

周亚丽 张奇志 著

有源噪声与振动控制

——原理、算法及实现

清华大学出版社

周亚丽 张奇志 著

有源噪声与振动控制

——原理、算法及实现

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以管道噪声为对象和背景,重点介绍有源噪声控制算法。全书共分8章,第1章介绍了有源噪声控制的基本原理及发展历程。第2章概述了经典的有源噪声控制算法。第3章及第4章研究了针对重复性和周期性噪声的迭代学习控制及重复控制算法。第5章给出了随机性脉冲噪声的有源控制算法。第6章介绍了时变系统的有源噪声控制算法。第7章介绍了基于神经网络的非线性系统的有源噪声控制算法。第8章以管道噪声为被控对象,对第3~7章所介绍的各种算法进行了仿真及实验分析,给出了仿真及实验结果。

本书可供从事噪声与振动控制、信号处理及相关研究和开发的教师、研究生及工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

有源噪声与振动控制:原理、算法及实现/周亚丽,张奇志著. —北京:清华大学出版社,2014
ISBN 978-7-302-36336-1

I. ①有… II. ①周… ②张… III. ①噪声控制 IV. ①TB535

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第084733号

责任编辑:刘颖 汪操

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:宋林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

社总机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795764

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:8.75

版 次:2014年6月第1版

印 数:1~1000

定 价:38.00元

邮 编:100084

邮 购:010-62786544



字 数:191千字

印 次:2014年6月第1次印刷

前 言

有源噪声控制(Active Noise Control, ANC)是近年来得到广泛关注的研究领域。其基本原理是基于声波的相消干涉原理,通过引入可控的次级声源,并控制次级声源使其输出和来自主噪声源的噪声发生干涉,进而达到降低噪声水平的目的。有源噪声控制的出现是为了弥补无源控制方法的不足,传统无源噪声控制方法采用吸声和隔声等手段,对中高频噪声比较有效,而对低频噪声的控制需要庞大的装置,一般难以实现。于是有源噪声控制技术应运而生。从理论上说,有源噪声控制在低频范围内可以达到很高的降噪量,同时可以使整个系统体积很小,便于设计和控制,具有很大的优越性。

20世纪80年代初,随着数字信号处理理论和技术的逐步成熟,基于自适应滤波理论的有源噪声控制技术开始起步并迅速发展。尤其是1981年Morgan等人提出了获得广泛应用的FXLMS算法,有效解决了由于次路径所引起的系统不稳定问题,开创了自适应有源噪声控制的先河。至此,有源噪声控制的研究正式进入了蓬勃发展时期。目前国内外有多家科研机构从事这方面的研究工作,其中有源消声耳机、空调管道有源消声和振动的有源隔离等技术已经在工程中得到应用。

本书以管道噪声为对象和背景,重点介绍有源噪声控制算法。本书共分8章,第1章介绍了有源噪声控制的基本原理及发展历程,概述了有源噪声控制系统的基本结构,并对管道声场的基本特性进行了简要分析。第2章概述了经典的有源噪声控制算法。内容包括自适应滤波器的基本结构、次路径建模方法、经典的FXLMS算法以及各种改进的FXLMS算法。第3章研究了重复性噪声的有源控制算法——迭代学习控制算法。根据系统的渐近稳定及单调收敛条件,推导出适用于非最小相位ANC系统的迭代学习滤波器设计算法——基于约束优化的非因果稳定逆求解算法。第4章研究了周期性噪声的有源控制算法——重复控制算法。首先分析了基于重复控制算法的ANC系统的稳定条件,并根据稳定条件,设计了重复控制算法的非因果学习滤波器。第5章给出了随机性脉冲噪声的有源控制算法,脉冲噪声控制是目前有源噪声控制领域的一个研究热点。本章首先介绍了脉冲噪声的特性及建模方法,详细分析了现有的随机性脉冲噪声的有源控制算法。在此基础上,提出了通用步长归一化算法,进一步简化了算法的设计及实现流程。第6章介绍了时变系统的有源噪声控制算法。主要包括次路径在线辨识算法、基于SPSA的无模型算法及基于FFT的无模

