

局域空间噪声主动控制技术的进展 *

张继萍^{1,2} 潘家强³ 蒋伟康¹

¹(上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室 上海 200030)

²(浙江省环境保护科学设计研究院 杭州 310007)

³(浙江大学检测技术和智能仪器研究所 杭州 310027)

2001年10月29日收到

摘要 低频噪声主动控制技术实现实用化, 需要同时了解其在声学 and 电子控制方法上的可实现性。本文在系统的文献检索的基础上, 综述了局域空间自适应噪声主动控制技术的发展, 内容包括用次级声源控制室外局域噪声、围护结构内的局域空间和室外向室内传播的小范围区域空间噪声主动控制在声学上的限制(原理), 以及各种控制策略和算法的应用。本文列出的文献包括了已有的重要研究成果, 可为读者进一步了解该领域的研究提供详细的背景材料。

关键词 噪声主动控制(ANC), 局域空间

Progress of active noise control in a local zone

ZHANG Jiping^{1,2} PAN Jiaqiang³ JIANG Weikang¹

¹(State key Laboratory of vibration, shock, and noise, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

²(Zhejiang Research and Design Institute of Environmental Protection, Hangzhou 310007)

³(Department of instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Through a systematical reference investigation, the progress of the active noise control of local silent zone is reviewed in this paper so as to well understand its limitations and realizations both in acoustics and electronic control methods.

Key words Active noise control, Local silent zone/space/area.

1 引言

目前已经清楚, 可应用于实际问题的噪声主动控制技术(ANC)的例子包括: 空调管道, 主动护听器技术和螺旋桨飞机机舱内谐波等, 一些应用已实现了商品化, 但它们的应用面

仍远不能满足需求, 需要进行更深入的研究, 进一步搞清各种声场和结构中弹性波的特性, 才能确保ANC技术的可行性, 研发出更多种的实用系统。

ANC技术更为广阔的应用领域在于能实现三维空间噪声的控制。但是, 由于三维空间

* 浙江省环境保护局科技项目(9809号)

问题的复杂性,采用全空间控制策略会遇到一些根本性的限制,已进行的空间主动控制的研究和实验工作的结果并不理想,取得的效果非常有限。ANC技术的另一控制策略是采用易于实现的局域控制的方法,虽然会造成降噪区域范围外的噪声级升高,但通常是可容许的。例如,对汽车车厢内多处局域噪声(围绕司机或乘客头部位置)进行主动控制。局域空间ANC技术研究目前已达到一定的水平,但要继续发展尚需对一些问题进行更深入的研究(例如,对非线性、时变(随机)、低频端宽频的信号进行快速、有效、自适应的处理问题),需要寻找新的解决方法,以求新的进展。本文将对局域ANC技术的自适应控制机理和数字信号控制实现算法等方面进行综述,介绍一些已经实现和可能实现的局域ANC技术的应用或实验研究结果。

2 局域噪声主动控制的声学原理

局域空间ANC的原理基于声波的干涉机制,即对所控制的局域空间,用次级声源产生的声波对初级声源产生的噪声进行抵消性干涉,以使被研究的空间局域内的噪声声压值达到期望的控制目标。本文将局域空间ANC分为初级声源和次级声源均在室外(室外局域),初级声源和次级声源均在围护结构内(围护结构内局域),以及初级声源在室外、次级声源在室内(室外向室内的声传播)等三种情况进行论述。

2.1 室外局域

西澳大利亚大学的潘杰等系统地研究了自由空间局域噪声的主动控制^[1]。研究表明,局部安静区域的大小主要取决于初级声源、次级声源、误差传感器的空间布置以及周围存在的反射面的几何学。单个次级声源的控制效果有限,一般考虑采用多个次级声源和多个误差传感器。此时,次级声源产生的安静区域并非单个声源情况的叠加,它们之间存在互相干涉,需要通过优化布置,才能取得最大的安静区域。

Guo和Pan研究了存在一对初次级声源时地面的影响^[2],发现地面较严重地影响了安静区域的大小,影响因素包括声源和误差传感器离地面的距离、初级声源和次级声源间的距离以及次级声源和误差传感器间的距离。因此,一般而言半空间控制系统的安静区域小于全空间自由场的情况。只有当声源离开反射面一个波长以上时,反射面对相应频率声波的影响才可被忽略^[3]。

