

[澳] C. H. 汉森 S. D. 斯奈德 著 仪垂杰 等 译

# 噪声和振动的 主动控制

 科学出版社

# 噪声和振动的主动控制

[澳] C.H. 汉森 S.D. 斯奈德 著

仪垂杰 等译

科学出版社

2002

## 内 容 简 介

全书分为15章.第1章概括有关的研究与应用背景.第2章介绍将用到的波动声学、力学和结构声学的基本原理和分析方法.包括频谱分析在内的信号处理和理论与试验模态分析等技术基础内容,分别在第3章和第4章中介绍.第5章是现代反馈控制基础.前馈控制原理和控制系统设计的详细内容在第6章.第7、8和9章讨论管道中、自由场声场和封闭空间声场中噪声主动控制的物理原理和应用实例.类似梁、板结构振动的前馈控制在第10章介绍.第11章讨论了基于结构模态的柔性结构的反馈控制.第12章考虑系统之间隔振的前馈和反馈控制.第13、14和15章介绍如何构造一个实际的主动控制系统,并对控制系统设计中用到的信号处理硬软件、控制作动器和传感器提供极有实用价值的资料.

本书是继1992年Nelson和Elliott的《噪声主动控制》、1996年Fuller的《振动主动控制》之后,关于噪声和振动主动控制最全面的一部著作.本书可作为高等院校有关专业高年级学生、研究生和教师的教材或参考书;也可作为在该领域从事研究和实践的工程技术人员所需要的、具有实用价值的工具书.

图字 01 2001 4995

图书在版编目(CIP)数据

噪声和振动的主动控制/[澳]C.H.汉森 S.D.斯奈德著 仪垂杰等译. —北京:科学出版社,2002.3

ISBN 7-03-010065-4

I. 噪... II. ①汉...②斯...③仪... III. ①噪声控制②振动控制  
IV. TB535

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第0040044号

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>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2002年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2002年3月第一次印刷 印张:58 3/4

印数:1—2 000 字数:1 363 000

定价:95.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 前 言

噪声和振动的主动控制是一个相对新的并且快速发展的研究和应用领域. 在过去的 10 年中, 关于这方面发表的论文数量每年以两倍多的速度递增, 每年都有许多研究者投入到该研究领域里. 由于这一研究领域的快速成长和不断的新发展, 以至于任何一本书都很难囊括其全部内容, 然而, 我们还是试图包括大部的新的理论和应用进展, 同时, 用相当篇幅介绍那些不会与时俱变的基本原理. 我们也用一定的篇幅给出实际中如何设计并实施主动控制系统, 以及为了确保系统的稳定性和可靠性, 如何避免一些纰漏.

即使在本书的后面, 把振动和噪声控制的一些专题分别来处理, 但对于噪声和振动的主动控制, 我们还是用统一方式来介绍. 因为, 噪声和振动两者之间有密切的联系, 如果分为两个学科来分别处理难度会更大. 例如, 对于结构噪声辐射的主动控制, 如果仅考虑声场辐射的主动控制或仅考虑结构振动的主动控制, 那将是不完全的. 所以, 在本书全面涉及噪声和振动主动控制基本概念的第一部分中, 作者试图把声和振动这两部分结合起来表述, 这样便可看出他们之间的关联和共享许多相同的概念.

本书省略的一个有趣的题目是关于专利的讨论, 主动控制方面的专利不仅数量巨大 (已有数百个专利被批准), 而且迅速增加, 所以, 在此类书中对此涉及是困难的. 我们想同读者分享的一点心得是: 尽管一些相关知识在专利申请以前就为人所知, 但一些专利持有者非常乐意就侵权问题起诉. 因此, 任何准备把涉及到与噪声和振动的主动控制有关的产品商业化的公司, 应当准备对付因触犯产品权益而引发的官司, 除非从专利持有者那里得到使用许可. 迄今为止, 虽然律师和法官没有任何这方面的专利, 但他们从主动控制官司中得到的钱似乎比从其他任何工程公司得到的都要多. 相当一些与先前已经被授噪声和振动主动控制某个方面专利权相接近的专利, 也应在考虑之中, 因为这也关系到利益. 在此所做的是阐明一个道理, 这种过多的诉讼将窒息研究, 延缓新产品的开发速度, 而繁荣了诉讼业.

若能避之, 则获益也.

