



国防科技图书出版基金

有源噪声控制

(第2版)

ACTIVE NOISE CONTROL
(Second Edition)

陈克安◎著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

有源噪声控制

(第2版)

ACTIVE NOISE CONTROL

(Second Edition)

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. —2 版. —北京:国防工业出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-118-09806-8

I. ①有… II. ①陈… III. ①噪声控制 IV. ①TB535

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 248805 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

※

开本 710 × 1000 1/16 印张 22½ 字数 423 千字

2014 年 11 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 76.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717



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 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员 (按姓氏笔画排序)	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

第2版前言

自1933年德国波恩大学助理教授 Leug 博士提出“以声消噪”概念后,有源噪声控制(active noise control)技术经历了80余年持续不断的发展,迄今已构建了完整的基础理论体系,建立了成熟的系统实现方法,展现了成功的工程应用实例,奠定了作为噪声控制技术重要组成部分的地位。在科技论文出版方面,30多年来,每年在国际期刊和会议上均有数以百计的高质量论文发表。在专著出版方面,在国外,1992年,英国南安普顿大学声与振动研究所的 P. A. Nelson 和 S. J. Elliott 撰写了该领域的第一本专著《声的有源控制》;1997年,澳大利亚阿德莱德大学的 C. H. Hansen 撰写了《噪声与振动的有源控制》,这两本专著全面介绍了有源噪声控制的基本原理和系统分析方法。1996年,S. M. Kuo 撰写了《有源噪声控制系统——算法及数字信号处理实现》;2001年,S. J. Elliott 撰写了《有源控制中的信号处理》,这两本专著较为全面地论述了有源控制器设计及实现方面的基本方法和关键技术。在国内,1993年,本书作者与马远良院士合作撰写了重点在于有源控制器设计与实现方面的专著——《自适应有源噪声控制——原理、算法及实现》;2003年,作者撰写了国内第一本全面介绍有源控制技术的专著——《有源噪声控制》。

《有源噪声控制》出版后,2005年被国务院学位办推荐为全国研究生教学用书,此后二次印刷,至今已无正版书销售;此外,10年来有源噪声控制在关键技术、工程应用及前沿拓展等方面又有了重要发展,原书内容已渐渐不能涵盖有源噪声控制技术快速发展涌现出来的新思想与新方法,为此,作者萌发了撰写该书第2版的想法。自2003年以来,作者及课题组完成了包括两项国家自然科学基金、两项国防预研项目在内的近20项科研项目,培养了25位从事有源噪声控制研究的博士和硕士,连续10年开设了研究生必修课“有源噪声与振动控制”,这些工作的积累使得该书的再版成为可能。

与《有源噪声控制》第1版相比,第2版由9章扩展为11章,其改进主要体现在三个方面:

(1)加强了有源控制系统实现方法方面的内容。将第1版中自适应有源噪声控制器的内容分为单通道和多通道系统及其控制器两章,这样大大深化了对有源控制系统结构与算法方面的理解。同时,新增一章详细阐述了与次级通路有关的内容,这是自适应有源控制系统实现的关键,包括不同声环境中的次级通路特性、次级通路建模误差对系统性能的影响,以及不同的次级通路建模方法。

(2)深入阐述了有源声学结构的基本理论、实现方法及物理机理。有源声学

结构是有源控制研究领域的前沿和热点,作者近 10 年来投入了大量精力开展相关研究,在有源声学结构的系统组成、理论分析及物理机理探究方面取得了很好的进展,本书第 10 章详细介绍了这方面的内容,这样使得有源声学结构的体系趋于完整。

(3)全面展示和评述了有源噪声控制技术实际应用的最新进展。最近 10 年来,有源噪声控制技术的工程应用取得了前所未有的进步,因此第 2 版全面改写了第 1 版中关于有源噪声控制技术应用方面的内容,系统论述和评估了有源噪声控制技术在不同领域应用的成熟度及发展前景,同时还给出了有源控制成熟技术(如有源耳罩、螺旋桨飞机舱室有源降噪)的详细论述,这对有志于开发和推广该技术的科技工作者中来说应该是很有帮助的。

此外,第 2 版还增加了与上述内容相关的基础知识和背景材料,如结构声辐射分析方法及构建有源控制器的新方法,同时对第 1 版中的文字叙述作了进一步的凝练。

第 2 版新增内容以作者及课题组多年的科研与教学积累为主,同时也参考了国内外学者的一些典型成果(书中在引用时已做了标注),在此向相关研究者们表示感谢。自本书第 1 版出版后,作者及其课题组持续受到各项科研项目,如国家自然科学基金、国防预研项目、航空科学基金、陕西省自然科学基金以及中航工业、中船重工、国家电网下属单位、陕西烽火电子股份有限公司等多家企业委托的科研项目,对他们提供的资助表示衷心感谢。本人指导的从事有源控制研究的硕士生和博士生为完善本书内容做出了重要贡献,他们是:李双、王进军、胡莹、马玺越、丁少虎、玉昊昕、孙华强、钟维彬、董淑斌、潘浩然、逯还通、孙进辉、王健、赵树磊、孙利峰、柳琦、王岩、杨志荣、梅涛、陆晶、唐勇军、庞彦宾、郝夏影、胡涵、陈珏、代海、王军、刘杨,在此表示诚挚谢意。此外,十分感谢 10 年来选修“有源噪声与振动控制”课程的同学为本书的改进提供了大量宝贵意见。

