

文章编号: 1001-2486 (2001) 02-0119-06

有源消声技术与应用述评*

徐永成, 温熙森, 陈 循, 温激鸿

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:近十几年来,有源消声技术成为噪声控制领域一个多学科交叉、渗透、延伸的研究热点,它以其体积小、重量轻、低频消声效果好等优点获得普遍的关注。本文简述有源消声的基本原理,对有源消声理论研究、实现技术、产品应用三个方面的国内外研究现状、进展和难点进行了详细的阐述和分析,较为完整地展示了当前该研究领域的全貌,最后进一步分析了有源消声走向工程化过程中存在的一些主要问题,提出了有源消声技术的几个重点发展方向。

关键词:噪声控制;有源消声;降噪;自适应控制

中图分类号: TB535 **文献标识码:** A

An Overview on Active Noise Control Technology and Application

XU Yong-cheng, WEN Xi-sen, CHEN Xun, WEN Ji-hong

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. Of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: During the recent decade, the active noise control technology has becoming a hotspot of the noise controlling field, which is the extend and intercross of several subjects. Its ability of eliminating low frequency noise, light weight and compactness have been fully understood. Firstly this paper simply introduce its theory. Then the actuality and nodus of its theory research, implementation technique and product at home and abroad are elaborated in full. Finally some problem of its practicability are analyzed further and several major developing directions are presented.

Key words: noise control; active noise control; noise reduction; adaptive control

噪声作为环境污染的第三大公害,一直困扰着人们。研究^[1]表明,噪声在 55~60 dB 范围,会使人感觉烦恼,在 60~65 dB,会使烦恼度大大增加,在 65 dB 以上,则人体健康有可能受到危害。对于厂矿企业的工作人员,应保证不超过 85 dB。噪声影响人们的身心健康、损伤听力及相关的系统、降低工作效率,严重的甚至造成安全事故。因此,人们探索出“多管齐下”的噪声综合治理方法^{[1][2][3]}:首先是从声源着手,改进结构设计,减少声源发出的噪声等级,这是最为有效的方法,但有时由于技术、成本等方面的限制,还不能从根本上杜绝噪声源;其次是隔声、吸声等被动消除噪声的方法(也称为无源法,Passive Method),它对高频噪声的消声效果很好,但是对低频噪声效果不明显,而且消声装置体积庞大,安装维护困难;其三是有源消声技术,它对低频噪声效果很好,相对被动消声方法而言,还具有系统小、重量轻、控制易等优点,随着现代控制技术的发展和控制芯片成本的下降,有源消声的实现也越来越容易,已成为噪声控制的一个研究热点。

有源消声^{[2][3]}也称有源降噪、有源噪声控制、有源噪声抵消、有源声衰减,英文名称也有多种,含义相差不大。目前学术界用得最多的还是有源消声(Active Noise Control, ANC)这一说法。ANC 就是根据两个声波相消性干涉或声辐射抑制的原理,通过抵消声源(次级声源)产生与被抵消声源(初级声源)的声波大小相等、相位相反的声波辐射,相互抵消,从而达到降低噪声的目的^[2]。有源消声的概念是由德国人 Paul Lueg 提出,1934 年申请专利,1936 年撰文阐明其基本原理,但是由于电子技术等方面的限制,制造不出所需的电子控制系统,因此该技术长期得不到发展,直到 60 年代末,随

* 收稿日期:2000-09-11

作者简介:徐永成(1972-),男,讲师,博士。

着电子技术的发展,ANC的研究才又重新兴起。

有源消声的研究主要分为有源消声的理论研究、实现技术和产品应用三部分。下面本文将就这三个方面的国内外研究现状和难点分别进行述评。

1 有源消声理论研究

有源消声理论研究可以大致分为四个方面:有源消声机理的研究、管道有源消声的理论研究、空间有源消声的理论研究、次级声源和传声器的最优化研究。

1.1 有源消声的机理研究

随着有源消声研究的发展,对有源消声机理的认识要求也越来越迫切,希望以此从声场理论方面对有源消声给予指导,另外消声效果的进一步提高,也有待于人们对有源消声机理的更为深刻的理解。一般认为存在三种消声机制:声辐射抑制机制、声能量吸收机制、抗性能量存储机制。不过除了能量吸收机制在管道有源消声中得到验证之外,其余两种机制在学术界尚未统一认识^[4]。

