

黑龙江省精品图书出版工程

基于MATLAB的噪声和振动控制

Control of Noise and Structural Vibration :A Matlab-Based Approach

毛崎波 [瑞士]皮耶奇克 著

吴文伟 翁震平 王飞 译

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

黑龙江省精品图书出版工程

基于 MATLAB 的噪声和 振动控制

毛崎波 [瑞士]皮耶奇克 著
吴文伟 翁震平 王 飞 译

 哈尔滨工程大学出版社

黑版贸审字 08 - 2016 - 037 号

Translation from the English language edition:
Control of Noise and Structural Vibration. A MATLAB® - Based Approach
by Qibo Mao and Stanislaw Pietrzko
Copyright © Springer - Verlag London 2013
Springer - Verlag London is part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved

内 容 简 介

本书以 MATLAB 为平台,讨论了梁和平板的振动和声辐射,智能材料的分布变换器,反馈控制、正位置反馈控制,以及主动控制和半主动控制的具体应用例子,自适应 Helmholtz 共振器和分流压电电路。充分利用 MATLAB 的强大计算和图形显示能力,将抽象复杂的理论具体化,便于读者理解和深入。

本书适合以振动、噪声的主动控制为研究方向或以智能系统开发为目的的研究生、学者和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

基于 MATLAB 的噪声和振动控制/毛崎波,(瑞士)皮耶奇克著;吴文伟,翁震平,王飞译. — 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2016.1

ISBN 978 - 7 - 5661 - 1193 - 7

I. ①基… II. ①毛… ②皮… ③吴… ④翁… ⑤王… III. ①Matlab 软件 - 应用 - 噪声控制 ②Matlab 软件 - 应用 - 振动控制 IV. ①TB53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 318708 号

选题策划 史大伟
责任编辑 薛 力
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 19.5
字 数 508 千字
版 次 2016 年 1 月第 1 版
印 次 2016 年 1 月第 1 次印刷
定 价 60.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

序 言

由于近年来人们对环境问题越来越关注,同时在现代工业领域噪声和振动问题也已在多年以前就成为研究的热点。各种不同的控制策略,比如被动、主动以及主被动的结合,业已在不同的领域被研究和发展起来用以控制噪声和振动。虽然对噪声和振动问题的研究已经持续了许多年,但实际上仍然在许多领域面临严峻挑战,例如在航空、航天领域。因此,研究人员对噪声和振动的控制投入了很大精力。我们写作此书的目的是向读者介绍这个领域的一些最新研究进展。

很多噪声都是由固体和弹性物体的振动引起的,通常称这类噪声为结构噪声。更进一步讲,通常有效的噪声控制可以通过控制产生噪声的机械结构的振动或者直接控制声传递通道中的接触面实现。据此,将噪声控制系统和振动控制系统放在一起进行研究将会有很大的帮助,因为弹性物体的噪声控制与振动控制系统有着非常密切的联系。这是因为,在很多情况下,振动控制系统和结构噪声控制系统具有相同的运动方程,从而在振动控制系统中应用的技术和结论同样也可以应用于结构噪声控制系统。因此,一种有效的方法是同时研究噪声和振动的控制技术。

本书讨论了有关声、振动、振动系统中二者的结合,以及辐射声场的相关知识。所讨论的问题包括主动噪声控制,双平板的主动结构噪声控制,压电模态传感器和作动器的设计,梁和平板结构的反馈系统的设计,自适应(半主动)Helmholtz共振器的设计,以及控制振动、噪声的分流压电阻尼技术。本书的目的是帮助读者了解主动、被动以及半主动噪声和振动控制领域的最新进展。本书可以作为对振动控制系统感兴趣的研究人员、硕士研究生以及工程师的参考用书。数值仿真主要基于MATLAB。附带提供本书讨论的所有例子的程序,以便帮助读者更好地理解相关内容。MATLAB代码在本书附带的二维码中,其中利用MATLABGUI文件可以得到本书所讨论的部分内容的结果,希望读者对其加以充分利用。

虽然已经尽最大的努力去验证这些代码,但是并不能保证不存在错误。读者应该使用MATLAB 7.2或者更高级的版本运行这些代码。本书的内容主要基于作者和其他著名科学家、学者和研究人员的研究成果,在此对他们致以诚挚的谢意。

对本书的任何建议和修正请联系 qibo_mao@yahoo.com(QiboMao)或者 stan.pietrako@bluewin.ch(Stanislaw Pietrzko)。

中国南昌航空大学 毛崎波
瑞 士 Stanislaw Pietrzko

致 谢

本书的所有内容和研究成果均是毛崎波和 Stanislaw Pietrzko 几年友谊和科学合作的结晶。毛崎波受 Stanislaw Pietrzko 的邀请成为其在 Empa 的研究团队中的一员,其团队隶属于瑞士联邦材料科学和技术实验室,并参与了大欧洲研究计划 InMAR(主动噪声控制中的智能材料,2004—2008)。另外,在这段时间,Stanislaw Pietrzko 还参与了 Empa 的另一个研究项目,“自适应材料,2000—2009”。在 InMAR 的项目完成之后,我们继续在振动隔离和多层结构中声传递,尤其是双层玻璃中的传播中的研究合作,这项工作,直持续到 2010 年。