## 致 谢

作者对于 Gill Snyder 和 Myriam Piccinino 在为本书初稿的大量文字整理中, 给予的内行的帮助表示感谢. 第二作者也非常感谢其女——Kristy, 在插图上所做的工作. 作者们的研究生们花费了大量的时间校稿, 并提出了一些建设性的批评意见, 对此感谢他们. 我们对英国的 Mike Brennan 提供的在本书 15 章中用到的有关电流变体作动器方面的信息深表谢意. 感谢阿德蕾德大学给予两个半年的休假, 期间作者用大量时间来完成手稿. 最后, 在本书似乎已经支配了我们生活的最后 4 年里, 作者们的妻子 Sue 和 Gill 以及女儿 Kristy 表现出了极大耐心和支持, 对此作者表示感谢.

## 译者说明

1998年我应本书的作者汉森之邀,前往澳大利亚阿德蕾德大学(The University of Adelaide)机械系,在汉森的研究小组进行学术访问.当时,他的这部著作刚面世,我有幸先睹为快,并在工作中,就书中的有关理论和应用与作者进行了探讨.同时,我们也萌发了把本书介绍给在这个领域中学习、研究和工作的中国读者的愿望.经过近三年的辛勤劳动,在与西安交通大学和清华大学有关老师和同学的共同努力下,本书译稿得以完成.

本书第1、2、3、4、5、6、9、10章的翻译由山东理工大学(原山东工程学院)仪垂杰、夏虹、朱永强和王洪泉完成;第11、12、13、14、15章由西安交通大学黄协清、陈华玲和吴成军翻译;清华大学的郑四发翻译了第7、8章.

仪垂杰、夏虹对全书进行了校订.

感谢以上学校的有关老师和同学为本书文字处理所提供的帮助.

在这里也特别感谢科学出版社科学出版中心的领导和工作人员为本书出版给予的支持和所做出的努力.

由于译者水平所限,译文难免有疏漏和不妥之处,敬请读者提出宝贵意见.

仪垂杰  
2001年9月  
于山东理工大学

# 目 录

<b>1 背景知识</b> .....	(1)
1.1 引言和应用前景 .....	(1)
1.2 主动控制系统概述 .....	(4)
参考文献 .....	(8)
<b>2 声学 and 振动基础</b> .....	(9)
2.1 声波方程 .....	(9)
2.1.1 质量守恒 .....	(9)
2.1.2 欧拉方程 .....	(10)
2.1.3 状态方程 .....	(11)
2.1.4 线性化声波方程 .....	(12)
2.1.5 速度势能 .....	(13)
2.1.6 非均匀介质的波动方程 .....	(14)
2.1.7 一维均匀流体波动方程 .....	(14)
2.1.8 在笛卡儿坐标系、柱坐标系和球坐标系中的波动方程 .....	(15)
2.1.9 声速、波数、频率和周期 .....	(16)
2.1.10 气体、液体和固体里的声速 .....	(17)
2.1.11 多孔介质中的声传播 .....	(18)
2.2 结构力学:基础 .....	(18)
2.2.1 牛顿力学摘要 .....	(18)
2.2.2 分析力学摘要 .....	(20)
2.2.3 影响系数 .....	(28)
2.3 连续系统的振动 .....	(29)
2.3.1 术语和标记规定 .....	(30)
2.3.2 阻尼 .....	(32)
2.3.3 梁中的波 .....	(32)
2.3.4 薄板中的波 .....	(42)
2.3.5 细圆筒体中的波 .....	(52)
2.4 结构声辐射、声传播和格林函数 .....	(66)
2.4.1 声学格林函数:无限大介质 .....	(68)
2.4.2 格林函数的可逆性 .....	(70)
2.4.3 三维有界流体的声学格林函数 .....	(70)

