动;即使实践中由于被控对象尺寸的限制、存在谐波等因素的影响会降低控制效果,但是由于主动控制具有自适应能力,相比被动控制仍可在低频实现更为理想的减振效果。

主动控制是一项工程技术,虽然不需要深奥、晦涩的理论知识,但是鉴于其涉及被控对象的振动特性分析、控制方式的选择、控制器的设计,以及由于使用场合的限制通常需要设计专用的作动器等,使其成为一项横跨力学、自动化、机械等领域的综合性工程,这要求期望借助主动控制实现减振目的人员不仅需要具备相关专业的理论知识,而且需要一定的动手能力,例如控制系统的搭建和作动器的设计等,这无疑增加了主动控制实现的难度。

本着方便对主动控制感兴趣的工程人员、学生以及研究人员对主动控制的学习,使其更加快速地掌握主动控制所需的相关理论以及主动控制实现的关键要素,作者基于多年的实践创作了此书。

本书涵盖主动控制成功实现所需的各相关理论、概念,例如被控对象建模和控制器设计所需的向量、矩阵运算,有限脉冲响应和无限脉冲响应滤波器的设计,各种常用的自适应

算法以及单自由度、多自由度振动方程的建立等;分别基于梁、平板、圆柱壳这三种典型结构讨论了前馈控制、反馈控制和自适应控制等振动控制方法;且利用遗传算法、模拟退火智能算法讨论了作动器和传感器数量和位置的优化。另外在文中穿插讨论了结构振动控制的现状、热点和未来研究方向。

若本书的出版能引起人们对振动主动控制的兴趣,节省为掌握主动控制所耗费的时间,抑或能提升相关人士的理论水平或实践能力,作者将倍感欣慰。

著 者

2015 年 7 月

目 录

1 引言	1
1.1 基本概念	1
1.2 被动控制	2
1.3 半主动控制	3
1.4 主动控制	4
1.5 本书架构	5
1.6 总结	6
参考文献	7
2 基础知识	10
2.1 线性代数	10
2.2 数字信号处理	17
2.3 状态变量和状态方程	29
2.4 脉冲响应和卷积	31
2.5 总结	32
参考文献	32
3 反馈控制	34
3.1 单通道反馈控制系统	34
3.2 单通道反馈控制系统的稳定性	35
3.3 单自由度系统响应的校正	36
3.4 反馈回路中时滞的影响	38
3.5 状态空间方法	39
3.6 状态反馈	41
3.7 状态估计和观测器	42

3.8	最优控制	44
3.9	模态控制	46
3.10	总结	48
	参考文献	48
4	前馈控制	50
4.1	单通道前馈控制	50
4.2	测量噪声的影响	52
4.3	最优自适应数字滤波器	54
4.4	LMS 算法	59
4.5	RLS 算法	61
4.6	总结	63
	参考文献	63
5	压电作动器和传感器	65
5.1	智能材料	65
5.2	压电材料的本构模型和本构常数	68
5.3	压电材料的磁滞特性	78
5.4	压电作动器和传感器	81
5.5	总结	83
	参考文献	83
6	离散机械系统的振动主动控制	85
6.1	单自由度系统	85
6.2	多自由度系统	96
6.3	惯性吸振器	104
6.4	隔振	108
6.5	总结	110
	参考文献	110
7	梁的振动主动控制	112
7.1	梁的自由运动	112

7.2	梁的强迫运动	117
7.3	基于 LMS 算法的悬臂梁的振动控制	123
7.4	总结	127
	参考文献	127
8	平板的振动主动控制	129
8.1	平板的自由振动	130
8.2	平板的强迫振动	132
8.3	波数域分析方法	134
8.4	平板振动的主动控制	141
8.5	总结	149
	参考文献	149
9	圆柱壳的振动主动控制	151
9.1	圆柱壳的固有频率	154
9.2	圆柱壳方程的求解	157
9.3	基于前馈控制的壳体振动的最优控制	162
9.4	总结	169
	参考文献	170
10	作动器和传感器位置的优化	172
10.1	组合爆炸	173
10.2	性能表面	173
10.3	同位置控制	174
10.4	基于能量的性能函数	179
10.5	遗传算法	183
10.6	模拟退火	188
10.7	应用实例	190
10.8	总结	201
	参考文献	202