型迭代学习控制算法,以适应 ANC 系统次路径时变的情况。第 7 章介绍了基于神经网络的非线性系统的有源噪声控制算法,其中包括参考及误差信号滤波的 BP 神经网络算法、函数链接型神经网络算法及自适应递归模糊神经网络算法。第 8 章以管道噪声为被控对象,对第 3~7 章所介绍的各种算法进行了仿真及实验分析,给出了仿真及实验结果。

本书的内容以作者在该领域 10 余年的科研积累为主,同时广泛参考了国内外同行的研究成果。书中引用时已做了相应标注,在此向各位作者表示感谢。作者 10 余年的研究工作先后得到了北京市教委科技发展计划项目、北京市教委骨干教师项目和北京市优秀人才项目等的持续支持。本书的出版得到了北京市属高等学校人才强教深化计划——模式识别与智能系统学术创新团队项目(PHR201106131)的经费资助,在此一并表示感谢。

本书由北京信息科技大学周亚丽和张奇志著写。虽然作者进行了反复修改,但因为水平限制,存在错误在所难免。欢迎读者批评指正。

作 者

2014 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 噪声的危害	1
1.2 噪声的无源控制方法	2
1.2.1 吸声降噪.....	2
1.2.2 隔声降噪.....	3
1.2.3 消声器降噪.....	3
1.3 噪声的有源控制方法	4
1.3.1 有源噪声控制的基本原理.....	4
1.3.2 有源噪声控制的发展历程.....	5
1.4 有源噪声控制系统的基本结构	7
1.4.1 前馈控制.....	7
1.4.2 反馈控制.....	8
1.5 管道声场的特性分析	9
1.5.1 平面波截止频率.....	9
1.5.2 平面波相消干涉原理	10
1.6 有源噪声控制技术的应用.....	11
第 2 章 经典的有源噪声控制算法	12
2.1 自适应滤波器.....	12
2.1.1 有限脉冲响应(FIR)滤波器	12
2.1.2 无限脉冲响应(IIR)滤波器.....	13
2.2 最小均方(LMS)算法	14
2.3 次路径的建模.....	16
2.4 滤波-X LMS(FXLMS)算法.....	17
2.5 带遗忘因子的 FXLMS 算法.....	19

2.6	考虑声反馈的 FXLMS 算法	19
2.6.1	FBFXLMS 算法	19
2.6.2	次级声反馈路径建模	21
2.7	滤波-U 递归 LMS(FURLMS)算法	21
2.8	自适应陷波滤波算法	23
2.9	基于内模的反馈控制算法	26
2.10	频域 FXLMS 算法	26
第 3 章	重复性噪声的有源控制	28
3.1	重复性噪声的特点	28
3.2	迭代学习控制(ILC)算法	29
3.2.1	ILC 算法描述	29
3.2.2	ILC 算法的收敛条件	30
3.2.3	ILC 算法的终值误差	30
3.3	基于 ILC 的有源噪声控制算法	31
3.3.1	基于 ILC 算法的 ANC 系统	31
3.3.2	ILC 学习滤波器的设计	33
第 4 章	周期性噪声的有源控制	37
4.1	重复控制(RC)算法	37
4.1.1	内模原理	37
4.1.2	RC 算法描述	38
4.2	基于 RC 的有源噪声控制算法	39
4.2.1	基于 RC 的有源噪声控制系统	39
4.2.2	系统稳定性分析	40
4.2.3	RC 学习滤波器的设计	41
第 5 章	随机性脉冲噪声的有源控制	45
5.1	脉冲噪声简介	45
5.1.1	脉冲噪声的特性	45
5.1.2	脉冲噪声的建模	45
5.2	随机性脉冲噪声的生成	50
5.2.1	Chambers-Mallows-Stuck 方法	50
5.2.2	Gauss-Bernoulli 方法	51

