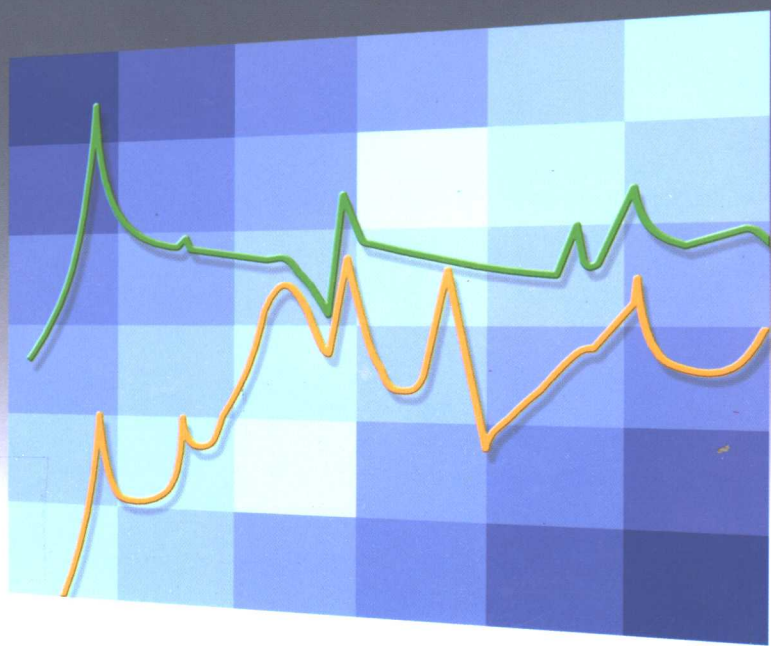


ACTIVE NOISE 有源噪声控制 CONTROL

陈克安 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press <http://www.ndip.cn>

有源噪声控制

ACTIVE NOISE CONTROL

陈克安 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

有源噪声控制/陈克安著. —北京:国防工业出版社,
2003.10

ISBN 7-118-03216-6

I.有... II.陈... III.噪声控制 IV.TB535

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 063335 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 $\frac{1}{4}$ 299 千字

2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于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. 在国防科学技术领域中,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,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部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,原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和武器装备建设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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植
顾问 黄 宁
主任委员 刘成海
副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋
秘 书 长 张又栋
副 秘 书 长 彭华良 蔡 镛
委 员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成
(按姓名笔画排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生
何新贵 佟玉民 宋家树 张立同
张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇
崔尔杰 韩祖南 舒长胜

前 言

传统上,噪声控制技术主要包括吸声、隔声、使用消声器等,一般而言,它们仅对中高频噪声的控制有效。在噪声的低频段,这些技术要么控制效果很差,要么控制频段很窄,且设备体积庞大,不便于安装和维修。因此,低频噪声的控制一直是一项难题。20世纪30年代提出的“有源”控制方法为这一难题的破解带来了希望。20年前,有源噪声控制这一术语,即使对噪声控制界的同行也需要做一番解释,而今天,它已被公认为与传统噪声控制方法相并列的一项新技术,被认为是20世纪最后20年声学界取得的革命性进展之一。回头看,有源噪声控制的作用虽然不像研究初期人们想象的那样随处可用、效果神奇。但是,经过全世界科学家几十年来不懈的努力,确实取得了实实在在的、令人鼓舞的巨大进步。目前,有源噪声控制已经建立了它自己的理论体系和独具特色的研究方法,工程应用的范围正逐步扩大,并正走向成熟。毫不夸张地说,有源噪声控制(还有有源振动控制)已完全有条件作为一个新的学科分支。

1993年,著者本人与马远良教授合作撰写了国内第一本有源噪声控制专著《自适应有源噪声控制——原理、算法及实现》。问世以来,受到读者好评,对促进我国有源噪声控制的研究起到了一定作用。自那以后,有源噪声控制技术在基础理论、实现手段和工程应用诸方面都取得了长足进展。因原书还有不少需要完善的地方,作者深感需要一本更加全面、系统,能够反映有源噪声控制最新进展的专著来反映这一现实。本书即在此背景下撰写的。