我们借此感谢这段时间支持我们的人们。首先要感谢的是 Empa 的前任领导 Louis Schlapbach 教授,其在 Empa 创造了独一无二的研究环境,而且给予我们持续不断的帮助,在许多场合拯救了我们的小团队,并且帮助我们建立与企业之间的联系。我们同时要感谢 Urs Meier 教授,其是“自适应材料”研究项目的领导,对我们提供了长期的研究和资金支持。我们特别要感谢 Empa 研究机构以及那优美的环境,使得从 2000—2009 年的这段时间内我们对噪声和振动的主动控制以及智能结构的研究得以进行。

Stanislaw Pietrzko 还要感谢 Manfred Morari 教授和来自 ETH Zürich 的 Paolo Ermanni 教授,感谢这么多年来一起富有成效的研究合作,而且共同指导了多名研究生,尤其是 Oliver Kaiser, Dominik Niederberger 和 Alberto Belloli。

毛崎波希望感谢中国国家自然科学基金(No. 51265037),中国江西省技术基金(No. KJLD12075),以及国家教育委员会关于回国的中国学者的科学研究基金和中国江西 Ganpo - 555 人才计划对作者的支持。

Stanislaw Pietrzko 希望对其老师,波兰 Krakow,科学技术大学,结构和振动声学部门,AGH 的 Jozef Giergiel 教授和 Zbigniew Engel 教授表示感谢,他们将其引入奇妙的振动声学领域,同时还要感谢 ETH Zürich 的 Gerhard Schweitzer(Ph. D. 指导教授)教授,其教授 Stanislaw Pietrzko 许多振动控制和机电一体化的先进知识。

同时我们要感谢在“Empa Akustik”(我们进行研究的地方)团队的成员,我们还要感谢 Sang Myeong Kim,感谢其在振动隔离包括演示器和 Thambirajah Suthasun 中的合作和贡献,其 2005 年在 InMAR 与我们一起共事。

我们希望感谢审阅本书并提出宝贵建议的人。我们真挚地感谢 Springer 出版社的编辑和出版人士,包括 Oliver Jackson 博士和 Charlotte Cross 女士。

这本书献给我们的父母和家庭。

瑞士 Stanislaw Pietrzko
中国南昌 毛崎波

译者序

振动噪声的主动控制是减振降噪工作发展到一定阶段的必然选择,是目前的研究热点,也是未来提高仪器的检测精度、延长结构的使用寿命、提升操作或者搭乘人员的舒适性以及降低潜艇等军用平台被发现概率的必需手段。

国外对振动噪声主动控制的研究最早可以追溯到 20 世纪 40 年代,自那时起不仅积累了丰富的理论知识,而且有众多的产品取得了良好的控制效果。作为这个领域后来者的我们应当直面差距,理论与实践相结合,利用“拿来主义”,力争在短时间内弥补差距,并在个别领域有所突破。

一个完整的控制系统包括三个主要部分:控制器、作动器和传感器。译者所在的船舶振动噪声重点实验室 2012 年决定从这三个部分出发,从国外著作中挑选出三本有代表性的进行翻译,以促进国内主动控制事业的发展。

《基于 MATLAB 的噪声和振动控制》是所选择的第三本书,选择的主要原因是其以 MATLAB 这一广泛使用的软件为工具,深入浅出地讨论了主动控制的原理,梁、平板振动和结构声的控制、反馈控制、正反馈控制,以及模态传感器的设计等,化抽象为具体,便于初学者理解,快速入门。

选择的第一本书是《主动控制中的信号处理》,主要内容是控制算法的编写和控制方式的选择,内容涵盖 FIR、IIR 滤波器的设计,LMS 和 RLS 等自适应算法的原理、前馈控制、反馈控制、单通道控制、多通道控制以及非线性系统控制等,内容十分全面,目前已经由国防工业出版社出版。另一本是《基于压电的振动控制:从宏观到微观、纳观系统》,主要内容是压电材料的建模与控制,本书虽早已翻译完毕,但是由于与原出版社联系较晚,版权已被国内同行买走。虽然比较可惜,但是在此仍然建议对压电材料或作动器设计感兴趣的读者可以待其出版后去学习了解一下。