5.3	随机性脉冲噪声的有源控制算法	52
5.3.1	概述	52
5.3.2	分数低阶矩(FXLMP)算法	53
5.3.3	权值约束(CFXLMS)算法	56
5.3.4	幅值约束(MRFXLMS)算法	57
5.3.5	改进归一化(MNFXLMS)算法	59
5.3.6	对数变换(FXlogLMS)算法	60
5.3.7	非线性 M-估计(FXLMM)算法	61
5.3.8	反正切函数(FXatanLMS)算法	65
5.3.9	Sigmoid 函数(FXatanLMS)算法	66
5.3.10	通用步长归一化(FXgsnLMS)算法	68
第 6 章	时变系统的有源噪声控制	73
6.1	次路径在线辨识算法	73
6.2	基于 SPSA 的无模型算法	74
6.2.1	同步扰动随机逼近(SPSA)算法	74
6.2.2	基于 SPSA 的无模型有源噪声控制算法	75
6.3	基于 FFT 的无模型迭代学习控制算法	76
6.3.1	无模型迭代学习控制(MFILC)算法描述	76
6.3.2	基于 MFILC 的脉冲噪声有源控制算法	77
第 7 章	非线性系统的有源噪声控制	79
7.1	神经网络概述	79
7.2	基于 BP 神经网络算法的 ANC 系统的结构	79
7.3	参考信号滤波的 BP 神经网络算法	80
7.4	误差信号滤波的 BP 神经网络算法	83
7.5	函数链接型神经网络算法	84
7.6	自适应递归模糊神经网络算法	85
7.6.1	递归模糊神经网络(RFNN)结构	85
7.6.2	递归模糊神经网络的学习算法	88
7.6.3	自适应递归模糊神经网络 ANC 系统的收敛性	89
第 8 章	管道噪声有源控制实例	92
8.1	管道噪声有源控制实验系统组成	92
8.2	管道噪声有源控制实验系统的数学模型	94

8.3	重复性噪声有源控制的仿真及实验分析	96
8.3.1	仿真分析	96
8.3.2	实验研究	99
8.4	周期性噪声有源控制的仿真及实验分析	100
8.4.1	仿真分析	100
8.4.2	实验研究	104
8.5	随机性脉冲噪声有源控制的仿真及实验分析	105
8.5.1	FXatanLMS 和 FXsigLMS 算法仿真分析	105
8.5.2	FXgsnLMS 算法仿真分析	109
8.5.3	FXgsnLMS 算法实验研究	113
8.6	基于 SPSA 的无模型算法的仿真及实验分析	116
8.6.1	仿真分析	116
8.6.2	实验研究	118
8.7	基于 FFT 的无模型迭代学习控制算法的仿真分析	119
8.8	误差滤波神经网络(FEBPNN)算法的仿真分析	121
8.9	函数链接型神经网络(FLANN)算法的仿真分析	123
8.10	自适应递归模糊神经网络算法的仿真分析	125
参考文献		127

第1章 绪论

1.1 噪声的危害

20世纪50年代以来,随着现代工业、交通运输业的发展,噪声污染问题日益严重,已成为世界范围内公认的四大主要环境污染(噪声污染、水污染、大气污染以及固体废弃物污染)之一,严重威胁着人类的身心健康及生存环境。有资料显示,长期暴露在高噪声环境下,人们会出现听觉疲劳(如临床上报道的噪声聋)、疲乏无力、焦虑烦躁等症状。噪声会使神经系统功能紊乱、加速心脏衰老,甚至直接导致某些疾病的发生(如神经系统、心血管系统疾病等)。在工业领域,强烈的噪声会导致机器、设备及某些工业结构的声疲劳,长期作用将会缩短其使用寿命,甚至发生生产事故。另外,噪声的影响在军事领域也一直备受关注,噪声问题将会影响某些技术兵器的作战性能。例如,对于鱼雷、水雷、潜艇、水面舰艇等武器,过大的自噪声不仅影响自身声呐系统的工作,降低其有效作用距离,而且其辐射噪声降低了自己的隐蔽性,是导致受到敌方攻击的最主要因素^[1-5]。