2.2 围护结构内的局域

很早以前,Olson和May就提出了在室内对人的头部位置进行了噪声控制的概念。Nelson和Elliott的研究小组(英国南安普顿大学声振动研究所)系统地研究了围护结构内局域空间ANC问题。Joseph和Elliott用统计方法研究了围护结构内谐波声场的主动控制^[4]。对于频率较高的低频成分,房间响应来自大量的模态,很难实现全空间的声场控制,因此只能采用以某个控制点为中心的局域空间策略。由于这种方法的控制目标为降低监测传感器位置处的噪声,只要该传感器靠近次级声源,次级声源不需太大的激励信号,也就不会向远离控制局域的地方发射太多的新增噪声。而在靠近次级声源的局域,初级声场与次级声源的信号通过叠加发生干涉形成噪声降低的区域^[5,6]。理论上可以对活塞纯音信号用数值计算的方法分析这种干涉降噪的效果,并定义比原先降低10dB以上的局域为安静区^[7];当传感器靠近次级声源,安静范围很小,但在1kHz以下频段,该范围与频率无关;当传感器远移,安静范围在低频时较大,但会随激发频率的增加而减小。最大的范围为波长的十分之一。

David和Elliott研究了次级声源轴线方向上所形成安静区域的形状,发现在均匀初级声场时,对频率很高的声音,围绕次级声源所形成的安静带为非常完整的壳状。但对扩散的初级声场,安静区域的形状与声波波长和主动噪声控制系统的尺度有关^[8]。在低频激励下初级声场仍可近似看成均匀场,安静区域形状保

持呈壳状围绕次级声源；而在较高频率的激励时，初级声源场为扩散场，将围绕监测传感器形成直径近似为研究声波十分之一波长的球形安静区域，并与初级声源场的空间相关特性有关。

真实的局域噪声控制系统还需考虑人的头部存在时的影响。Bonito 和 Elliott 仿真和实验研究了将人头近似为硬的球体时扩散的初级声场内次级声场的衍射特性，结果表明平均的安静范围较人头引入前略有增大^[9]。为了产生有用的安静局域空间，误差传感器必须放在距次级声源较远处，这会给安静区域内头部的活动带来不便。Bonito 和 Elliott 提出用虚拟传感器的概念，将真正的传感器放在距离人头较远处，但可产生其紧靠头部的效果，并进行了理论与实验研究^[10]。Kestell 和 Hansen 则用能量密度传感器代替普通的声压传感器对此进行了改进，以求取更好的效果^[11]。

传统的局域 ANC 制技术所采用的最小化评价量为声压值；该方法的优点为应用形式简单。为了将控制点的安静区域扩大，另一种方法是同时采用声压值和声粒子速度值作为控制点最小化的函数，较仅用声压值作为评价量取得更好的效果^[12]。Tseng 和 Rafaely 等则提出用控制论的鲁棒 H_2 和 H_∞ 准则^[13]。通过采用二或三个次级声源的方法，不仅可以使单点的声压值最小，而且使整个安静区域的评价量最小，以获得更大的安静范围。

2.3 室外向室内的声传播

目前，对飞机、汽车等系统，存在采用轻质结构和壳体设计的趋势，以求节省能源和材料，但由此却带来了大量的舱内或车厢内低频噪声控制问题。因此室内 ANC 的热点问题之一，集中在对从室外通过弹性边界传入围护结构内噪声的控制^[14]。研究方法之一，是将系统模拟为声腔表面带有一个弹性平板（例如，Kim 和 Brennan^[15]，Sampath 和 Balachamdran^[16]，等等的工作）。虽然这些研究主要考虑腔体内全空间噪声的控制问题，但其

方法可以推广至对腔内局域空间的噪声控制，已有的研究为对飞机和汽车内驾驶员和乘客头部位置噪声的控制。

这种方法也可用于对建筑物室外噪声传入室内的情况作局域主动控制，按建筑物的舒适标准，可分为房间窗户打开和关闭两种情况。由于这时的实际声传播路径一般非常复杂，所以该类研究很少^[17]。窗户关闭时，窗户玻璃可以模拟为一类弹性边界，房间可看成竖放的空腔，因此系统可考虑为腔体加简支弹性边界；对普通建筑物，窗户打开的机会更多一些，会有更多的噪声能量进入，将较窗户关闭更有研究价值，但其研究的难度更大，几乎没有看到有关该类问题研究的报道。

3 控制算法

因为实际初级声源的噪声包括稳态的和随机的两种情况，针对它们需要采用不同布置的次级声源、参考传感器或误差传感器，通过自适应数字信号处理算法应用 DSP 高速单板机实现实时控制。自适应建模采用 FIR 和 IIR 滤波器，最常用的算法为最小方差 (LMS) 方法。但因需要考虑次级声源的动态性能(传递函数)，由此发展出滤波 FXLMS 算法。FIR 具有性能稳定的特点，但需要较多的点才能得到好的性能，因此计算量较大；IIR 具有简单的形式，计算量小，计算成本低，但系统可能出现不稳定的现象；如果能克服不稳定的极点因素，IIR 的应用将具有更大的吸引力。