“纸上得来终觉浅,绝知此事要躬行”,谨以此诗与广大读者共勉,若此书的出版能为减振降噪事业的前进有所贡献,译者甚感欣慰。

译者

2015 年 9 月

船舶振动噪声重点实验室

目 录

第1章 引言	1
1.1 机械振动	1
1.2 主动噪声控制(ANC)对比主动结构噪声控制(ASAC)	2
1.3 辐射模态对比体积速度	4
1.4 主动控制系统	5
1.5 分布式控制和集中控制	11
1.6 半主动控制	11
1.7 MATLAB 和 Simulink 的简单介绍	15
1.8 本书的架构	16
参考文献	17
问题	20
第2章 振动和声辐射	21
2.1 梁的结构模态	21
2.2 平板的结构模态	29
2.3 声压、声功率和声辐射效率	37
2.4 声功率和声辐射效率	42
2.5 GUI 设计	56
参考文献	63
问题	63
第3章 噪声和振动控制的入门例子	65
3.1 波动方程	65
3.2 控制下游波的传递	66
3.3 振动结构的主动控制	74
3.4 主动控制 1D 结构(梁)的声辐射	76
3.5 主动控制 2-D 结构(板)的声辐射	79
3.6 使用双平板结构主动控制声传递	83
参考文献	96
问题	97
第4章 使用智能材料的分布变换器	99
4.1 状态空间模型	99
4.2 同位置的传感器和作动器	99

4.3	压电材料	104
4.4	使用整定形状的压电传感器设计模态传感器	107
4.5	体积位移传感器的设计	109
4.6	利用分部积分设计一个总体积位移传感器	111
4.7	使用 PVDF 阵列设计模态传感器	113
4.8	滤波设计	120
4.9	二维模态传感器	124
	参考文献	129
	问题	130
第 5 章	反馈控制	132
5.1	线性二次调节器(LQR)问题	132
5.2	线性二次高斯(LQG)问题	137
5.3	模态控制	142
5.4	稳定准则(输入-输出方法)	144
5.5	内模控制(IMC)	152
5.6	鲁棒控制	153
	参考文献	172
	问题	173
第 6 章	正位置反馈(PPF)控制	175
6.1	PPF 控制器的概念	175
6.2	在管道中使用 PPF 控制器控制声压	180
6.3	正位置反馈控制器和相位补偿设计	191
6.4	非同位置的扬声器、麦克风对	201
6.5	多模态控制	203
6.6	Simulink 和 GUI 共享数据	206
6.7	模拟电路的设计和实验实现	212
6.8	实验结果	213
	参考文献	217
	问题	217
第 7 章	使用自适应 Helmholtz 共振器的半主动控制	219
7.1	Helmholtz 共振器的基本理论	219
7.2	实验验证	220
7.3	使用 HR 控制噪声的先期研究	222
7.4	具有 HR 的双平板结构	229
7.5	含有 HR 的双层玻璃窗的实验结果	240
7.6	自适应 HR	247

7.7 自适应 HR 的实验结果	257
7.8 其他类型的自适应声吸收器(被动扬声器)	260
附录 HR 的高阶自然频率	263
参考文献	264
问题	265
第 8 章 分流压电电路	266
8.1 背景	266
8.2 分流压电	269
8.3 分流压电电路的优化参数	271
8.4 切换分流电路	273
8.5 数值计算	280
8.6 实验和结果	293
参考文献	297
问题	300

第 1 章 引 言

摘要:声学中结构声是一个存在已久的问题。已经从各种不同的领域发展出各种不同形式的噪声控制技术,例如被动、主动或两种控制技术的结合(融合)。在这些技术中,传统的被动噪声控制技术已经广泛应用于工业和商业产品。被动控制技术通常使用吸收材料或者吸振器实现噪声的控制。实践证明其在中高频非常有效;然而在低频,被动噪声控制方案通常会使得设备非常庞大,而且效率很低。例如,吸声材料在低频并不是可行的方法,因为对于波长较长的声波吸声材料的厚度会变得不切实际。类似地,使用阻尼材料衰减低频振动和声辐射时效率也很低,需要既厚且大的黏滞材料,这对于实际应用来说几乎不可能。因此,有效的振动和噪声衰减控制方法在低频为噪声控制工程师提供了一个强有力的工具。

1.1 机械振动

设计承受动态负载的机械系统时,振动分析是其中很重要的一步。振动分析非常复杂,同时又是很多教科书的主要讨论内容^[1-5]。本节的目的是阐述一些必备的基础知识,包括对有限元分析方法的描述。

多自由度线性系统的运动方程是

$$M \frac{d^2 \mathbf{w}}{dt^2} + C \frac{d\mathbf{w}}{dt} + K\mathbf{w} = \mathbf{F} \quad (1-1)$$

其中, M 、 C 和 K 分别表示质量,阻尼和刚度矩阵; \mathbf{w} 和 \mathbf{F} 分别表示位移和外部激励力向量。

自由振动时,多自由度系统的自然频率和振型是特征值问题的解

$$[K - \omega^2 M] \Phi = 0 \quad (1-2)$$

其中, ω 是自然频率; Φ 是结构对应自然频率的振型。

简单结构(例如质量-弹簧系统,均匀欧拉-伯努利梁)的振动问题可以通过解析方法解决。利用解析方法,可以确定各种边界条件下自由振动的封闭形式的解。

例如,考虑图 1-1 中没有阻尼的质量-弹簧系统。根据牛顿-欧拉方法或者拉格朗日方法,可以将这些质量块的运动表示为

$$M \frac{d^2 \mathbf{w}}{dt^2} + K\mathbf{w} = \mathbf{F} \quad (1-3)$$

其中, M 和 K 分别是对角矩阵和对称矩阵

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_1 + k_2 + k_5 + k_6 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