本书共分9章,第1章概述了有源噪声控制的发展历程和各个主要研究方向的技术特点,对有源噪声控制技术作了全面的评述。

第2章和第3章给出了研究和应用有源噪声控制技术所必需的声学、结构振动声辐射、自适应滤波和反馈控制等方面的基础知识。作为一个交叉学科方向,有源噪声控制涉及的学科和专业面如此之广,一个专业人员要同时具备所有这些知识是很困难的,因此,这两章的内容完全是必要的。当然,不同专业背景的读者可以各取所需。

有源噪声控制的一个关键问题是如何构建稳定的控制系统,本书第4章主要研究了前馈和反馈有源控制系统,重点研究了自适应有源前馈控制系统所需的自适应算法的原理及硬件实现方法。从第5章到第8章,分别研究了有源噪声控制涉及的主要应用领域,如自由空间噪声有源控制、有界空间噪声有源控制、结构声辐射噪声有源控制、有源隔声、有源吸声、有源声学结构,等等。第9章则将重点转向有源噪声控制技术的工程应用,这是几乎所有人都感兴趣的。本章首先介绍了有源噪声控制技术在应用中应用的概况,然后对目前已趋于成熟、已有部分商业应用的有源噪声控制技术以实例的方式逐一介绍,以期能对有志于高新技术开发的人士有所帮助。当然,由于涉及商业和技术秘密,无法披露进一步的细节,希望读者能够谅解。最后,附录给出了有源噪声控制名词术语的英汉对照表。

本书的内容以作者多年的科研积累为主,同时广泛参考了国内外取得的一些代表性成果,对他们的工作,书中在引用时已做了标注,在此向各位作者表示感谢。在近20年从事有源噪声控制研究的过程中,作者先后得到了国家自然科学基金、国防预研项目、航空科学基金、船舶工业总公司科学基金、陕西省自然科学基金、教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金,以及国家留学基金委员会的资助,没有他们的支持,本人的研究也就无从谈起。

作者要特别感谢我的研究生导师孙进才教授和马远良教授,是他们最初引导本人进入这一研究领域,指导本人完成了硕士和博士学位论文,并在以后10多年的时间里在我的成长道路上给予方方面面的扶持。感谢史新华副教授、刘春跃研究员、侯宏副教

授、杨建华副教授、李海英副教授,他们在有源噪声控制领域出色的工作,以及与他们多次深入讨论对本书的写作提供了直接的帮助和有益的启发。本书的撰写历时三年,期间得到我的夫人尹雪飞女士的鼓励和帮助。在初稿完成之后,孙进才和黄协清两位教授仔细审阅了全书,提出了许多宝贵意见。侯宏副教授、李海英副教授也通读了全书,提出了很好的建议,在此向他们表示深深的谢意。同时,作者还要感谢西北工业大学环境工程研究所和声学工程研究所的各位同事和老师多年来对本人工作的支持。作者非常感谢美国宾夕法尼亚州立大学声学与振动中心主任、资深教授 Gary H. Koopmann 博士和 Weicheng Chen 博士,在美留学期间他们为作者提供了良好的工作环境和学术交流机会。另外,与芬兰国家技术中心(VTT)的 Hannu Nykanen 先生的多次讨论对本人的研究工作亦大有裨益,在此表示感谢。

作 者

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 传统噪声控制的主要方法及特点	1
1.1.1 吸声处理	2
1.1.2 隔声处理	2
1.1.3 使用消声器降低噪声	3
1.2 有源噪声控制技术的发展历程	4
1.2.1 有源噪声控制的提出与早期发展	5
1.2.2 管道噪声有源控制	8
1.2.3 自适应有源噪声控制	9
1.2.4 有源声控制	10
1.2.5 有源力控制	11
1.2.6 有源声学结构	13
1.3 有源噪声控制系统概述	14
1.3.1 有源噪声控制系统	14
1.3.2 决定控制效果的各种因素	15
参考文献	17
第 2 章 声场与结构声辐射	20
2.1 声波方程及声场基本特性	20
2.1.1 线性声波方程	21
2.1.2 平面声波与球面声波	23
2.1.3 声压与声强	24
2.1.4 声波的叠加	26
2.2 有界空间声场	27
2.2.1 管道声场	27