1 引言

1.1 基本概念

1.1.1 机械振动的概念及表现形式

振动在工程和生活中均十分常见,例如工作中的钟摆,行进中的列车等。人们可以从各种不同的途径判定某物是否在振动,例如可以触摸、观察到往复的运动;有时振动会产生声,例如声带的振动、吉他弦的振动等。对于工程问题,所关注的是机械振动。机械振动指机械或机械组件的往复运动,任意组件的往复或振荡均会产生振动。

机械振动具有多种不同的形式,既可以行经比较远的距离,也可以迅速或缓慢地传播同时伴随热或声的产生等。一般可以按照指定的形式产生特定的机械振动,例如筛选机械。在其他一些情况下,振动是需要竭力避免的,因为其通常会导致结构的疲劳而造成损坏。例如风扇的震颤、动力设备的振动等。

1.1.2 机械振动产生的原因

机械振动的产生原因主要有以下几种:

1. 重复力

绝大多数的机械振动是由重复力导致的,例如波浪冲击下湖中的小船,只要波浪持续作用,船就会产生摇摆现象。重复力基本上是由于旋转不平衡、不对中、老旧或不合适的激励产生的。含有“重点”的机械组件在运转时会对机械产生重复力。

不平衡通常由安装精度不够、质量分布不均、螺栓尺寸不合适、缺少平衡质量、不平稳的驱动电流、老旧破损的机械叶片等导致。

不对中的机械组件产生“弯曲力矩”,从而在旋转时对机械产生重复力。不对中通常由安装精度不合要求、地面不平、热扩散或紧固部件时产生的扭曲以及与基座不配套等产生。不对中通常包括平行不对中和带有角度的不对中两种。

设备老旧同样会对设备产生重复力,因为在不平磨损设备的表面会产生摩擦。不合适的基座、润滑不足、加工缺陷以及过载等均会使轴承、齿轮和链条等造成磨损。

对机械组件施加不合适的激励会产生间歇性的功率供给同样会对机械产生重复力。这样的例子包括水泵中的水含有空气、不能成功点火的内燃机,以及直流电机中电刷-换向器间的间歇性接触等。

2. 结构松散

若结构的部分组件变得松散,则容许的振动量级会变得不可接受。松散会使旋转和不旋转机械均产生振动。松散通常由于过度的轴承余量、基座安装不牢固、不匹配的部件、磨

损等产生。

3. 共振

正如自由运动的秋千有着本身所特有的摇摆频率一样,所有的机械设备均有由本身特性所决定的固有振荡频率,而且大多数的设备有超过一个的固有振荡频率,通常设备越复杂,所含有的固有振荡频率也就越多。依然以秋千为例,若以与秋千振动方向一致的方向施加力,则会发现秋千越荡越高,这种现象即所谓的共振。共振在任何情况下都应该是竭力避免的。然而,在当今时代,由于对燃油经济性(或其他能源经济性)的要求越来越高、结构轻量化的要求等,使得结构的固有频率向外界激励所处的频率范围迁移,从而更容易产生共振。共振危害的一个显著例子是1940年11月7日Tacoma Narrows大桥的垮塌,这座大桥采用了前所未有的轻量化设计,然而难以预料的是其对大风比较敏感,从而在暂停使用后不久即在外界大风和内部应变力的作用下垮塌了,如图1.1所示。

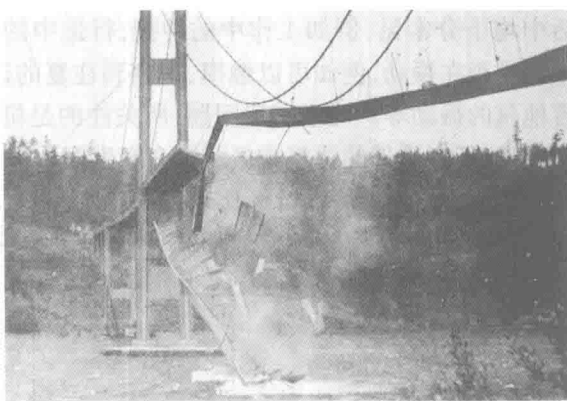


图 1.1 Tacoma Narrows 大桥的垮塌

1.1.3 振动导致的问题

振动通常会造成以下几方面的问题:

- (1)严重的机械损坏,需要浪费大量的金钱、时间用于修理,更严重的需要更换整台设备。
- (2)振动的设备通常会额外消耗大量的能量,这不难理解,设备正常运转需要一部分能量,而振动也需要能量以保持振动状态。
- (3)由于振动导致设备损坏而不能正常工作,在修理完毕或更换后需要时间、金钱调节设备使其正常运转,基于此将延迟投资的收益或错过商机,不能按时完成订单,从而有可能导致违约或合同的取消,原材料或半成品的堆积。另外,振动的设备也不能保证产品的质量等。
- (4)设备的振动通常会伴随热量或噪声的产生,从而损坏工作人员的健康、影响员工心情,最终将影响生产效率和产品质量,严重的则会增加公司在医疗方面的支出。

1.2 被动控制

从源头上降低振动,可以针对振动产生的原因采取不同的措施,例如提高加工精度,确

保安装符合要求,对设备进行监测,及时保养、检修、更换磨损零配件等。

另一方面根据所选择的作动器的类型可以将振动控制分为被动控制、半主动控制以及主动控制。

被动控制从实现方式上可以分为振动吸收和振动隔离。

振动吸收:通过将吸振器的频率调整到与所关注的频率一致,将振动从设备转移到吸振器实现降低设备振动的目的。这方面应用最广的是动力吸振器,其简化模型是一个弹簧-质量系统,通过调节弹簧的刚度或质量块的质量将其固有频率调整为与所关注的被控结构的频率一致,可以降低所控制的结构在此频率上的振动。目前也已出现具有自适应调整功能的动力吸振器:通过传感器检测结构的振动,自动调整固有频率(目前主要是通过调整弹簧的有效刚度)实现自适应吸振的目的,本质上这已经属于半主动控制。

振动隔离分为两个方面:一是防止地面振动传递到设备而干扰精密设备的正常工作;二是防止设备的振动传递到地面,影响其他设备的正常工作,或者对于舰船而言,以声的形式传递出去,降低隐蔽性。根据隔振的原理,隔振器的固有频率越低,隔振效果越好。

目前普遍采用的振动隔离措施有三种:单层隔振、双层隔振以及浮筏隔振。

其中浮筏隔振是目前研究的热点,其与传统的双层隔振装置相比,不但能利用筏体的质量效应,而且能利用其他机械设备的质量效应,从而大大减少隔振装置的总质量。目前已有自适应浮筏的出现。

传统的被动隔振在高频振动抑制上具有良好效果。由于被动隔振具有结构简单、易于维护、不增加能耗、造价低廉等突出优点,因此得到了广泛的应用。但是从被动隔振器的结构分析,相当于一个低通滤波器,只能保证良好的高频抑振效果,在中、低频存在共振峰,而且其特性参数,如刚度、阻尼等不易随着环境和激励的变化而进行调节,另外由于稳定性等方面的要求,尤其不能保证低频段的隔振效果。

1.3 半主动控制

最近几年,对半主动控制方法的研究有增长的趋势。半主动控制可以宽泛地定义为具有使用较低的功率输入实时调节被动设备性质(例如刚度、阻尼等)的控制方法。半主动控制系统本质上是被动的,而且总是稳定的;对于功率供给故障也更加鲁棒。半主动控制主要通过机械机构改变刚度(自适应动力吸振器),或使用可控的新材料改变阻尼等实现。

这部分新材料包括磁/电流变液、剪切增稠液等。其中磁/电流变液在磁场、电场的作用下能产生明显的磁/电流变效应,即在液态和固态之间进行快速可逆的转化,这种转化是在毫秒量级的时间内完成的。在该过程中,磁/电流变液的黏度保持持续,无级变化,整个转化过程极快,且可控,能耗极小。