2.4.4	一维无限长管内声源的声学格林函数 .....	(73)
2.4.5	振动表面的格林函数 .....	(76)
2.4.6	格林函数的一般应用 .....	(77)
2.4.7	结构声辐射和波数转换 .....	(79)
2.4.8	流体载荷对结构声辐射的影响 .....	(83)
2.5	阻抗和强度 .....	(84)
2.5.1	声阻抗 .....	(84)
2.5.2	结构输入阻抗 .....	(93)
2.5.3	声强和声功率 .....	(102)
2.5.4	结构强度和功率传递 .....	(110)
2.5.5	通过隔离器传到支承结构的振动功率;从激励源传到结构的振动功率 .....	(132)
	参考文献 .....	(134)
<b>3</b>	<b>频谱分析</b> .....	<b>(138)</b>
3.1	数字滤波器 .....	(138)
3.2	数字傅里叶分析 .....	(140)
3.2.1	功率谱 .....	(143)
3.2.2	不确定性原理 .....	(144)
3.2.3	采样频率及混淆 .....	(144)
3.2.4	加权函数 .....	(144)
3.3	信号类型 .....	(145)
3.3.1	稳态确定性信号 .....	(146)
3.3.2	稳态随机信号 .....	(147)
3.3.3	伪随机信号 .....	(147)
3.4	卷积 .....	(148)
3.4.1	$\delta$ 函数的卷积 .....	(149)
3.4.2	卷积定理 .....	(149)
3.5	重要的频率域函数 .....	(150)
3.5.1	互谱 .....	(150)
3.5.2	相干性 .....	(150)
3.5.3	频率响应(或传递)函数 .....	(151)
3.5.4	相关函数 .....	(151)
	参考文献 .....	(152)
<b>4</b>	<b>模态分析</b> .....	<b>(153)</b>
4.1	模态分析解析 .....	(153)
4.1.1	单自由度系统 .....	(153)
4.1.2	阻尼测量 .....	(155)
4.1.3	多自由度系统 .....	(156)
4.1.4	小结 .....	(164)

---

4.2 模态分析试验 .....	(165)
4.2.1 传递函数法:传统试验模态分析 .....	(166)
4.3 由系统响应测量确定模态振幅 .....	(181)
参考文献 .....	(185)
<b>5 现代控制综述 .....</b>	<b>(187)</b>
5.1 引言 .....	(187)
5.2 系统布置 .....	(188)
5.2.1 系统的一般概述 .....	(188)
5.2.2 数字化实施 .....	(190)
5.3 反馈控制的状态空间系统模型 .....	(191)
5.3.1 状态方程的发展 .....	(192)
5.3.2 状态方程的解 .....	(196)
5.4 反馈控制的离散时间系统模型 .....	(200)
5.4.1 差分方程的推导 .....	(201)
5.4.2 离散时间系统的状态空间方程 .....	(202)
5.4.3 离散传递函数 .....	(203)
5.4.4 在数字滤波器中传递函数的实现 .....	(205)
5.4.5 使用数字滤波器的系统识别 .....	(207)
5.5 极点、零点和系统响应的频域分析 .....	(219)
5.5.1 引言 .....	(219)
5.5.2 示意流程图的使用 .....	(220)
5.5.3 控制增益的协调 .....	(221)
5.5.4 极点和零点 .....	(222)
5.5.5 稳定性 .....	(227)
5.6 可控性和可观性 .....	(228)
5.6.1 引言 .....	(228)
5.6.2 可控性 .....	(229)
5.6.3 可观性 .....	(232)
5.6.4 可控性和可观性关系的简单论述 .....	(233)
5.6.5 Lyapunov 稳定性 .....	(234)
5.7 运用极点配置的设计控制原理 .....	(238)
5.7.1 控制器典型形式的转换 .....	(238)
5.7.2 Ackermann 公式 .....	(241)
5.7.3 关于多输入多输出(MIMO)系统增益的注释 .....	(242)
5.8 最优控制 .....	(242)
5.8.1 引言 .....	(242)
5.8.2 问题公式化 .....	(243)
5.8.3 用 Lyapunov 的第二种方法计算性能指数 .....	(244)