2.2.2	封闭空间声场	30
2.3	结构振动概述	33
2.3.1	质点振动系统	34
2.3.2	一维弹性体的振动	36
2.3.3	薄板的弯曲振动	40
2.4	结构振动声辐射	42
2.4.1	简单声源声辐射	42
2.4.2	平板声辐射	43
2.4.3	几种求解声功率的方法	44
	参考文献	47
第3章	自适应滤波与线性反馈系统	48
3.1	信号与系统基础	48
3.1.1	信号与系统的基本描述	48
3.1.2	信号分析和处理的基本内容	53
3.2	数据采集与信号实时处理	61
3.2.1	信号的采样与转换	61
3.2.2	数字信号处理器及其特点	65
3.3	自适应滤波原理与算法	67
3.3.1	维纳滤波	67
3.3.2	自适应滤波原理	69
3.3.3	LMS 算法	72
3.3.4	LMS 算法性能分析	73
3.4	线性反馈系统	77
3.4.1	根轨迹法	77
3.4.2	从奈奎斯特图判断稳定性	78
3.4.3	幅值裕度与相位裕度	79
	参考文献	81
第4章	自适应有源噪声控制器	82
4.1	自适应有源前馈控制	84
4.1.1	系统模型	84

4.1.2	滤波 - X LMS 算法	86
4.1.3	滤波 - X LMS 算法性能分析	90
4.1.4	次级声反馈的影响及其解决方法	94
4.1.5	次级通路建模	99
4.2	多通道自适应有源前馈控制	107
4.2.1	多通道滤波 - X LMS 算法	107
4.2.2	多通道滤波 - U 算法	112
4.3	其他有源前馈控制结构及算法	114
4.3.1	改进的滤波 - X LMS 算法	114
4.3.2	线谱噪声的自适应有源控制	119
4.3.3	频域自适应有源控制算法	121
4.3.4	RLS 类有源控制算法	124
4.4	有源反馈控制系统	129
4.4.1	系统分析	129
4.4.2	自适应有源反馈控制	131
4.5	自适应有源控制器的实现	133
4.5.1	外围电路	133
4.5.2	数字信号处理器	135
4.5.3	软件设计与调试	137
	参考文献	138
第 5 章	自由空间中的有源噪声控制	142
5.1	有源噪声控制的理论基础	142
5.1.1	惠更斯原理及其在有源噪声控制中的应用	143
5.1.2	振动结构声辐射的集中参数模型	147
5.2	基于单极子声源的自由声场有源控制	149
5.2.1	两单极子的最小辐射声功率	149
5.2.2	基于单极子声源阵的自由声场有源控制	152
5.2.3	单极子声源阵控制平板声辐射	158
5.3	基于多极子声源的自由声场有源控制	162

5.3.1	用多极子声源表示单极子源	163
5.3.2	基于声功率最小化的有源控制	164
5.4	自由声场中的局部有源静区	168
5.4.1	局部有源静区	169
5.4.2	有源声屏障	172
5.5	次级声源和误差传感器的布放设计	173
5.5.1	目标函数的选择	173
5.5.2	次级声源和误差传感器的最优布放	175
	参考文献	182
第 6 章	有界空间中的有源噪声控制	185
6.1	管道噪声的有源控制	186
6.1.1	平面波的有源控制	186
6.1.2	有限长管道中的有源噪声控制	192
6.2	三维封闭空间低频混响声场中的有源噪声控制	196
6.2.1	声势能最小化	196
6.2.2	次级声源和误差传感器布放规律	199
6.3	扩散声场中的有源噪声控制	207
6.3.1	扩散声场中的有源静区	207
6.3.2	衍射扩散声场中的有源静区	211
6.4	误差传感器的优化布放	214
6.4.1	误差传感策略	215
6.4.2	虚拟误差传感	219
6.5	有源噪声控制的物理机制	224
	参考文献	230
第 7 章	结构诱发声有源控制	234
7.1	利用分布式次级声源进行结构振动声辐射有源 控制	235
7.1.1	理论分析	236
7.1.2	次级声源的布放规律	242
7.2	利用力源进行结构振动声辐射有源控制	246