利用磁/电流变液效应制成的磁/电流变阻尼器,不但阻尼可控,而且响应速度快,能够适应半主动冲击隔离中快速变化阻尼系数的要求。此外还具有体积小、结构简单、阻尼力大、动态范围广、功耗少等特点。

剪切增稠液是一种新型的智能材料,在高速冲击下,其表观黏度发生巨大变化,由液相转变为固相,其最大强度甚至堪与钢板相比;在冲击撤销后,材料又能从固相转变为液相,这种现象被称为剪切增稠效应。该效应只对剪切速率敏感,因此工作时不需要外加电场或磁场。

另外还有对电磁约束阻尼层(EMCLD)和电磁分支电路(EMSD)复合技术的研究,EMCLD 利用黏弹性材料两侧的电磁铁之间的电磁力控制黏弹性材料的变形;EMSD 是在电磁体两端并联分支电路,利用分支电路耗能的振动控制技术。与传统的压电约束阻尼层相比,EMCLD 具有低控制电压、低能耗、大作动力的优点;EMSD 不需要外界能量输入,而且经过良好设计的并联分支电路可以成为储能系统,实现减振和储能的双重效果。

1.4 主动控制

主动控制的思想最早来源于 1936 年 Paul Lueg 的专利。其中的一张阐述性示意图如图 1.2 所示。

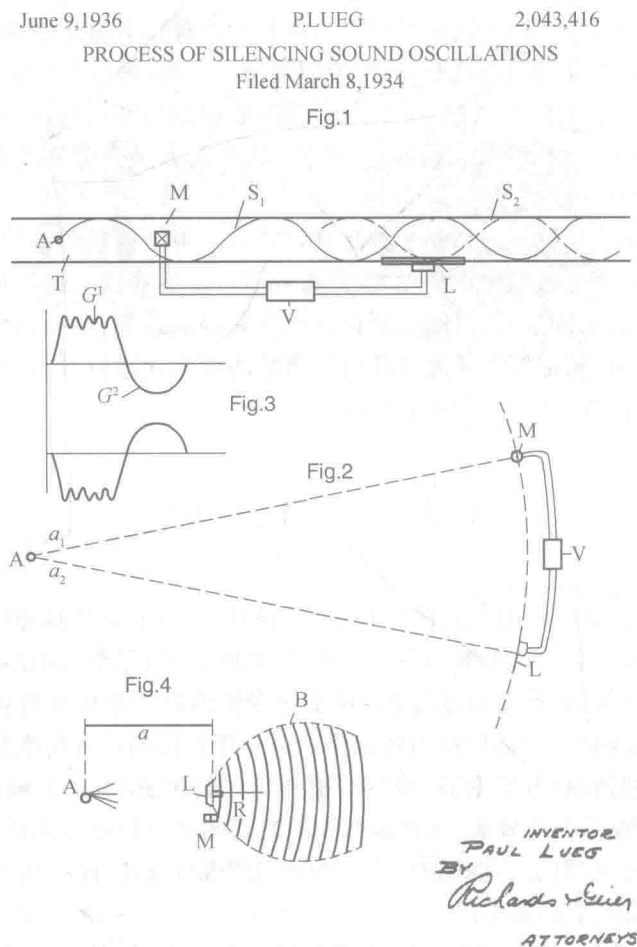


图 1.2 来自早期的 Lueg(1936)主动噪声控制专利的阐述页

在图中初级波源用实线表示,通过拾音器 M 测得波形,并通过电子控制器 V 驱动扩音器,即次级源 L。次级源产生的波形用虚线表示,其被调整为大小与初级源产生的波的振幅

相同而相位相反的波。这两个波破坏性地相遇在一起,则会大幅度降低向下游传播的波。Lueg 同时考虑了更为复杂的波对消情况,“图 3”是更为复杂的向三维空间辐射的情况。

典型的主动控制系统包括三个部分:(1)具有能够产生与待最小化的量成比例信号功能的误差传感器;(2)以最小化误差信号为目标的控制作动器;(3)使用误差信号确定控制信号的系统。