2010年5月5—7日在上海举办的全球华人科学家环境论坛上,方丹群、田静、张斌、孙家麒等噪声控制专家一致认为“十二五”环境保护规划应当重视噪声问题。经大家反复讨论,起草了国内外噪声控制专家对国家环境保护“十二五”规划中关于加强环境噪声管理和控制的建议和呼吁。呼吁中指出:随着现代工业和交通运输业的发展,噪声污染越来越严重,已经成为现代重要公害之一。纽约、伦敦、东京等城市都曾有过噪声投诉数量在每年各类环境污染方面的案件中占首位的报告,中国的噪声污染也相当严重。根据《2008年中国环境统计年报》中2001—2008年环境信访工作情况的统计数据表明,2001—2006年噪声与振动信访数量居首位,2007—2008年,噪声与振动信访稍低于大气污染信访排名第二位。因噪声污染问题引发的纠纷和冲突、群体性抗议时有发生,甚至导致人员伤亡事件。据2009年《中国环境状况公报》中公布的“公众对环境状况满意度调查”结果显示:“受访公众对城市和农村环境状况满意度最高的均是饮用水质量,最低的分别为环境噪声和垃圾处理”。因此,环境噪声问题不再单纯是城市的环境问题,在农村地区同样存在较为严重的问题,噪声问题已发展成为制约人们生活质量提高、影响和谐社会建设的社会问题。

2010年12月15日,国家环境保护部、国家发展改革委、科技部、工业和信息化部、住房城乡建设部等国务院11个部门联合发布《关于加强环境噪声污染防治工作改善城乡声环境质量的指导意见》(环发[2010]144号)。文件指出:随着经济社会发展,我国环境噪声污染影响日益突出,环境噪声污染纠纷频发。解决环境噪声污染问题是贯彻落实科学发展观、建设生态文明的必然要求,是探索中国环保新道路的重要内容。文件第二十三条强调:应加强科技研究与开发,加大对声环境质量改善技术研发的支持,通过科技计划,依托行业主管部门,充分利用相关科研机构、高校、企业噪声振动研究基础,研发噪声控制技术。

因此,无论在军事领域还是民用领域,噪声控制都是一个值得关注的研究方向,如何有效地减小或控制环境噪声,是我们所面临的一个迫切需要解决的问题。

1.2 噪声的无源控制方法

所谓噪声控制,就是针对控制对象的性质、工作环境和控制要求,运用各种噪声控制原理来减小或消除有害的噪声效应。从策略上来讲,噪声控制可以从噪声源、噪声传播途径和噪声接受者三个方面入手^[3]。传统的噪声控制采用无源控制方式,诸如吸收、隔离、阻尼以及结构消声等方法,其降噪机理在于通过噪声声波与声学材料或声学结构的相互作用来实现声能的衰减,称为无源噪声控制(Passive Noise Control)^[6-7]。

1.2.1 吸声降噪

吸声降噪主要用于室内降噪,是指采用吸声材料或吸声结构吸收声能,从而降低噪声强度的方法。通常用吸声系数衡量吸声材料或结构的吸声性能,其定义为吸收的声能与入射的总声能之比,即

$$\alpha = E_a/E_i \quad (1-1)$$

式中, E_i —入射声能; E_a —被材料或结构吸收的声能。

吸声系数 α 始终是小于1的。 α 越大,吸收的声能越多,表明材料或结构的吸声性能越好。

常见的吸声材料主要指多孔吸声材料,如玻璃棉、岩棉及泡沫塑料等。其吸声机理在于多孔材料具有大量的内外连通的微小孔隙和孔洞。当声波入射到多孔材料上,声波能顺着孔隙进入材料内部,引起空隙中空气分子的振动。由于空气的粘滞阻力、空气分子与孔隙壁的摩擦,声能转化为摩擦热能而吸声。

对于吸声结构来说,所用材料本身可以不具有明显的吸声特性,但材料经打孔、开缝等简单的机械加工和表面处理后,制成某种结构而具有吸声性能。如穿孔石膏板、空间吸声体及吸声尖劈等。

在车间、厂房、机场大厅等场合,声波在室内传播时,被墙壁、天花板、地板等障碍物反射,形成混响声场。通过在室内布置吸声材料,可以使混响声被吸掉,降低室内噪声。吸声

降噪最多可以获得 10~15dB 的降噪量。

1.2.2 隔声降噪

把产生噪声的机器设备等噪声源封闭在一个小的空间,使它与周围环境隔开,以减少噪声对环境的影响,这种做法叫做隔声。隔声屏障和隔声罩是主要的两种设计,其他隔声结构还有:隔声室、隔声墙、隔声幕、隔声门等。

隔声屏障主要用于阻挡直达声的传播。在声源和接收者之间插入一个设施,使声波传播有一个显著的附加衰减,从而减弱接收者所在的一定区域内的噪声影响。隔声屏障主要用于室外。随着公路交通噪声污染日益严重,有些国家大量采用各种形式的屏障来降低交通噪声。图 1-1 为铁路旁边的隔声屏障设施,可减低列车通过时产生的噪声对居民的影响。