7.2.1	理论分析	246
7.2.2	算例及结果分析	252
7.2.3	物理机制	255
7.3	透射声的有源控制	267
7.3.1	结构-声耦合封闭空间中的声场	267
7.3.2	封闭空间声场的有源控制	275
7.3.3	封闭空间中双层平板声透射的有源控制	277
7.4	有源声吸收	279
7.4.1	一维平面波的有源吸收	280
7.4.2	三维空间斜入射声波的有源吸收	282
	参考文献	287
第8章	有源声学结构	291
8.1	有源声学结构的组成和特点	292
8.1.1	有源结构的基本概念	292
8.1.2	有源声学结构概述	296
8.2	误差传感策略	297
8.2.1	直接法	297
8.2.2	辐射模态法	301
8.2.3	波数变换法	303
8.3	次级源及误差传感器	307
8.3.1	次级源	308
8.3.2	误差传感器	315
8.4	有源声学结构实例	321
	参考文献	325
第9章	有源噪声控制的工程应用	328
9.1	有源噪声控制技术的主要应用方向	328
9.1.1	有源噪声控制在商业中的应用	328
9.1.2	正在发展的有源控制技术	332
9.2	管道噪声有源控制应用实例	334
9.2.1	离心机风扇噪声的有源控制	334

9.2.2 有源消声器应用于车辆排气噪声的有源控制	336
9.3 有源耳机和有源头靠应用实例	338
9.3.1 三种有源耳机的性能比较	338
9.3.2 基于虚拟误差传感的有源头靠	341
9.4 舱室噪声有源控制应用实例	342
9.4.1 螺旋桨飞机舱室有源噪声控制	342
9.4.2 车厢噪声有源控制	345
9.5 讨论	346
参考文献	348
附录 有源噪声控制名词术语英汉对照表	351

CONTENT

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The traditional noise control approaches and its characteristics	1
1.1.1 sound absorption	2
1.1.2 sound insulation	2
1.1.3 the use of muffler	3
1.2 A brief history of active noise control	4
1.2.1 The early history of active noise control	5
1.2.2 Active control of duct noise	8
1.2.3 Adaptive active noise control	9
1.2.4 Active noise control by secondary acoustic sources	10
1.2.5 Active structural acoustic control	11
1.2.6 Active acoustic structure	13
1.3 Remarks on active noise control	14
1.3.1 Configuration for active noise control system	14
1.3.2 Several practical factors for determining sound reduction	15
References	17
Chapter 2 Sound field and structural sound radiation	20
2.1 Wave equation and basic performances of sound field	20
2.1.1 Linear wave equation	21
2.1.2 Plane wave and spherical wave	23
2.1.3 Sound pressure and sound intensity	24

2.1.4	Superposition of sound waves	26
2.2	Sound field in bounded space	27
2.2.1	Sound field in ducts	27
2.2.2	Sound field in enclosure	30
2.3	Basic description of mechanical vibration	33
2.3.1	Vibration of single degree of freedom systems	34
2.3.2	Vibration of beam	36
2.3.3	Flexural vibration of thin plate	40
2.4	Sound radiation from vibrating structures	42
2.4.1	Sound radiation from a point source	42
2.4.2	Sound radiation from plates	43
2.4.3	Approaches for calculating sound power	44
	References	47
Chapter 3 Adaptive filtering and linear feedback control		
	system	48
3.1	Fundamentals of signal and system	48
3.1.1	Basic description of signal and system	48
3.1.2	Signal analysis and processing	53
3.2	Data acquisition and signal real time processing	61
3.2.1	Signal sampling and transform	61
3.2.2	Digital signal processor	65
3.3	Principle of adaptive filtering and its algorithms	67
3.3.1	Wiener filtering	67
3.3.2	Principle of adaptive filtering	69
3.3.3	LMS algorithm	72
3.3.4	Performance analysis of the LMS algorithm	73
3.4	Linear feedback control system	77
3.4.1	Root-locus approach	77
3.4.2	Stability from the Nyquist diagram	78
3.4.3	Amplitude and phase margin	79