根据传感器和作动器的形式或者控制对象可以将主动控制系统分为:主动振动控制(Active Vibration Control, AVC)、主动噪声控制(Active Noise Control)和主动结构声控制(Active Structural Acoustic Control)。主动振动控制所使用的传感器一般为加速度传感器、速度传感器、位移传感器和转速计,其中加速度计的使用范围最广;作动器则经历了从液压、电动、电磁到压电材料、磁致伸缩、记忆合金等智能材料的演变。主动噪声控制所使用的传感器一般为麦克风、水听器等,作动器则通常为扩音器。主动结构声控制则是希望通过控制结构的振动降低其辐射到外部流体中的声,传感器可以是加速度计、速度传感器等直接测量结构振动特性的设备,也可以是麦克风、水听器等可以间接计算出结构振动特性的仪器;作动器则通常使用主动振动控制中所使用的设备。

根据主动控制的应用领域可知,主动控制是一个涉及多个学科的具有工程特性的实践活动。主动控制系统的成功实现包括前期被控对象的建模,主要用于研究被控对象的运动特性,以便选择合适的控制方式:前馈/反馈、集总参数控制/分布式控制。对被控对象进行建模,则需掌握机械振动的相关知识,若控制目的是降低结构的声辐射,则需进一步掌握声学方面的理论。在此阶段对于复杂结构可以选用有限元软件,如 Abaqus, Nastran, Ansys 等,对被控对象的运动特性进行分析;但是在控制器设计阶段为了验证控制系统的性能,则必须建立被控对象的数学模型,当然可以通过抓大放小、降阶等措施对模型进行简化。目前可采用的控制算法非常多,从传统的 PID 到最优控制、自适应控制,再到智能控制、专家系统等,名目繁多,各自所适用的范围也不同。目前综合考虑数字控制器硬件的处理能力和被控对象的运动特性,最优控制和自适应控制应用范围最广。对于这方面的工作则需要控制和信号处理方面的相关知识。

另外由于主动控制中没有通用的作动器,一般需要根据被控对象和所使用的环境设计合适的作动器。目前鉴于智能材料仍然受输出位移小或输出力小等方面的限制,在对动力设备或管道等场合仍采用电磁式的作动器,而一些轻型结构,如机翼或精密仪器则采用压电陶瓷等智能材料。此外,若由于应用场合的限制,需要设计专门的信号采集和处理设备,则需要掌握电路、电子相关方面的知识。

1.5 本书架构

第 1 章主要讨论振动的起因、危害以及预防和控制措施,其中对三种常用的控制方式,即被动控制、半主动控制和主动控制进行了展开讨论。

第 2 章主要复习主动控制系统的核心部件——数字控制器的设计所需的相关知识,包括谱密度和矩阵、向量的二次方程以及常用的几种测试信号和变换方法等,对这方面知识的汇总一方面使本书具有自我完备性,另一方面方便读者快速进入后面的章节。

第 3 章和第 4 章分别讨论了反馈控制和前馈控制两种控制方式,这两种控制方式具有

各自的优点和缺点。反馈控制可以实现较大范围内被控对象特征的调整,从经典控制中的加速度反馈、速度反馈和位移反馈,到现代控制理论中的状态反馈、输出反馈、最优控制,可以实现极点的任意配置;缺点是在外部干扰的作用下,系统容易发散。前馈控制则具有本质稳定性,但需要知道有关干扰的先验知识,主要用于可以预先掌握被控结构动态特性的结构,例如做旋转或往复运动的设备。

第5章主要讨论主动控制系统中的另外两个重要组成部件——作动器和传感器。由于应用场合的限制,一般没有通用的作动器,从而需要根据被控对象和应用场合设计合适的作动器,例如根据所需的输出力、输出位移和控制频率。本章主要讨论压电作动器和传感器。压电材料是当前广泛研究和使用的智能材料中的一种,由于本身所具有的正、逆两种压电效应,可以同时作为传感器和作动器,非常适用于主动振动控制的同位置控制策略。因此相比磁滞伸缩、电流变液、磁流变液等其他智能材料在主动控制领域获得了更为广泛的应用。本章的内容包括对几种常见智能材料的简单介绍,压电材料的本构关系和本构方程,压电材料的非线性和磁滞特性等。