隔声罩是用来阻隔机器设备等噪声源向外辐射噪声的罩子,可以和机器的外壳结合在一起,也可以是和机器分开的单独罩。隔声罩通常是具有隔声、吸声、阻尼、隔振和通风、消声等功能的综合体。隔声罩主要由罩板、阻尼涂料和吸声层构成,其结构可以是完全封闭的,也可以留有必要的开口、活门或观察孔。小的隔声罩只有几厘米大小,而最大的可高达几十米。图 1-2 为工厂车间内的隔声罩设施,将产生噪声的机器封闭在特定的空间内,降低机器噪声对车间内从事作业工人的听力损伤。

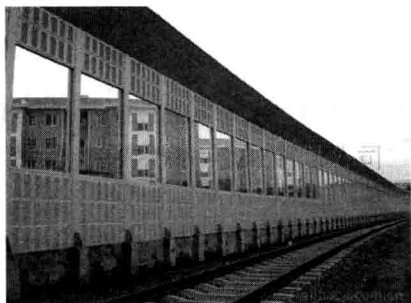


图 1-1 隔声屏障

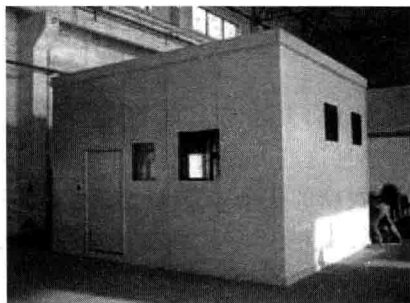


图 1-2 隔声罩

1.2.3 消声器降噪

消声器是阻止声音传播而允许气流通过的一种器件,是消除空气动力性噪声的重要措施。消声器通常安装在空气动力设备(如鼓风机、空压机、锅炉排气口、发电机、水泵等排气口噪声较大的设备)的气流通道上或进、排气系统中的降低噪声的装置。

根据消声机理,无源消声器可以分为阻性消声器、抗性消声器、阻抗复合式消声器、微穿孔板消声器、小孔消声器等。

阻性消声器主要是利用多孔吸声材料来降低噪声。把吸声材料固定在气流通道的内壁上或按照一定方式在管道中排列,就构成了阻性消声器。当声波进入阻性消声器时,一部分声能在多孔材料的孔隙中摩擦而转化成热能耗散掉,使通过消声器的声波减弱。

抗性消声器是由突变界面的管和室组合而成的,好像是一个声学滤波器,每一个带管的小室是滤波器的一个网孔,有自己的固有频率。当包含有各种频率成分的声波进入第一个短管时,只有在第一个网孔固有频率附近的某些频率的声波才能通过网孔到达第二个短管口,而另外一些频率的声波则不可能通过网孔。只能在小室中来回反射,因此,我们称这种对声波有滤波功能的结构为声学滤波器。选取适当的管和室进行组合,就可以滤掉某些频率成分的噪声,从而达到消声的目的。

阻抗复合式消声器由阻性结构和抗性结构按照一定的方式组合构成。

微穿孔板消声器一般是用厚度小于 1mm 的纯金属薄板制作,在薄板上用孔径小于 1mm 的钻头穿孔,穿孔率为 1%~3%。选择不同的穿孔率和板厚不同的腔深,就可以控制消声器的频谱性能,使其在需要的频率范围内获得良好的消声效果。

小孔消声器的结构是一根末端封闭的直管,管壁上钻有很多小孔。小孔消声器的原理是以喷气噪声的频谱为依据的,如果保持喷口的总面积不变而用很多小喷口来代替,当气流经过小孔时,喷气噪声的频谱就会移向高频或超高频,使频谱中的可听声成分明显降低,从而减少对人的干扰和伤害。

1.3 噪声的有源控制方法

一般来说,上述的无源控制方法对中、高频噪声具有较好的控制效果,但对低频噪声效果不大,并且这些方法不同程度地存在着安装维护、设备笨重、体积庞大等缺点^[8]。为此,人们开始寻找新的控制方法以弥补无源控制方法的不足,于是有源噪声控制(Active Noise Control, ANC)技术应运而生。从理论上说,有源噪声控制(又称主动噪声控制)在低频范围内可以达到很高的降噪量。同时可以使整个系统体积很小,便于设计和控制,具有很大的优越性^[9-12]。