5.8.4	解决二次最优控制问题	(245)
5.8.5	鲁棒性	(246)
5.8.6	频率加权	(248)
5.9	观测仪的设计	(249)
5.9.1	全阶观测仪的设计	(249)
5.9.2	降阶观测仪	(251)
5.10	再论随机过程	(253)
5.10.1	模型和特征	(253)
5.10.2	白噪声	(255)
5.10.3	状态空间模型	(257)
5.11	最佳观测仪:卡尔曼滤波器	(260)
5.11.1	问题公式化	(260)
5.12	合成控制原理或观测器:补偿器的设计	(263)
5.12.1	稳态关系	(263)
5.12.2	鲁棒性	(264)
	参考文献	(266)
<b>6</b>	<b>前馈控制系统设计</b>	<b>(270)</b>
6.1	引言	(270)
6.2	前馈控制的作用	(271)
6.3	具有固定特性的前馈控制系统	(274)
6.4	波形合成	(282)
6.5	非递归 FIR(有限脉冲响应)确定性梯度下降算法	(283)
6.5.1	有限脉冲响应滤波器(FIR 滤波器)	(284)
6.5.2	误差标准的发展	(285)
6.5.3	误差标准特征化	(286)
6.5.4	确定斜率下降算法的发展与特性	(289)
6.6	最小均方算法(LMS)	(294)
6.6.1	最小均方算法的发展	(294)
6.6.2	最小均方算法的实际改善	(296)
6.7	频域内的自适应滤波	(302)
6.8	单通道滤波 $x$ 最小均方算法	(304)
6.8.1	单输入单输出(SISO)滤波 $x$ 最小均方算法的推导	(305)
6.8.2	最佳加权系数和检测误差表面的解决方法	(308)
6.8.3	精确算法的稳定性分析	(313)
6.8.4	连续更新加权系数的影响	(315)
6.8.5	传递函数估计误差的影响:正弦波输入的频域算法	(317)
6.8.6	传递函数估计误差的影响:正弦波输入的时域算法	(320)
6.8.7	等效传递函数表示法	(324)

6.8.8	实现带有其他控制系统的自适应前馈控制系统	(327)
6.9	多输入多输出的滤波 $x$ 最小均方算法	(332)
6.9.1	算法推导	(333)
6.9.2	最佳组加权系数矢量的解法	(335)
6.9.3	单一的最佳加权系数矢量的解法	(337)
6.9.4	多输入多输出滤波 $x$ 最小均方算法的稳定性和收敛性	(338)
6.9.5	传递函数估计误差对算法稳定性的影响	(344)
6.9.6	控制系统的收敛特性	(345)
6.10	抵消路径传递函数的估计	(348)
6.11	用回归滤波器进行自适应信号处理	(352)
6.11.1	使用 IIR 滤波器的原因	(352)
6.11.2	误差公式	(353)
6.11.3	基于算法的梯度表达	(355)
6.11.4	梯度算法的简化	(357)
6.12	主动控制系统中 IIR 滤波器的应用	(359)
6.12.1	基本算法的发展	(359)
6.12.2	通过系统识别进行简化	(363)
6.12.3	SHARF 平滑滤波器的实现	(364)
6.12.4	算法比较	(366)
6.13	用神经网络的自适应滤波	(372)
6.13.1	视感控制器	(373)
6.13.2	反向传播算法	(375)
6.14	基于前馈主动控制系统的神经网络	(380)
6.14.1	算法发展:简化单路径模型	(381)
6.14.2	广义算法	(384)
6.14.3	比较滤波 $x$ 最小均方算法	(388)
6.14.4	举例	(389)
6.15	基因算法的自适应滤波	(391)
6.15.1	算法实施	(392)
6.15.2	实例	(395)
	参考文献	(397)
7	管道噪声的主动控制	(404)
7.1	引言	(404)
7.1.1	主动控制和被动控制	(405)
7.2	控制系统的实现	(406)
7.2.1	反馈控制	(407)
7.2.2	前馈控制	(408)
7.3	简谐(或周期)平面波	(421)

7.3.1	体积速度恒定的初级源 .....	(425)
7.3.2	恒压力的初级源 .....	(429)
7.3.3	位于管壁的初级源 .....	(432)
7.3.4	有限长管 .....	(437)
7.3.5	声学控制机理 .....	(438)
7.3.6	平均流的影响 .....	(442)
7.3.7	多级控制源 .....	(443)
7.3.8	随机噪声 .....	(443)
7.4	高阶模态 .....	(446)
7.4.1	体积速度为常数的初级声源,单控制源 .....	(451)
7.4.2	初级声源压力为常数 .....	(453)
7.4.3	有限长管道 .....	(454)
7.4.4	控制源位置和尺寸的影响 .....	(455)
7.4.5	误差传感器类型和位置的影响 .....	(456)
7.5	管道中的声测量 .....	(460)
7.5.1	管道末端阻抗 .....	(460)
7.5.2	与沿一个方向传播的波有关的声压 .....	(461)
7.5.3	涡流测量 .....	(464)
7.5.4	总功率流的测量 .....	(464)
7.5.5	控制声源功率输出测量 .....	(464)
7.6	从排气管口辐射出的声 .....	(466)
7.7	在充满液体管道中的压力脉动的控制 .....	(469)
7.8	主动耳机与主动听力保护器 .....	(469)
7.8.1	反馈系统 .....	(470)
7.8.2	前馈控制系统 .....	(476)
7.8.3	传感器的考虑 .....	(477)
	参考文献 .....	(477)
8	自由场中声辐射的主动控制 .....	(483)
8.1	引言 .....	(483)
8.2	点声源谐频声压的控制 .....	(484)
8.3	自由场中两个单极声源的最小声功率输出 .....	(488)
8.4	多单极控制源对多单极初级源辐射的主动控制 .....	(498)
8.5	传感器位置的影响 .....	(505)
8.6	参考传感器的位置 .....	(509)
8.6.1	控制问题的公式化 .....	(510)
8.6.2	增益边界 .....	(513)
8.6.3	相位边界 .....	(514)
8.7	平面结构中的谐音辐射的主动控制:一般问题的公式化 .....	(515)