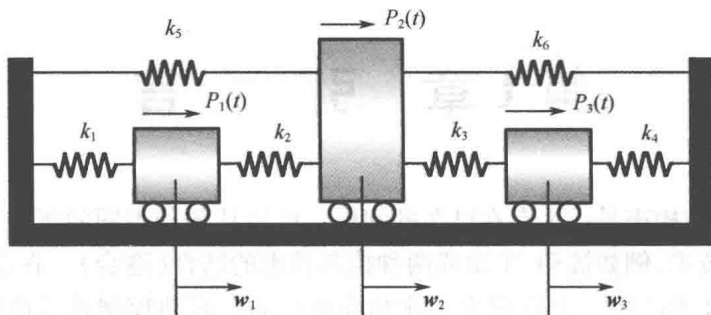


图 1-1 三质量-弹簧系统

向量 w 和 F 的组成如下

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

将方程(1-5)代入到方程(1-2),可以确定自然频率和相应的振型。

然而,若结构的组成非常复杂,则不能够使用解析方法,而必须使用数值方法求解问题。有限元方法(FEM)是另一种可以求解描述结构响应的系统方程的方法。有限元方法是一种可以近似振动机械系统的结构动态特性的数值方法。

其基本思想是将复杂的机械系统分解为具有简单结构的相邻但不重叠单元,即有限元,这即是对连续物体的离散化。可以使用有限的自由度将每个单元的响应表示为未知函数在节点集合上的值。从而,原始的系统响应可以近似为所有单元组合而成的离散模型的响应。最后通过将相关节点的位移设为已知值引入边界条件。

有限元方法的一般步骤可以总结如下:①对系统做合理的假设以简化模型;通过理想化支撑条件或者忽略一定的细节(例如,小洞或者饰线,这些从分析问题的角度来看,并不重要,但是却会在网格的生成中严重复杂化问题)将“实际”问题理想化。②将结构离散为有限的由所谓的“节点”联系的离散单元。③接下来是选择单元的类型;市场上可以使用的商业软件(例如,ANASYS,ABAQUS)可以提供许多不同类型的单元。单元类型选择的不同会产生不同的结果,这主要由单元所基于的理论决定。④将有限元网格中每个单元的方程组合在一起形成对整个系统的特性进行描述的总体方程。⑤最后,施加边界条件。若不施加边界条件则不能获得所需要的解。

1.2 主动噪声控制(ANC)对比主动结构噪声控制(ASAC)

从 20 世纪 90 年代起,随着高速数字信号处理器,以及快速的多通道模数和数模转换器的迅猛发展,主动控制开始成为能够在低频代替被动方法控制噪声的实践方法。主动控制主要基于著名的叠加原理。通常是通过一系列的控制输入在系统中引入新的能量。这些控制输入,即所谓的控制(次级)源,产生一定的响应并与原始干扰场叠加在一起。从而有可能通过适当地调整控制源使总的响应或者是最小化,或者是以一种指定的方式变化。在

主动控制中,这种调整是自适应进行的,即控制输入自适应对本身进行调整以改变干扰场。

Nelson 和 Elliott 对主动控制的发展历史进行了很好地回顾^[1]。另外,Fuller 等^[2], Clark 等^[3], Hansen^[4]以及 Preumont^[5]等最近的著作也对主动控制领域当前所进行的研究进行了总结与归纳。然而需要注意的是,主动控制的实现并没有想象中的那么容易,因为实际的结构-声系统(例如汽车内部的空间)通常会非常复杂。要想从本质上理解并设计出有效的主动控制系统必须很好地理解结构振动和声辐射的机制。更进一步讲,主动控制系统的复杂性、高功率需求、不可靠性以及居高不下的成本均在不同程度上限制了其在实际系统中的应用。

对噪声传递的控制可以分为两大类:主动噪声控制(ANC)和主动结构噪声控制(ASAC)。Lueg^[6]20世纪30年代在其专利中首先提出主动噪声控制的想法。50年代,Olson^[7]首次提出电子吸声器的概念,使用具有同位置配置的麦克风和扬声器系统在麦克风周围产生一个“安静区域”。

主动噪声控制系统通过向原始系统引入可控声源(即扬声器)直接控制声场从而降低内部的声压级。一般来讲,存在两种主动噪声控制方法:声对消和声吸收。主动噪声对消系统基于初级声源和次级声源所产生声场的破坏性干涉,其中可以使用控制器调节次级声源的声场。控制器控制产生一个与原始噪声场幅值相等相位相反的声场,从而两个声场的结合产生一个恒定的声压场,即安静场。控制源所产生声场幅值和相位中的任意偏差均会降低噪声对消的效果。噪声对消系统的一个缺点是,在安静对消区域的外部会使某些区域的振幅得到增强。另一种方法即噪声吸收。这种方法利用各种控制源吸收声场的能量。若没有以合适的振幅驱动控制源,则仅会导致声吸收接近控制源。在 springer.com 上关于本书的网页中有一个视频文件演示了有关声对消和声吸收方法的不同。这段视频由 MATLAB 计算得到,是关于刚性壁管道的声压控制。这个文件的界面如图 1-2 所示。