第6章对集总参数系统振动控制的讨论包括单自由度系统、多自由度系统,以及隔振和吸振的工作原理。其中对单自由度系统和多自由度系统的讨论主要是从控制的角度,这主要是因为是在控制器设计阶段所接触的模型也必须转化为控制领域所使用的形式,例如传递函数或状态空间的形式。

第7章是对梁的振动控制,梁是一种典型的一维结构,在实践中具有广泛的应用,而且许多复杂、巨大的结构在某种程度上也可以视为梁结构。在对其运动方程、固有频率和振型讨论的基础上,利用前面章节所讨论过的LMS算法对其振动进行自适应控制。

第8章讨论平板的振动控制,在对其的讨论中引入目前经常采用的波数域分析方法,简化了分析过程,最后对其振动采用最优控制,分别讨论了基于相同信号和不同信号的控制方法。

第9章进一步将讨论扩展到三维结构——圆柱壳的振动控制,相比梁和平板,圆柱壳的运动方程要复杂得多,圆柱壳的振动控制也是目前研究的热点。

第10章是作动器和传感器的优化。主动控制系统成功实现的一个关键步骤是确定作动器和传感器的安装位置。无论是通过经验或结构特性均不能完全确定全部作动器的安装位置,同时遍历全部组合以期找出最佳组合也浪费时间,多数情况也不具有可行性。因此利用智能优化算法寻优就变得十分重要。本章主要讨论了遗传算法和模拟退火两种算法,并将其分别应用到梁、平板和圆柱壳结构振动控制中作动器的寻优。另外本章还讨论了同位置控制,借助同位置控制可以克服反馈控制在干扰作用下系统不稳定的缺点。

1.6 总 结

本章主要对振动产生的原因、危害以及控制办法进行了讨论。振动的起因有三种:重覆力、结构松散和共振,在源头上降低振动可以提高加工精度、保证安装过程规范等。本书主要讨论振动的控制,重点放在振动产生后的措施。主要有三种控制方式:被动、半主动和主动。被动控制历史悠久,成本低廉,在中高频具有良好的控制效果;半主动控制可以自动改变自身特性,在一定范围内实现自适应控制。主动控制适应范围更广,尤其是在被动和

半主动所不适用的低频控制效果更好。

参考文献

- [1] Commtest Instruments. Beginner's guide to machine vibration[M]. [S.l.]: [s.n.], 1999.
- [2] 陈斌. 浮筏多通道协调振动主动控制实验研究[J]. 实验力学, 2008, 23(3): 248-254.
- [3] 陈斌. 浮筏隔振系统建模及振动主动控制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [4] 李嘉全. 浮筏系统的振动主动控制技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [5] 鲁力. 基于动磁式主动吸振器的振动主动控制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- [6] Qibo Mao, Stanislaw Pietrzko. Control of noise and structural vibration: A Matlab-based approach[M]. [S.l.]: Springer, 2013.
- [7] Elliott S. 主动控制中的信号处理[M]. 翁震平, 译. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [8] 梁青. 基于滤波 $x-LMS$ 算法的磁悬浮隔振器控制研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 201-204.
- [9] 李维嘉, 曹青松. 船舶振动主动控制的研究进展与评述[J]. 中国造船, 2007, 48(2): 68-79.
- [10] 杨铁军. 舰船动力装置振动主动控制技术研究[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(2): 46-53.
- [11] 姚熊亮. 压电类智能结构在船体振动控制方面的应用研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(6): 695-699.
- [12] 姜荣俊, 何琳. 有源振动噪声控制技术在潜艇中的应用研究[J]. 噪声与振动控制, 2004, 2: 1-7.
- [13] 单树军, 何琳. 可控阻尼半主动冲击隔离技术研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(5): 144-147.
- [14] 张磊. 磁致伸缩作动器的设计与性能分析[J]. 海军工程大学学报, 2008, 18(4): 75-79.
- [15] Daley S, Johnson F A. The "smart spring" mounting system: A new active control approach for isolating marine machinery vibration[J]. Elsevier IFAC Publications, 2004, 641-646.
- [16] Niu Junchuan, On active vibration isolation of floating raft system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 285: 391-406.
- [17] 周星德. 框架结构主动控制最优时滞研究[J]. 计算力学学报, 2007, 24(2): 246-249.
- [18] 陈仁文. 飞机座舱结构声的弹性波主动控制研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(5): 489-493.
- [19] Jerzy Wiciak. Active control of vibration and radiated sound of a submerged circular plate [C]. 14th International Congress on Sound Vibration, Cairns, Australia, 2007, 7.
- [20] 牛军川, 宋孔杰. 船载柴油机浮筏隔振系统的主动控制策略研究[J]. 内燃机学报, 2004, 22(3): 252-256.
- [21] 陆轶, 顾仲权. 直升机结构响应主动控制作动器优化设计研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(3): 23-26.