1.3.1 有源噪声控制的基本原理

有源噪声控制的基本原理是基于声波的相消干涉原理,由德国物理学家 Paul Leug 在 1933 年率先提出的,并于 1933 年、1936 年分别在德国及美国获得了专利^[13-14]。

图 1-3 为 Leug 专利中的管道噪声有源控制示意图,依据声波的相消干涉原理,利用人为附加的次级声源 L,使其发出的声波与原有初级噪声源 A 发

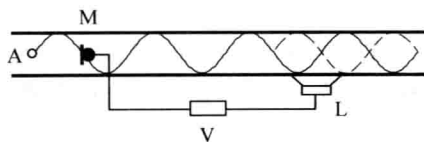


图 1-3 Leug 专利原理图

出的声波形成相消干涉实现噪声衰减。图中 M 为传声器,用于检测噪声并将其转换为电信号,电信号由放大器 V 放大,然后激励扬声器 L 发生。扬声器 L 产生一个与初级声波(实线)幅值相等、相位相反的次级声波(虚线)。二者相互抵消。这样,在管道下游形成一个局部静音区。

从图 1-3 中可以看出,为了获得良好的消噪效果,需准确确定声波从传声器 M 传播至扬声器 L 所需要的时间,且放大器 V 应具备良好的幅频和相频特性。一般认为,Leug 的系统是最早的前馈有源噪声控制系统,为有源消声技术的蓬勃发展奠定了理论基础。但是,在 20 世纪 30 年代,当时的电子技术水平难以满足上述要求,因此 Leug 的思想未能付诸实现,在此后近 20 年的时间里被束之高阁。

1.3.2 有源噪声控制的发展历程

20 世纪 50 年代,随着电子技术的发展,人们对 Leug 的专利重新燃起了兴趣。这期间有过一段有源噪声控制研究的繁荣时期,也取得了一定的成果,并做了一些探索性的实验研究。其中,1953 年 Olson 研制了电子吸声器^[15-16],该电子吸声器的构成与 Leug 专利中提到的相似,整个装置由一个附有吸声材料的空腔、一个传声器、一个放大器及一个扬声器组成,不过与 Leug 不同的是,Olson 采用了反馈控制结构,这里传声器的作用是检测静音区的噪声信号,该信号通过放大器直接驱动次级声源发声,避免了声反馈现象的存在。但电子线路频响特性的不理想使吸声的频率范围受到限制,消声频带较窄,消声区范围较小,这使得 Olson 的电子吸声器很难在实际中应用。1955 年,Simshauser 和 Hawley 在美国声学会上发表了题为“The noise cancelling headset—an active ear defender”的文章^[17],文章中采用了相移网络技术实现有源消声,这是目前广为流行的有源消声耳机的雏形^[18]。1956 年通用电气公司的 Conover 研制了变压器有源消声实验系统^[19-20],由多个次级声源控制变压器的辐射噪声,在变压器的正面,可以获得 10dB 左右的降噪量,开辟了多通道有源噪声控制的新思路。

根据现今的声学理论,Olson 电子吸声器、Simshauser 的有源消声耳机以及 Conover 的变压器有源消声实验系统中所涉及的声场属于三维空间声场,无论是声场的性能分析还是控制系统的实现,在当时的技术条件下都是难以完成的,因此人们开始将注意力转向具有平面波声场的管道噪声有源控制的研究^[3]。

20 世纪 70 年代,人们在管道噪声有源控制方面进行了大量的研究,比较有代表性的是 Jessel、Swinbanks、Poole 及 Canevet 等研究小组所进行的理论分析及实验研究^[21-24]。在这些研究中,为了消除次级声反馈的影响,逐步发展了单级、偶级和多级有源噪声控制系统。

20 世纪 80 年代以前,有源噪声控制系统中的控制电路均采用模拟电路,随着研究的逐步深入以及研究领域的逐渐扩大,人们开始遇到了越来越多的困难,主要原因在于:实际应用中待抵消噪声的特性及声场环境经常随时间发生变化,这就使得初级噪声的频率成分、幅