另一种方法是使用声换能器,通过直接在结构上作用机械输入(例如激振机, PZT 等),而不是使用扬声器产生声场,同样可以降低辐射声压。这种方法即所谓的主动结构噪声控制(ASAC),由 Fuller 等^[8,9]提出。在这种方法中,直接在振动结构(产生声辐射)上使用结构作动器降低振动或者改变振动的分布,从而最小化声压或者是与压力有关的变量。ASAC 主要基于降低结构的振动幅值,以及改变结构的振动分布,从而使结构模态的振动分布在与它们有关的辐射声场中与其他结构模态破坏性地相干。可以证明,与 ANC 方法相比,为实现全局远场噪声的降低,ASAC 一般需要更少的控制输入。

为了成功设计有效的 ASAC 系统,必须理解结构振动和声介质之间相互作用的机理。对于 ASAC,这需要一个精确的流体-结构相互作用的综合模型。结构的声辐射是整个结构表面上平面外速度的函数。众所周知,在低频某些速度分布的辐射声会比其他的一些更为显著。例如,简支矩形板的奇-奇模态要比其他模态^[10,11]的辐射更有效率。从而,一种有效的控制策略是不仅要控制平面外振动的幅值,而且要改变结构模态的振动分布,从而使它们在声传播介质中破坏性地相干。换句话说,改变结构的振动分布更令人期待,可以使结构成为效率很低的声辐射器。分别称这两种方法为“模态抑制”和“模态重构”^[2,4,12]。对于接近系统共振的谐波干扰,结构的响应主要由一个或少数几个模态主导,这与模态密度有关。此时,可以选用模态抑制方法,因为仅需控制几个主导辐射模态的振幅,而其余的模态由于效率很低地与噪声场耦合在一起,从而可以不受控制系统的改变。将 ASAC 应用于反共振情况即可得到模态重构,此时,总的模态响应分布会在振幅和相位上得到改变。

模态重构的作用是降低结构的辐射效率,但同时会增加结构振动的能级。

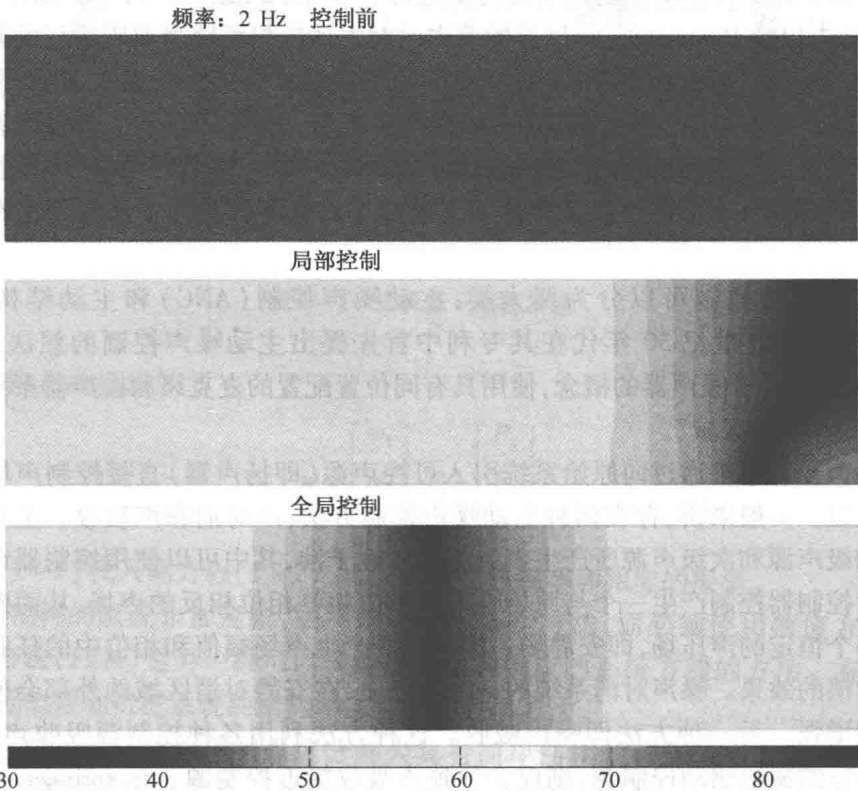


图 1-2 刚性壁管道的声对消(局部控制)和声吸收(全局控制)