- [22] 郑世杰, 王晓雪. 基于固体壳单元的功能梯度材料板壳主动控制模拟仿真[J]. 航空动力学报, 2006, 21(6): 1075 - 1079.
- [23] 周英. 空气弹簧隔振器主动控制的鲁棒控制方法研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(1): 125 - 129.
- [24] 方同, 薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.
- [25] 王俊芳. 自适应主动隔振的理论和实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [26] Akpan U O. Controller technologies for active control of low frequency noise and vibration in ship structures[J]. Canadian Space Agency, 1999, 101(3): 187 - 196.
- [27] Daley S, Johnson A, Pearson J. Application of selective damping techniques to the control of marine vibration[C]. 11th Eleventh International Congress on Sound and Vibration, St. Petersburg, Russia, 2004.
- [28] Swinbanks M A, Daley S. Advanced submarine technology-project M control theory report [J]. Dtic Selected, 1994.
- [29] Winberg M. Active vibration isolation in ships: A pre-analysis of sound and vibration problems[J]. International Journal of Acoustics and Vibration, 2005, 10(4): 350 - 371.
- [30] Daley S. Active vibration isolation in a "smart spring" mount using a repetitive control approach[J]. Control Engineering Practice, 343 - 349.
- [31] Daley S. Active vibration control for marine applications[J]. Control Engineering Practice, 2004, 12: 465 - 474.
- [32] Leung R C N. Active control of machinery noise in a marine environment-lessons learned [C]. Fifth International Congress on Sound and Vibration, 1997, Adelaide, South Australia.
- [33] Winberg M, Johansson S, Lag T. Active control of engine induced noise in a naval application[C]. The 8th International Congress on Sound and Vibration 2 - 6 July 2001, Hong Kong, China.
- [34] Gentry C A. Smart foam for applications in passive-active noise radiation control [J]. Acoustical Society of America, 1997, 101(4): 1771 - 1778.
- [35] Ying Z G. Semi-active optimal control of linearized systems with multi-degree of freedom and application[J]. Journal of Sound and vibration, 2005, 279: 373 - 388.
- [36] Mailard J P, Fuller C R. Advanced time domain wave-number sensing for structural acoustic systems[J]. Acoustical Society of America, 1995, 98(5): 2613 - 2623.
- [37] Guan Yuan H. Experimental analysis of an active vibration control system for gearboxes[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13: 1230 - 1237.
- [38] Moon S H. Finite element analysis and design of control system with feedback output using piezoelectric sensor/actuator for panel flutter suppression[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42: 1071 - 1078.
- [39] Dean J. Finite-element analysis on cantilever beams coated with magnetostrictive material [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(2): 283 - 288.
- [40] Li Mingfeng. Modeling active vibration control of a geared rotor system[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13: 449 - 558.
- [41] Mottershead J E, Ram Y M. Inverse eigenvalue problems in vibration absorption: passive

modification and active control [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20:5-44.

[42] Ahn S S, Ruzzene M. Optimal design of cylindrical shells for enhanced buckling stability: application to supercavitating underwater vehicles[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42: 967-976.

[43] Christopher E Ruckman. Optimizing actuator locations in active noise control systems using subset selection[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 186(3):395-406.