8.7.1	用单极声源来最小化离散位置处的声压	(516)
8.7.2	用单极声源使总辐射声功率最小	(520)
8.7.3	用振动源使离散位置处的声压最小化	(525)
8.7.4	用振动源使总辐射声功率的最小化	(528)
8.8	例子:矩形板声辐射的控制	(530)
8.8.1	离散点声压最小化检测的特殊问题	(530)
8.8.2	最小化辐射声功率	(535)
8.9	变压器噪声控制	(538)
8.10	进一步研究控制机理及所有主动控制系统的共同联系	(540)
8.10.1	一般联系	(540)
8.10.2	控制源理论及相关联系	(545)
8.10.3	机理简介:一个振动源例子	(548)
8.10.4	控制声源和声源的控制	(550)
8.10.5	振动源控制和一般联系	(551)
8.11	最小化声辐射检测振动	(555)
8.11.1	基本原理	(556)
8.11.2	最小化振动与最小化声功率的对比	(557)
8.11.3	例子:矩形板声辐射的最小化	(559)
8.12	关于振动表面声辐射主动控制系统设计理论	(563)
8.12.1	系统设计步骤	(563)
8.12.2	一条捷径:用多路回归的方法确定最佳控制源的振幅和相位	(565)
8.13	自由场随机噪声的主动控制	(567)
8.13.1	分析基础	(567)
8.13.2	误差传感器处的最小声压幅值	(570)
8.13.3	总辐射声功率的最小化	(571)
8.13.4	最小功率输出的计算	(574)
8.14	冲击加速度噪声的主动控制	(575)
8.14.1	获得最佳控制源压力输出时间表方法	(576)
8.14.2	例子:单个正弦脉冲源的控制	(579)
8.15	振动结构声辐射的反馈控制	(583)
8.15.1	结构状态方程的推导	(583)
8.15.2	考虑声辐射的修正问题	(585)
8.15.3	模型转换过程综述	(587)
	参考文献	(589)
9	封闭空间声场的主动控制	(595)
9.1	引言	(595)
9.2	刚性腔体中离散位置处的谐波声场控制	(596)
9.3	刚性腔体内声场的全局控制	(601)

9.4	耦合腔体内离散位置处的声场控制 .....	(609)
9.5	耦合腔体中声势能的最小化 .....	(616)
9.5.1	多重衰减的一条捷径 .....	(620)
9.6	利用边界元法计算最佳控制源体积速度 .....	(622)
9.7	控制机理 .....	(624)
9.7.1	声学控制源机理 .....	(624)
9.7.2	振动控制源机理 .....	(626)
9.7.3	矩形腔体情况的特殊理论问题 .....	(627)
9.7.4	有限长圆柱壳体情况特殊理论的问题 .....	(629)
9.7.5	带底的一般圆柱模型的特殊问题 .....	(631)
9.7.6	机理验证 .....	(632)
9.8	控制源和误差传感器布置的影响 .....	(636)
9.8.1	控制源和误差传感器类型 .....	(636)
9.8.2	控制源布置/数量的影响 .....	(637)
9.8.3	误差传感器位置的影响 .....	(638)
9.9	通过控制振动来控制声传播 .....	(639)
9.10	模态密度的影响 .....	(644)
9.11	高模态密度腔体内一点处的噪声控制 .....	(650)
9.12	声学系统状态空间模型 .....	(656)
9.13	飞机内部噪声 .....	(659)
9.13.1	引言 .....	(659)
9.13.2	分析建模 .....	(660)
9.13.3	控制源和误差传感器 .....	(662)
9.14	汽车内部噪声 .....	(663)
	参考文献 .....	(665)
<b>10</b>	<b>梁和平板振动的前馈控制 .....</b>	<b>(671)</b>
10.1	无限梁 .....	(673)
10.1.1	弯曲波控制:最小化振动 .....	(675)
10.1.2	弯曲波控制:最小化振动功率传递 .....	(678)
10.1.3	同时控制各类波:能量传递 .....	(680)
10.1.4	阻尼影响 .....	(685)
10.2	有限梁 .....	(685)
10.2.1	无限梁的等价边界阻抗 .....	(687)
10.2.2	对点力的响应 .....	(688)
10.2.3	对集中线力矩的响应 .....	(690)
10.2.4	利用点力进行主动振动控制 .....	(690)
10.2.5	使用压电作动器和角钢最小化振动 .....	(696)
10.2.6	梁末端阻抗的确定 .....	(702)