1.3 辐射模态对比体积速度

最近,对 ASAC 系统设计有效的控制策略时,“辐射模态”的概念引起了广泛关注。参考文献[13]~[10]表明振动结构的辐射声功率可以表示为辐射模态的线性组合,其中,辐射模态的定义是声远场中独立辐射声功率的表面体积分布。辐射模态是向量空间中彼此相互正交的基向量。每一个基向量表示一个可能的辐射模式。每个辐射模式都具有独立的辐射效率。使用辐射模态刻画结构声的主要优势是可以在结构模态中消除耦合项,而且相比结构模态通常需要模态数,在低频尤其显著。这也使得对结构声辐射的计算以及主动控制都变得更加简单。

在低频,第一个辐射模态主导了大部分的声功率^[15,16]。已经证明第一个辐射模态是活塞类型的,而且是最强的辐射模态。这种模态表示结构的单极子特性,其振幅对应结构的净体积速度^[2,4,15,20]。可以进一步推导出的结论是,第一个模态是结构模态中与容积成分(对应非零净体积速度的结构模态)有关的结构模态的组合。这些容积模态在低频时辐射声的效率很高,因为此时是作为单极辐射器工作的。对应零体积速度的结构模态在低频时辐射效率很低,它们的指向性模式类似偶极子、三极子,或者更高阶的模式。目前,对于低

频结构辐射噪声,体积速度控制已经成为一种很流行的方法。其主要原理是采用声偶极子的观点将高效的辐射器改变为低效的辐射器。偶极子的出现取消了降低结构振动的需求。问题的关键是设计体积速度传感器和作动器,这将在第 4 章进行讨论。

1.4 主动控制系统

典型的主动控制系统包括三个部分:

- (1)能够产生与待最小化的量成比例的信号的误差传感器;
- (2)激励系统以最小化误差信号的控制作动器;
- (3)使用误差信号确定控制信号的系统。

当控制结构的振动(主动振动控制)时,误差传感器和控制作动器通常是结构变换器。控制辐射声压时(主动噪声控制),传感器和作动器通常是声变换器,例如麦克风和扬声器。对于 ASAC 系统,结构作动器用于降低振动结构的声辐射。表 1-1 是几种不同的主动控制系统。

在弹性结构中,使用主动控制系统最小化振动和噪声的应用需求使得对这类系统的控制变得非常具有挑战性。在对弹性结构的控制中,经常会遇到的一种问题是,由于结构的分布特性,整个结构中某点的位移通常会与其他点具有动态的联系。这也表明,若我们希望控制弹性结构的振动,只控制某个点或某几个点是不够的,因为其他点的振动可能会在控制作用后被放大。这也表明需要更加先进的主动控制器才能实现在整个弹性结构上的振动、噪声控制。

表 1-1 不同的主动控制系统

	传感器	作动器	控制器
ANC	麦克风	扬声器	
AVC	结构传感器	结构作动器	反馈和前馈
ASAC	结构传感器/麦克风	结构作动器	

1.4.1 传感器和作动器

主动噪声控制中的一个首要问题是选择合适的作动器和传感器。对 ASAC 系统的研究初期,通常在声远场选择麦克风作为误差传感器^[8]。位于远场的麦克风会得到很好的效果,因为待最小化的量,即结构的声辐射功率直接与远场声压有关。然而,实际应用中这个方案通常不具有实用性,这可以参考汽车的内部或者飞机的机身。为了降低控制系统的规模,当前的研究倾向于采用作动器和传感器均布置在结构上的 ASAC 系统。在过去的 20 年,大量的研究用于开发压电作动器和传感器控制平板结构的振动和声辐射^[21-36]。嵌入或粘贴在结构表面的压电片目前已经成功用作 ASAC 系统中的作动器。这些集成的、分布的作动器克服了传统激振机的许多缺点。与结构结合在一起的误差传感器、作动器同自适应控制器一起形成新颖的“智能结构”,并对本身的干扰具有鲁棒性。图 1-3 是从被动结