有源消声最早的声学理论基础是建立在惠更斯原理上的 Krichhoff - Helmholtz 定理^[3]:它的特点是以三极子声源为次级声源,在封闭曲面上连续布放次级声源,这在实际中是不可能的;JCM 理论指出任意一个声源的噪声辐射均可以用一个闭合曲面上连续分布的次级声源予以控制,闭合曲面可以包围声源,也可以将其排除在外,也就是说,它既可控制曲面外的无限空间声场,也可以控制曲面内的有限区域;P. A. Nelson 等提出了以单极子声源为次级声源、以点声源的辐射功率为代价函数的辐射功率模型,该理论推动了有源消声的工程应用^[3]。国内对各种声学环境中的有源消声机理也开展了大量研究。文献 [5] 认为当初级通道声时延时,有源消声等效于滤波问题,而当初级通道声时延小于误差通道声时延时,有源消声等效于预测问题,这两种情况下消声机理是不同的;文献 [6] 认为对于弹性结构封闭空间,当结构 - 声腔耦合较弱时,次级声源基本上只能抵消声腔模态,但结构 - 声腔耦合较强时,次级声源不但能抵消声腔模态,而且对抵消与声腔模态耦合良好的结构模态辐射声也有作用;文献 [4] 对平面噪声场中单极子源、偶极子次级声源辐射声功率最小时的空间有源消声机理进行了研究,指出尽管此时次级声源是“能量吸收”结构,但是仍然存在空间能量转移现象。

1.2 管道有源消声理论研究

管道中的噪声控制,以往主要采用阻性和抗性消声器的方法:阻性消声器对低频噪声效果很差;随着噪声频率的降低,抗性消声器的体积变得庞大,造价随之增加。管道中安装了上述两种消声器后,会产生一定的阻力,引起压力损失,影响出力和供风,给风机增加额外的负载,反而使风机的噪声升高。有源消声在低频段性能优越,以很小的体积就可以获得很好的消声效果,而且不会造成气流的压力损失。这是 ANC 率先在管道中得到应用的一个重要原因,另外一个原因就是管道中,一般均假设初级噪声频率小于管道截止频率,则初级声场就是平面波声场,因而声场分析就大大简化了。文献 [3] 从理论上研究了管道有源消声的原理,得出结论:当初级声源和次级声源由无限远处逐步靠近时,能量机制逐渐以空间转移的形式向多极子场过渡,对于单次级声源管道有源消声,当次级声源为单指向性声源时,消声机制主要表现为对次级声源能量的吸收。文献 [7] [8] 对管道有源消声的理论分析模型作了详细的探讨,建立了气流管道有源消声器声学性能分析的理论模型,该理论模型对气流管道的有源消声器的设计具有指导作用。

1.3 空间有源消声理论研究

目前,对于管道有源消声认识较为深入,但在三维空间,特别是封闭空间,由于空间声场环境的复杂性和控制难度的增大,有源消声尚存在一些困难。因此很多学者对各种空间有源消声的声场环境进行理论分析,假设传声器、噪声源、次级声源的声学特性,以声学分析的方法对空间 ANC 的实现进行理论指导。

目前国内外该领域的研究非常活跃。Nelson^[9]等从声压和辐射功率的角度讨论了单极子和偶极子在平面波声场中的吸收情况,但对于高阶一维多极子源和高阶多维多极子源没有进行分析;文献 [10] 根据声学波动理论,提出了封闭空间内对单极子声源的局部有源消声方法,认为次级声源与误差传声

器距离较近时才能达到较好的消声效果；文献 [11] 从理论上讨论了次级声源为点声源时的空间有源消声特点，以远场声压为零出发，得到了初级声源为分布声源时次级声源输出强度的表达式，认为空间声压为零的条件与系统辐射功率最小的条件是一致的。

1.4 传声器、次级声源的最优化研究

在空间有源消声中，误差、初级传声器与次级声源阵列的数量、布放对消声效果影响很大，而且在不同声学环境中，其布放方式均应当有所不同。这就涉及到不同环境中，从声学理论分析、模型假设的角度对传声器、初级声源进行最优化计算的问题。文献 [12] 对一个以点声源为次级声源的自适应有源消声系统中误差传声器的个数及位置的优化选择进行了研究，并结合控制系统的性能特点给出了优化方法，得出“误差传声器应当放置在实现消声后声压的极小方向”这一结论；文献 [13] 理论分析了次级声源由单极子声源组成的情况下每个次级声源输出、次级声源间距、初/次级声源距离、次级声源阵列数目等因素对消声效果的影响。