作者

2014 年 8 月于西安

第 1 版前言

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,作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一定作用。自那以后,有源噪声控制在基础理论、实现手段和工程应用诸方面都取得了长足进展,加之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。

全书共分9章,第1章概述了有源噪声控制的发展历程和各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 噪声控制的传统方法及主要特点	1
1.1.1 吸声处理	1
1.1.2 隔声处理	2
1.1.3 使用消声器	3
1.2 有源噪声控制技术及其发展历程	3
1.2.1 概念的提出与早期发展	3
1.2.2 管道噪声有源控制	6
1.2.3 自适应有源噪声控制	7
1.2.4 有源声控制	8
1.2.5 有源力控制	8
1.2.6 有源声学结构	9
1.3 有源噪声控制系统概述	11
1.3.1 有源噪声控制系统	11
1.3.2 系统设计、实现及工程化	13
1.4 本书架构	13
参考文献	14
第2章 声场与结构振动声辐射	16
2.1 声波方程与声场基本特性	16
2.1.1 线性声波方程	16
2.1.2 平面声波与球面声波	18
2.1.3 声压与声强	19
2.1.4 声波的叠加	20
2.2 有界空间声场	21
2.2.1 管道声场	21
2.2.2 封闭空间声场	23
2.3 结构振动概述	26
2.3.1 质点振动系统	26
2.3.2 一维弹性体的振动	27

2.3.3	薄板的弯曲振动	31
2.4	结构振动声辐射	31
2.4.1	简单声源声辐射	32
2.4.2	平板振动结构的声辐射	33
2.4.3	几种求解声功率的方法	33
2.4.4	结构振动模态和声辐射模态	35
	参考文献	39
第3章	自适应滤波与控制系统设计	40
3.1	信号与系统基础	40
3.1.1	信号与系统的基本描述	40
3.1.2	信号分析和处理的基本内容	43
3.2	数据采集与信号实时处理	48
3.2.1	信号的采样与转换	48
3.2.2	数字信号处理器	51
3.3	自适应滤波原理与算法	52
3.3.1	维纳滤波	53
3.3.2	自适应滤波	54
3.3.3	LMS 算法	56
3.3.4	LMS 算法性能分析	56
3.4	控制理论与系统设计	59
3.4.1	控制理论概述	59
3.4.2	线性反馈系统	61
3.4.3	鲁棒控制系统设计	63
	参考文献	65
第4章	单通道有源控制器结构与算法	67
4.1	有源控制器结构与算法	67
4.1.1	有源控制器的类别	67
4.1.2	自适应有源控制器	69
4.2	前馈系统与 FxLMS 算法	70
4.2.1	系统模型	71
4.2.2	FxLMS 算法推导	72
4.2.3	FxLMS 算法性能分析	75
4.3	改进的有源控制器结构与算法	77
4.3.1	概述	77

4.3.2	改进的 FxLMS 算法	79
4.3.3	FxRLS 算法	82
4.3.4	频域自适应有源控制算法	84
4.4	针对特定问题的有源控制器	86
4.4.1	概述	86
4.4.2	线谱噪声有源控制	89
4.4.3	次级声反馈	91
4.4.4	有源反馈控制	95
4.5	基于现代控制理论的系统设计	97
4.5.1	管道噪声前馈控制系统模型	97
4.5.2	标称控制器设计	98
4.5.3	鲁棒前馈控制器设计	100
	参考文献	102
第 5 章	次级通路特性与自适应建模	107
5.1	次级通路特性	107
5.1.1	电信号通路	107
5.1.2	自由声场中的声通路	108
5.1.3	驻波声场中的声通路	110
5.1.4	扩散声场中的声通路	114
5.2	次级通路建模及其影响	115
5.2.1	建模滤波器与建模误差	115
5.2.2	建模滤波器参数选取	118
5.2.3	建模失配的影响	120
5.3	次级通路建模方法	122
5.3.1	离线建模	123
5.3.2	在线建模	124
	参考文献	127
第 6 章	多通道系统与有源控制器	129
6.1	多通道系统及其实现	129
6.1.1	系统特性与实现	129
6.1.2	多通道算法概述	131
6.2	多通道 FxLMS 算法	132
6.2.1	算法推导	132
6.2.2	运算量统计及性能分析	134