构到智能结构的演化。

为了围绕本书的主题,将传感器、作动器分为两类,即智能材料和传统设备。

传统设备包括电动激振机、应变计、加速度计、扬声器和麦克风,见图 1-4。对于这些传统设备本书将不做进一步的讨论。

智能材料,例如压电材料,磁流变液(MR)材料,磁致伸缩材料,以及记忆合金(SMA),是最近几年噪声和振动控制应用领域的研究热点。

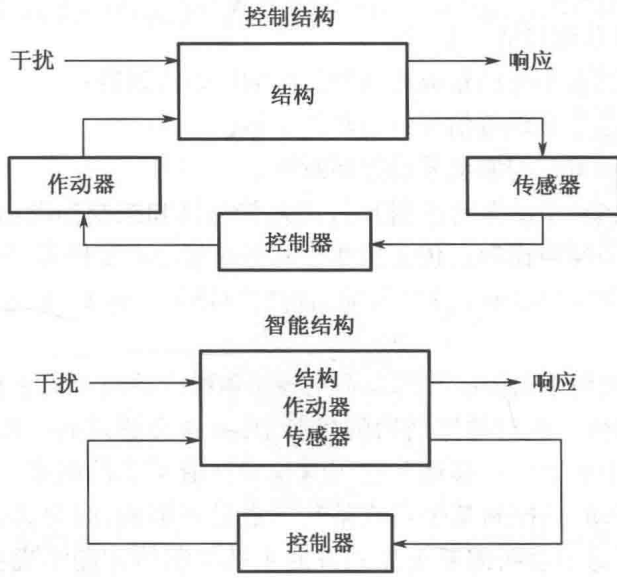


图 1-3 受控和智能结构

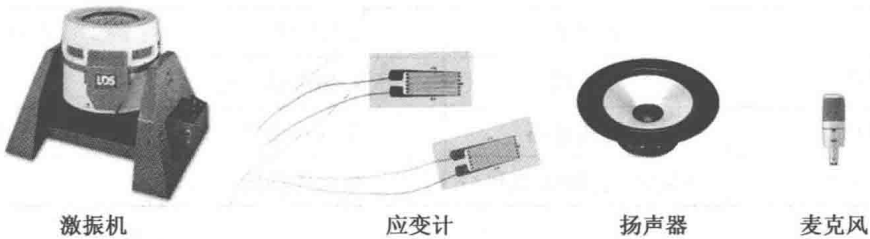


图 1-4 传统的传感器和作动器

本书所讨论的智能材料是压电材料,鉴于其结构紧凑和质量小的优点,在主动结构噪声控制(ASAC)系统中作为作动器和传感器得到了广泛应用,尤其是在轻型结构中的应用更为广泛。一个世纪前 Pierre 和 Jacques Curie^[2]发现压电材料具有将机械能转变为电能,电能转换为机械能的能力。应用最广泛的压电材料具有细的条状结构,可以粘贴在结构的表面或者嵌入在结构中。作动器通常用于在弹性结构中产生力矩,而传感器则用于测量应变。压电作动器同样可以做成堆的形式,从而可以产生很大的力,但却在从底部到顶部的法线方向只具有很小的位移。

对压电材料的建模一直以来就是关注的热点,目前已经做了许多工作。例如,Crawley 和 de Luis^[37]给出了使用压电作动器控制结构振动的详细模型。Hagood 等^[38]提出了一种

结合压电元件和弹性结构影响的一般模型。Dosch 等^[39]解决了使用压电元件同时传感和控制结构的建模问题。

在振动和噪声控制领域存在两大类压电材料:陶瓷和聚合物。最常使用的压电陶瓷是锆钛酸铅(PZT),因为其相对比较容易生产,而且在机械场和电场之间呈现出较强的耦合特性。压电聚合物应用最多的是作为传感器,因为其需要非常高的电压,而且只具有有限的控制能力,其中使用最多的是聚偏二氟乙烯(PVDF)。PZT 相对较脆,而 PVDF 则比较具有弹性,可以很容易地切割成所需要的形状。PVDF 同样具有优异的感知特性,从而广泛用作传感器。图 1-5 是典型的 PZT 和 PVDF 材料。

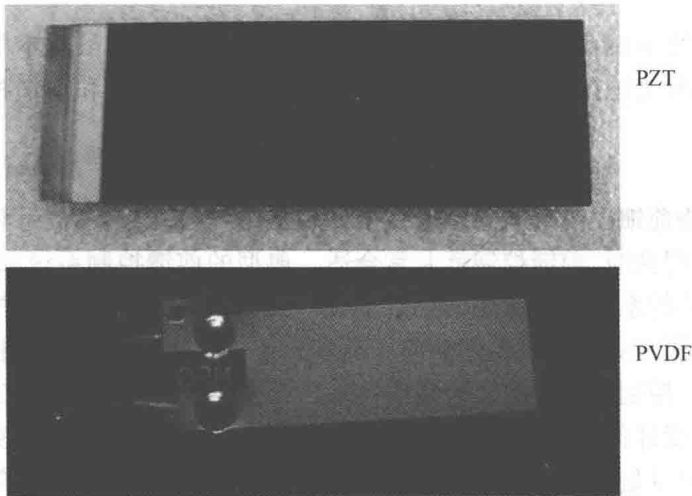


图 1-5 用作传感器和作动器的压电智能材料

PVDF 质量较小,而且可弯曲,从而对系统响应的影响很小。其具有很高的压电电荷常数,而且通过切割薄膜或者蚀刻电极可以塑造成复杂的形状。Lee 和 Moon^[21]首先证明压电薄膜可以通过设计提供与所覆盖的结构平面内的应变的积分成比例的外部信号。他们进一步证明,设计一种基于标准结构模态的正交特性的分布式传感器仅观测梁结构的一个或几个指定模态是可行的。换句话说,通过整定 PVDF 的形状,可以利用空间滤波技术观测结构振动的特定成分,即整定的 PVDF 可以作为模态滤波器。自从那时起,PVDF 材料开始在 ASAC 中广泛用作传感器。对于在 ASAC 中的应用,其测量与远场声辐射有关的运动,同时过滤掉振动的非辐射部分。例如,Guigou^[22]对于一维梁设计了一个整定的 PVDF 传感器,仅测量梁的体积速度,在低频获得了较大的噪声衰减。Snyder 等^[23]对筒支板使用主动噪声辐射控制,使用 PVDF 薄膜观察平板的声辐射。Cazzolato^[24]在封闭围场中使用观察高阶辐射模态的分布式整定 PVDF。