值、相角等参数具有时变性的特点。要在实际应用中获得比较好的控制效果,控制器必须能自动地适应这些变化,以实现对接级声源的精确控制,否则次级声源不仅不能有效抑制噪声,可能会适得其反,成为一个附加的噪声源。因此,需要一种能自动跟踪初级噪声特性,且控制器特性可时变的自适应有源噪声控制系统^[3]。

20世纪80年代初,随着数字信号处理理论和技术的逐步成熟,基于自适应滤波理论的有源噪声控制技术开始起步并迅速发展。Morgan、Widrow及Burgess提出了获得广泛应用的滤波-X最小均方(Filtered-X Least Mean Square, FXLMS)算法^[25-27]。有效解决了由于次级声学路径所引起的系统不稳定问题。1981年,Burgess率先采用自适应控制算法对管道噪声的有源控制进行了计算机仿真研究^[27],开创了自适应有源噪声控制的先河。至此,有源噪声控制的研究正式进入了蓬勃发展时期。目前,美国、英国、德国、日本、澳大利亚、新加坡及印度等国的多家科研结构从事这方面的研究工作,已有大量论文、专利及应用成果问世。据www.sciencedirect.com网站的统计数据显示,2010年,以“active noise control”作为关键词的论文为8856篇,2011年为9791篇,2012年为11888篇,呈现出明显上升的趋势。

纵观有源噪声控制的研究历程,其中值得一提的是英国Southampton大学的声与振动研究所P. A. Nelson和S. J. Elliott等人开展的螺旋桨飞机舱室噪声有源控制的研究。1988年春,他们和英国Topexpress公司的C. M. Doring等人在一架BAe748飞机上完成了首次舱室噪声有源控制飞行试验^[28-30],这是有源噪声控制研究历史上第一次大规模的飞机舱室噪声有源控制现场试验。系统中有16只扬声器和32只传声器分别作为次级声源和误差传声器,采用多通道FXLMS算法,试验结果表明,88Hz的基频噪声降低了13dB。这一成功的试验成为有源噪声控制应用的典型范例。特别是,1992年P. A. Nelson和S. J. Elliott出版了第一本有源噪声控制的专著“Active control of sound”^[9],为后续的研究者提供了不可多得的宝贵资料。

国内有源噪声控制的研究起始于20世纪70年代末期。南京大学声学所沙家正等人早在1979年就开始了有源消声技术的研究^[31],在拓宽管道有源消声器的频带和改进次级声源系统,以及把微机应用于有源消声中都做了大量的工作,并首先从实验上对管道有源消声器的消声机理作了比较全面系统的探讨^[32-37]。此外,该课题组在空间有源消声、有源抗噪声送话器及受话器等方面也取得了显著成果,并在1985年向国家专利局申请了相关的专利^[38-39]。中国科学院声学所马大猷院士等在混响声场及室内声场的噪声有源控制方面进行了深入的分析研究^[40-44]。西北工业大学的陈克安等人在自适应有源噪声控制方面进行了大量的理论分析及实验研究,并于1993出版了国内第一本有源噪声控制的专著《自适应有源噪声控制——原理、算法及实现》^[4]。此外,清华大学、北京理工大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、吉林大学、海军工程学院、山东科技大学及北京信息科技大学等多家科研院所也在开展噪声有源控制方面的研究。

1.4 有源噪声控制系统的基本结构

有源噪声控制系统主要有前馈控制和反馈控制两种结构,分别是在 Paul Lueg 及 Olson 采用的系统基础上改进及发展而来。为叙述简便,这里以单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)管道 ANC 系统为例来介绍前馈和反馈控制系统的结构,必要时不难把它们推广到多通道及自由声场的情形。

1.4.1 前馈控制

前馈 ANC 系统的结构如图 1-4 所示。图中,噪声源发出的噪声沿管道向下游传播,参考传声器采集噪声输入信号 $x(n)$,误差传声器采集残差信号 $e(n)$,送入 ANC 控制器中,经过自适应控制算法处理,输出控制信号 $u(n)$ 。 $u(n)$ 驱动次级扬声器产生和主噪声幅值相等、相位相反的次级声信号,二者叠加使误差传声器处的噪声得到有效衰减^[8]。