10.2.7	在相反方向上同时测定波传播的振幅 .....	(705)
10.3	半无限板振动的主动控制 .....	(706)
10.3.1	半无限板对在一条直线上同相位点力的响应 .....	(706)
10.3.2	当控制力同相并且在一条直线上时加速度最小化 .....	(709)
10.3.3	当 $n$ 个独立驱动控制力在一条直线上时加速度最小化 .....	(710)
10.3.4	功率传递 .....	(711)
10.3.5	一条线上同相点控制力功率传递最小化 .....	(712)
10.3.6	一条线上 $n$ 个独立驱动点控制的一系列力的功率传递最小化 .....	(714)
10.3.7	数字结果 .....	(716)
	参考文献 .....	(718)
11	基于模态表征的柔性结构反馈控制 .....	(720)
11.1	引言 .....	(720)
11.2	模态控制 .....	(720)
11.2.1	控制方程推导 .....	(721)
11.2.2	建立离散元模型 .....	(723)
11.2.3	转换为状态空间形式 .....	(725)
11.2.4	模型降阶 .....	(726)
11.2.5	模态控制 .....	(727)
11.2.6	溢出 .....	(730)
11.2.7	二阶矩阵方程最优控制增益 .....	(733)
11.2.8	被动阻尼简述 .....	(736)
11.3	独立模态空间控制 .....	(738)
11.3.1	控制律推导 .....	(738)
11.3.2	模态滤波器 .....	(741)
11.4	集中式控制器 .....	(744)
11.5	模型降阶简述 .....	(746)
11.6	传感器与作动器的布置 .....	(748)
11.6.1	作动器布置 .....	(749)
11.6.2	传感器布置 .....	(752)
11.6.3	几点补充说明 .....	(754)
	参考文献 .....	(754)
12	隔振 .....	(759)
12.1	引言 .....	(759)
12.1.1	前馈和反馈控制对比 .....	(762)
12.1.2	柔性和刚性支承结构对比 .....	(762)
12.2	反馈控制 .....	(763)
12.2.1	单自由度被动系统 .....	(763)
12.2.2	单自由度系统反馈控制 .....	(765)