正如前面所提到的,分布式传感器,例如 PVDF 薄膜允许在一定的精度内对特定的平面外体积分布进行选择,而滤掉结构平面外响应的其他成分。这是通过在传感器的表面改变灵敏度实现的。例如,一个整定的均匀 PVDF 薄膜粘贴在结构上,对于其所覆盖的区域呈现出非零灵敏度,而对其他区域则是零灵敏度。由于这样的传感器不仅价格低廉、而且重量轻,同时可以使用简单的电路测量电荷(与应变成比例)或者电流(与应变率成比例),因此这个概念非常吸引人。但是,这种传感器的实现仍然十分困难,尤其是对于二维结构。另

一种替代方案是,基于离散传感器阵列(PZT 或者 PVDF)与模拟或数字滤波阵列的串联选择部分结构振动。此时,在时域实现滤波过程。最近,Prenont 等^[30和31]将独立的压电片与矩形网孔粘在一起,使用自适应线性组合器估计体积速度。参考文献[30,31]中的理论克服了使用整定 PVDF 传感器的困难。Berkhoff^[32]致力于压电阵列传感器的分析和数值计算,得到结构的高阶辐射模态。Mao^[33]使用 PVDF 阵列在实验中测量辐射模态的振幅。模态传感器的单元设计不需要对薄膜空间的连续整定,同时对于每个模态不需要单独布置传感器。

1.4.2 控制器

基本来说,主要有两类控制器:反馈控制器和前馈控制器。虽然本书主要关注反馈控制器,但是阐述两种方法的基本特征,帮助读者明白反馈控制器和前馈控制器的不同还是很有必要的。

前馈

最近几年围绕前馈控制的概念已经做了许多工作^[1,2]。当参考信号和初始(干扰)源有关,而且可以测量得到时,前馈控制就非常合适。典型的前馈控制系统如图 1-6 所示。控制器由初级源导致的系统原始激励的估计驱动。虽然误差信号 $e(t)$ 在控制通道中不直接起作用,但是可以用于更新控制器的响应。基本思想是产生一个次级干扰以在误差传感器处对消原始干扰。控制器通常定义为最小化来自误差传感器的信号的二次方;其中对于结构动态,选择加速度计作为误差传感器,而对于噪声动态,则通常选择麦克风作为误差传感器。前馈控制的优点是:较大的稳定范围,通常可以将误差信号驱动为零,几乎或只需要小部分建模。前馈控制器的主要限制是参考信号是否容易获取与初级源有关。

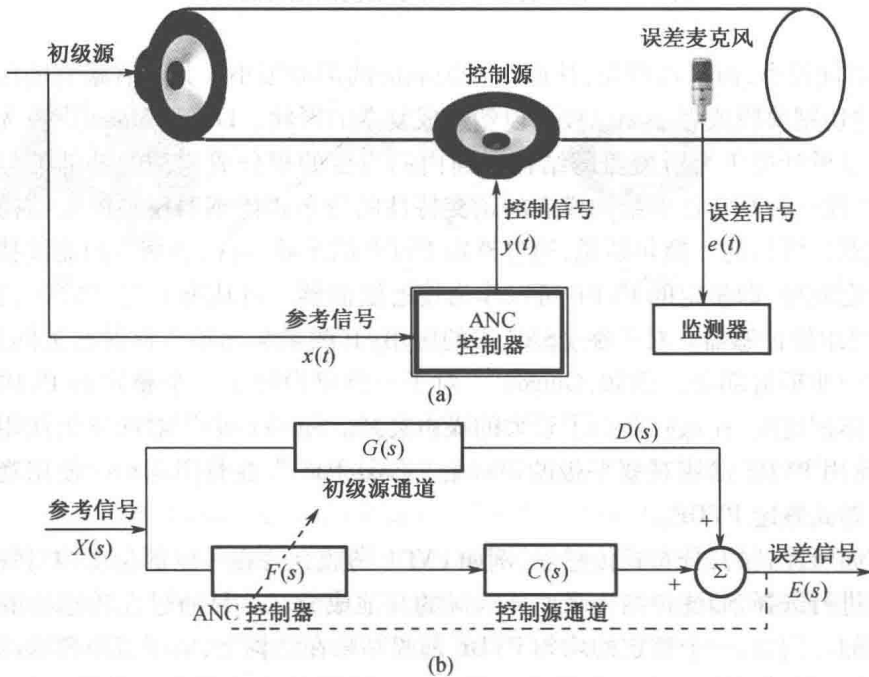


图 1-6 前馈控制系统

(a) 采用前馈控制的主动噪声控制系统;(b) 前馈控制的原理