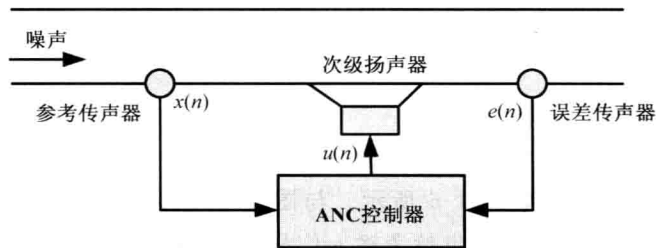


图 1-4 前馈 ANC 系统

值得说明的是,这里误差信号 $e(n)$ 不是构成反馈控制,而是根据某种最优准则对 ANC 控制器进行自适应修正,以使误差传声器处的残余噪声达到最小。

图 1-5 给出了前馈 ANC 系统框图。图中 $P(z)$ 为参考传声器到误差传声器之间的主路径传递函数。 $S(z)$ 为次级扬声器到误差传声器之间的次路径传递函数。 $W(z)$ 为控制器传递函数,一般采用线性自适应滤波器,控制器的参数将根据误差传声器测得的残余噪声不断进行在线自适应调整。有关控制器及其自适应控制算法的有关内容,后续章节将会作更详细的介绍。

由图 1-5 可知

$$E(z) = X(z)P(z) + X(z)W(z)H(z) \quad (1-2)$$

假设控制器 $W(z)$ 收敛到最优值,此时误差信号 $E(z) = 0$,次级扬声器发出一个和主噪声信号 $d(n)$ 大小相等、方向相反的抗噪声信号 $y(n)$,即

$$y(n) = -d(n) \quad (1-3)$$

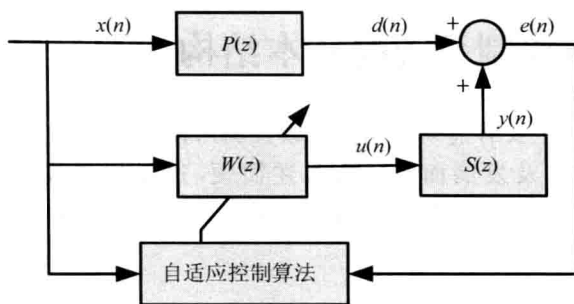


图 1-5 前馈 ANC 系统框图

则 $W(z)$ 的表达式为

$$W(z) = -\frac{P(z)}{H(z)} \quad (1-4)$$

这就意味着控制器 $W(z)$ 不仅和主声学路径 $P(z)$ 有关,而且还和次声学路径 $H(z)$ 的逆有关,因此对于前馈 ANC 系统,必须保证主声学路径的延迟大于次声学路径的延迟,即整个控制系统必须满足因果性的要求。

1.4.2 反馈控制

反馈 ANC 系统的结构如图 1-6 所示。与图 1-4 所示的前馈 ANC 系统相比,反馈 ANC 系统不需要参考传声器来采集参考输入信号,仅采用误差传声器采集残余误差信号 $e(n)$,直接根据误差传声器的测量值给出相应的控制输出^[10]。反馈 ANC 系统适用于那些无法安装参考传声器或多噪声源的情况,如混响声场的空间降噪及有源头靠等系统中。

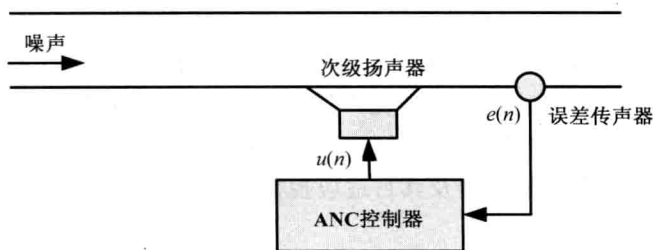


图 1-6 反馈 ANC 系统

反馈 ANC 系统框图如图 1-7 所示,值得注意的是,在反馈 ANC 系统中,误差信号 $e(n)$ 除了用于在线自适应调整控制器的参数外,还直接作为控制器的输入信号,经自适应控制算法处理,输出控制信号 $u(n)$,因此称为反馈 ANC 系统。