6.2.3	多通道滤波-u 算法	136
6.3	多通道算法的快速实现	137
6.3.1	权系数快速迭代算法	138
6.3.2	多通道局部迭代算法	141
6.3.3	组合逆算法	142
6.4	自由场分散式有源控制	146
6.4.1	系统的基本形式	146
6.4.2	系统性能	147
6.4.3	系统稳定性	148
6.5	自适应有源控制器	148
6.5.1	概述	148
6.5.2	数字信号处理器	151
	参考文献	153
第7章	自由空间中的有源噪声控制	156
7.1	有源噪声控制的声学基础	156
7.1.1	惠更斯原理及在有源噪声控制中的应用	156
7.1.2	振动结构声辐射的集中参数模型	159
7.2	基于单极子声源的有源控制	161
7.2.1	两单极子的最小辐射声功率	161
7.2.2	基于单极子声源阵的自由声场有源控制	163
7.2.3	单极子声源阵控制平板声辐射	167
7.3	基于多极子声源的有源控制	170
7.3.1	用多极子源表示单极子源	170
7.3.2	基于声功率最小化的有源控制	171
7.4	自由声场中的局部有源静区	173
7.4.1	局部有源静区	174
7.4.2	有源声屏障	176
7.5	次级声源和误差传感器的布放	177
7.5.1	目标函数的选择	177
7.5.2	次级声源和误差传感器的最优布放	178
	参考文献	182
第8章	有界空间中的有源噪声控制	185
8.1	管道噪声的有源控制	186
8.1.1	平面波的有源控制	186

8.1.2	有限长管道中的有源噪声控制	189
8.2	三维驻波声场中的有源控制	192
8.2.1	声势能最小化	192
8.2.2	次级声源和误差传感器布放规律	194
8.3	扩散声场中的有源噪声控制	199
8.3.1	自由扩散声场中的有源静区	200
8.3.2	衍射扩散声场中的有源静区	202
8.4	虚拟误差传感	205
8.4.1	误差传感策略	205
8.4.2	局部空间中的虚拟误差传感	209
8.5	有源噪声控制的物理机制	211
	参考文献	215
第9章	结构声辐射有源控制	218
9.1	基于力源的结构声辐射有源控制	218
9.1.1	理论分析	218
9.1.2	次级力源的影响	222
9.1.3	物理机制	224
9.2	封闭空间中透射声的有源控制	228
9.2.1	结构-声耦合封闭空间中的声场	228
9.2.2	封闭空间声场有源控制	233
9.2.3	封闭空间中双层平板声透射的有源控制	235
9.3	有源声吸收	237
9.3.1	一维平面波的有源吸收	237
9.3.2	三维空间斜入射声波的有源吸收	238
	参考文献	242
第10章	有源声学结构	245
10.1	有源声学结构及组成	245
10.1.1	有源声学结构概述	245
10.1.2	误差传感策略	247
10.2	次级源与误差传感器	252
10.2.1	次级源	252
10.2.2	误差传感器	258
10.3	基于分布式声源的有源隔声结构	262
10.3.1	基本理论	263

10.3.2	次级声源的布放	266
10.3.3	误差信号的获取	267
10.4	双层有源隔声结构	271
10.4.1	系统建模与分析	271
10.4.2	有源隔声机理	275
	参考文献	280
第 11 章	有源噪声控制技术的实际应用	283
11.1	发展历程与现状	283
11.1.1	有源噪声控制技术的开发与应用	283
11.1.2	需要解决的问题	288
11.2	有源噪声控制技术的应用	292
11.2.1	有源耳机	292
11.2.2	飞行器舱内噪声有源控制	296
11.2.3	汽车车内噪声有源控制	308
11.3	开发中的有源控制技术	314
11.3.1	自由空间与管道噪声有源控制	314
11.3.2	三维封闭空间噪声有源控制	322
11.3.3	声学边界的有源控制	326
11.3.4	有源控制技术的扩展应用	329
	参考文献	331

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The traditional noise control approaches and its characteristics	1
1.1.1 Sound absorption	1
1.1.2 Sound insulation	2
1.1.3 The use of muffler	3
1.2 A brief history of active noise control	3
1.2.1 The early history of active noise control	3
1.2.2 Active control of duct noise	6
1.2.3 Adaptive active noise control	7
1.2.4 Active noise control by using secondary acoustic sources	8
1.2.5 Active structural acoustic control	8
1.2.6 Active acoustic structure	9
1.3 An introduction to active noise control	11
1.3.1 Active noise control system	11
1.3.2 Design, implementation, and its practical applications	13
1.4 Organization and a brief introduction to this book	13
References	14
Chapter 2 Sound field and structural sound radiation	16
2.1 Wave equation and basic performances of sound field	16
2.1.1 Linear wave equation	16
2.1.2 Plane wave and spherical wave	18
2.1.3 Sound pressure and sound intensity	19
2.1.4 Superposition of sound waves	20
2.2 Sound field in bounded spaces	21
2.2.1 Sound field in ducts	21
2.2.2 Sound field in enclosure	23
2.3 Basic description of structural vibration	26
2.3.1 Vibration of a particle system	26