12.2.3	支承运动二阶系统 .....	(768)
12.2.4	动力吸振器 .....	(776)
12.2.5	刚性或柔性支承结构上设备的隔振 .....	(778)
12.3	反馈控制的应用 .....	(789)
12.3.1	车辆悬挂系统 .....	(789)
12.3.2	刚性连接主动隔振 .....	(805)
12.3.3	光学设备隔振 .....	(805)
12.3.4	高层建筑的减振 .....	(806)
12.3.5	柔性结构上设备的主动隔振——发动机支座 .....	(806)
12.3.6	直升机振动控制 .....	(807)
12.4	前馈控制:基本的单自由度系统 .....	(809)
12.4.1	控制力作用于刚性质量块情形 .....	(809)
12.4.2	控制力作用于支承结构情形 .....	(809)
12.4.3	控制力同时作用于刚性质量块和支承结构情形 .....	(810)
12.4.4	小结 .....	(810)
12.5	前馈控制:刚性质量块和弹性梁之间的单一隔振器 .....	(811)
12.5.1	刚性质量块运动方程 .....	(812)
12.5.2	支承梁的运动方程 .....	(813)
12.5.3	系统方程和功率传递 .....	(815)
12.5.4	最优控制力和最小功率传递 .....	(816)
12.6	前馈控制:刚体和弹性板间的多级隔振器 .....	(818)
12.6.1	只有垂直激励力 .....	(818)
12.6.2	广义激励力 .....	(819)
12.6.3	作为中间结构的刚体 .....	(827)
12.7	前馈控制:刚体和弹性圆筒壳体之间的多个隔振器 .....	(828)
12.7.1	刚体运动方程 .....	(829)
12.7.2	支承薄壁圆筒壳体的运动方程 .....	(829)
12.7.3	系统运动方程 .....	(832)
12.7.4	传递到支承圆筒壳体的功率最小化 .....	(833)
12.8	前馈控制:小结 .....	(834)
	参考文献 .....	(835)
<b>13</b>	<b>若干电子实现问题</b> .....	<b>(842)</b>
13.1	模数接口 .....	(843)
13.1.1	采样频率选择 .....	(844)
13.1.2	转换器类型和群延迟 .....	(846)
13.2	微处理器选择 .....	(848)
13.3	软件因素 .....	(849)
	参考文献 .....	(849)

---

<b>14 声源与声传感器</b> .....	(850)
14.1 纸盆式扬声器.....	(850)
14.2 喇叭.....	(853)
14.3 全指向传声器.....	(854)
14.3.1 电容传声器.....	(854)
14.3.2 压电传声器.....	(856)
14.3.3 传声器灵敏度.....	(856)
14.4 指向性传声器.....	(857)
14.4.1 管式传声器.....	(857)
14.4.2 传声器阵.....	(858)
14.4.3 压差传声器.....	(859)
14.5 紊流滤波传感器.....	(860)
14.5.1 探管传声器.....	(860)
14.5.2 传声器阵.....	(863)
14.5.3 双传声器和递归线性最优滤波器的应用.....	(864)
参考文献.....	(864)
<b>15 振动传感器与振源</b> .....	(866)
15.1 加速度计.....	(866)
15.1.1 加速度计的固定.....	(869)
15.1.2 相位响应.....	(870)
15.1.3 温度影响.....	(871)
15.1.4 接地回路.....	(871)
15.1.5 维护.....	(871)
15.2 速度传感器.....	(871)
15.3 位移传感器.....	(873)
15.3.1 非接触探头式传感器.....	(873)
15.3.2 线性可变差动变压器(LVDT)式传感器.....	(873)
15.3.3 线性可变电感传感器.....	(874)
15.4 应变式传感器.....	(875)
15.4.1 电阻应变计.....	(875)
15.4.2 PVDF 膜片.....	(877)
15.4.3 光导纤维.....	(880)
15.5 液压作动器.....	(884)
15.6 气压作动器.....	(884)
15.7 校验质量块作动器.....	(885)
15.8 电动和电磁作动器.....	(885)
15.9 磁致伸缩作动器.....	(886)
15.9.1 磁偏置.....	(887)



15.9.2 机械偏置或预应力 .....	(888)
15.9.3 频率响应,位移和力 .....	(888)
15.9.4 特弗龙作动器的缺点 .....	(888)
15.9.5 特弗龙作动器的优点 .....	(888)
15.10 形状记忆合金作动器 .....	(889)
15.11 压电(电致伸缩)作动器 .....	(890)
15.11.1 薄膜型作动器 .....	(890)
15.11.2 厚型压电作动器 .....	(897)
15.12 机敏结构 .....	(898)
15.12.1 新颖的作动器布局 .....	(899)
15.13 电流变流体 .....	(899)
参考文献 .....	(899)
<b>附录 线性代数基础知识</b> .....	<b>(902)</b>
A1 矩阵和向量 .....	(902)
A2 矩阵加法、减法和与标量相乘 .....	(902)
A3 矩阵乘法 .....	(903)
A4 矩阵的转置 .....	(904)
A5 矩阵行列式 .....	(904)
A6 矩阵的逆 .....	(905)
A7 矩阵的秩 .....	(906)
A8 正定和半正定矩阵 .....	(906)
A9 矩阵特征值和特征矢量 .....	(906)
A10 矩阵正交性 .....	(906)
A11 矢量范数 .....	(907)
参考文献 .....	(907)
<b>英中文名词对照</b> .....	<b>(908)</b>