控制算法包括前馈算法，反馈算法，以及前馈与反馈复合算法。前馈算法需要由参考传感器提供良好相干的信号，在此条件下才能取得较好的降噪效果；反馈算法主要应用于初级声源具有可预测性噪声成分的情形；前馈与反馈复合算法则结合了两种算法的特点^[18]。好的算法应具有收敛快，降噪比大和鲁棒性等特点。不论采用哪一种算法，都需要考虑声延迟和声反馈的影响。一般采用补偿的方法来克服；

但对一些具体问题,采用特殊应用的布置,可忽略它们的影响。

Kuo 和 Morgan 通过分析最基本的基于单通道、宽频带、前馈的自适应控制算法,并将其改进为窄频前馈和自适应反馈控制,进而将单通道算法扩展到多通道的情况;同时,全面地介绍了各种在线、次级路径模拟技术和特殊的自适应算法,例如 RLS 算法,网格算法,频域算法,分频算法,回归最小平方算法等^[19]。

常用算法一般具有简捷性。为了取得更好的性能,许多研究者发展、改进或完善了有关的算法。例如, Kim 和 Lee 借助 IIR 滤波器结构提出了基于遗传算法的主动噪声控制算法。算法具有较好的频率特性,对输入信号相关性不敏感,不会陷入局部最小,且只需一代学习样本等优点^[20]。Fujii 和 Muneyasu 等提出了一种同步方法,在不向次级声源引入额外噪声前提下,不停地更新反馈控制滤波器的参数,其中,同步方程应用系统辨识方法求解^[21]。Tanaka 和 Makino 提出了一种将数据成块处理的方法,其收敛速率与一般的单个数据采样的方法相同,但降低了计算的复杂性。该法通过引进修正项来补偿单数据采样与数据直接成块处理的差别,然后应用一种快速 FIR 滤波技术计算滤波器输出,并更新滤波器参数的值^[22]。Bouchard 和 Quednau 则引入了多通道 RLS 算法和多通道快速横向滤波器算法,一定程度上可以提高收敛速度^[23]。

在另外方面, Adachi 和 Sano 研究了可直接用于小空间室内噪声控制的算法。他们用系统辨识理论建立了一种包括扬声器和麦克风特性的声场模型,从而设计出一种二自由度的控制系统,并在实验室用其对汽车内噪声数据进行了控制处理^[24]。Omoto 和 Fujiwara 等对运动声源 ANC 问题进行了探讨。应用 LMS 反馈和前馈算法,他们对紧靠路边单辆快速运动的汽车噪声进行了主动控制仿真计算,结果表明反馈结构大约有 5-10dB 的降噪效果,前馈结构的效果则很小^[25]。

4 应用

自由空间局域 ANC 技术已应用于建立 ANC 隔声屏障^[26],以及对露天变压器低频谐波噪声等的控制;但对于道路声屏障的应用,尚缺乏考虑声源是移动的因数。围护空间局域 ANC 技术最为直接的应用包括汽车、飞机、船舶等噪声很大的交通工具内的噪声控制^[27],以及对多媒体电脑音响系统产生娱乐用个人安静区域^[28],或对作核磁共振仪检查病人头部位置的噪声进行控制;当声源集中于一个位置,与声源分布于整个机舱,所采用的控制方法是不同的。对于噪声从室外传入室内,在室内产生分布声场的情况,又不同于单个声源直接置于室内的情况。此时既有空气声传入,又有结构声传入。这种情况下可将参考传感器布置于室外。只要误差传感器可以得到较好的相干信号,就可用次级传感器在人的头部区域(如床头位置)产生安静区。由于围护结构的影响,返回到参考传感器的控制信号可以很弱,因而这种布置可以不考虑声反馈的影响。Crawford 和 Stewart 报道了一种采用低价 DSP 技术的双通道主动噪声控制器,可用于许多情形^[29]。虽然该成果局限于信号稳定的声源,但他们指出,随着功能强大、价格低廉的 DSP 芯片的出现,以及 ANC 技术的发展,在未来的 10 年内,有望出现更多的应用。

5 展望

虽然目前已经取得的、具有实效性的工程应用实例不多,但不容置疑,ANC 技术具有良好的应用前景。在文献检索的基础上,本文作者认为,已经取得的、具有实效性的应用大都在 90 年代中期已完成,ANC 技术更大的应用领域将在三维空间噪声场的控制方面,进一步的研究正处于另一个“静寂”或“瓶颈”时期。由于实现全空间 ANC 存在很大的难度,

局域空间 ANC 的工程应用是下一阶段努力的目标。虽然在局域空间 ANC 的声学原理和控制算法上都已获得不小的进展,但在实际应用方面由于存在局限性,使得其应用效果尚不够理想。因此,对局域空间 ANC 的声学原理和控制算法继续在深度和广度上进行研究,发展和采用最先进的 DSP 技术和实用的局域 ANC 工程设计方法,将使这一先进的噪声控制技术在今后十年应用于一些最尖端的重要的部门。

参 考 文 献

- 1 Guo J, Pan J. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, **105**(4): 2294-2303.
- 2 Guo J, Pan J. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, **103**(2): 944-952.
- 3 Cunefare K A, Shepard S. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, **93**(5): 2732-2739.
- 4 Joseph P, Elliot S J, et al. *J. Sound and Vib.*, 1994, **172**(5): 629-655.
- 5 Elliott S J. *J. Sound and Vib.*, 1994, **177**(5): 651-673.
- 6 Joseph P, Elliott S J, Nelson P A. *J. Sound and Vib.*, 1993, **172**: 605-627.
- 7 David A, Elliott S J. *Applied Acoustics*, 1988, **41**: 63-79.
- 8 Elliott S J, Joseph P, et al. *J. Sound and Vib.*, 1993 **120**: 183-189.
- 9 Garcia-Bonito J, Elliott S J. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, **98**(2): 1017-1024.
- 10 Garcia-Bonito J, Elliott S J, et al. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1997, **101**(6): 3498-3516.
- 11 Kestell C D, Hansen C H. waiting Active noise control with virtual sensors, Proceedings of 8th international congress on sound and vibration, July 2-5, 2001, Hang Kong, 261-268.
- 12 Garcia-Bonito J, Elliott S J. *J. Sound and Vib*, 1999, **221**(1): 85-116.
- 13 Tseng W K, Rafaely B, et al. *J. Sound and Vib.*, 2000, **234**(3): 427-439.
- 14 Hansen C H, Cazzolato B S. Recent advance in the active control of interior noise, presented at the 6th international congress on sound and vibration, 1-43 (1999).
- 15 Kim S M, Brennan M J. *J. Sound and Vibration*, 1999, **226**(3): 549-571.
- 16 Sampath A, Balachandran B. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, **106**(1): 221-225.
- 17 Duhamel D, Sergent P. *J. Sound and Vibration*, 1998, **212**(1): 141-164.
- 18 Tseng W K, Rafaely B, et al. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, **104**(6): 3417-3425.
- 19 Kuo S M, Morgan D R. *Proceedings of the IEEE*, 1999, **87**(6): 943-973.
- 20 Kim J B, Lee T P, et al. Feedforward IIR active noise control using genetic algorithm, Proceedings of the 1999 IEEE international conference on control applications, Kohala coast-island of Hawaii, Hawaii, USA, August 22-27, 1999, 436-439.
- 21 Fuhii K, Muneyasu M, et al. Method to update the feedback control filter coefficients under active noise control, ISCAS 2000-IEEE international symposium on circuits and systems, May 28-31, 2000, Geneva, Switzerland, IV345-348.
- 22 Tanaka M, Makino S, et al. *IEEE transactions on speech and audio processing*, 1999, **7**(1): 79-86.
- 23 Bouchard M, Quednau S. *IEEE transactions on speech and audio processing*, 2000, **8**(5): 606-618.
- 24 Adachi S, Sano H. Active noise control system for automobiles based on adaptive and robust control, Proceedings of the 1998 IEEE international conference on control applications, Trieste, Italy, 1-4 September 1998, 1125-1129.
- 25 Omoto A, Matsui T, et al. The behavior of an adaptive algorithm with a moving primary source, Internoise 98, Christchurch NZ, November 16-18, 1998, 527-530.
- 26 Omoto A, Takashima K, et al. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1997, **102**(3): 1671-1679.
- 27 Johansson S, Claesson I, et al. *IEEE transactions on speech and audio processing*, 1999, **7**(4): 473-477.
- 28 Druyvesteyn W F, Garas J. *J. Audio Eng. Soc.*, 1997, **45**(9): 685-701.
- 29 Crawford D H, Stewart R W, et al. *Electronics & Communication engineering journal*, 1997, (8): 81-89.