2 有源消声实现技术

有源消声研究的最终落脚点在实际应用，因此 ANC 实现技术的研究是 ANC 研究领域的重点，其中的核心内容是有源消声控制器的自适应控制算法。目前 ANC 系统实现结构主要分为基于模拟电路的简易 ANC 系统、基于微机的通用 ANC 系统、基于微处理器的 ANC 应用系统三种。这三种结构形式各有特点。

2.1 有源消声自适应控制算法研究

自适应滤波技术使得消声系统能够连续不断地跟踪噪声源及环境参数的变化，自动选取控制参数，从而保证最佳工作状态，由此构成自适应有源消声（Adaptive Active Noise Control, AANC）系统，AANC 系统的关键在于其控制算法，最为常用的是 LMS、FLMS、RLS、滤波-U、多误差 LMS 等算法^{[2][3][23][24]}。LMS 算法被广泛应用，它的优点是简单易行，但也存在一些不足：采用常数步长，因而收敛较慢，当初级噪声为有色噪声时，算法的收敛性较差；由于收敛较慢，宽带消声效果差，难以跟踪时变噪声。为此提出了很多改进型^{[3][14]}。另外，文献 [15] 运用 PID 算法进行控制，在消声室中取得了单频噪声 30 dB 左右、1/3 倍频程噪声 20 dB 左右的消声效果；候宏等^[16]将神经网络 BP 算法应用于有源消声，并给出该算法的递推公式，取得了较好的消声效果，稳定性也大为增强。

2.2 基于模拟电路的有源消声控制器

早期的有源消声控制器是由模拟电路来完成信号处理任务，它通过求取声学通道传递函数，建立数学模型，然后依据经典控制理论，采用低阶模拟电路进行控制^[17]。模拟电路有源消声控制器的优点是成本低、体积较小，但是模拟电路系统的不足很明显：消声效果和性能受限制，系统运行不稳定，易受多种环境因素干扰而产生自激啸叫，控制算法和参数较为固定，不易灵活更改，控制性能受电路阶数限制，提高阶数会导致系统体积增大；另外系统缺乏跟踪能力，自适应系统由于稳定性问题阻碍了它的进一步实用。

2.3 基于微机的有源消声控制器

通用微机有源消声是一种既经济又有效的途径。微机控制技术的优点在于可以方便、灵活地实现初步的自适应功能，对参数不断地进行动态调整，维持系统的最佳消声状态，适用于有源消声的实验研究和实际应用中便携性要求不高的场合。文献 [18] [19] 在空间有源消声中取得了较好的效果，运用 LMS 算法、模糊控制算法、神经网络算法进行消声控制，取得的单频噪声消声量最高达 40 dB，窄带噪声最高消声量可达 25 dB；文献 [15] 运用 PID 算法进行控制，分别采用单次级声源和双次级声源系统在消声室中进行实验，取得了单频噪声 30 dB 左右、1/3 倍频程噪声 20 dB 左右的消声效果。

2.4 基于微处理器的有源消声控制器

通用微机控制实现有源消声虽然有诸多优点，例如通用性好、便于灵活升级等等，但是要想方便实现有源消声多种多样的实际应用，基于微机的有源消声系统未免过于庞大，诸如 TMS、DSP 等微处理芯片计算速度、存储容量、接口控制等方面的功能越来越强，为有源消声系统在体积更小的微处理

器系统中的实现打下良好基础。陈克安^[3]等人于1991年研制了“NPU-307自适应有源消声器”，它以TMS320C25芯片作为中央处理单元，在半消声室、混响室进行实验，在主次级声源前方1m、30°开角最大降噪量达到25 dB。基于微处理器的有源消声系统中一个重要问题是传声器、次级声源的通道数、滤波器阶数与微处理器的计算速度之间的平衡，目前涌现了多种性能优良、计算量小的滤波器控制算法，而且高速微处理芯片升级越来越快，因此我们有理由相信，基于微处理器的空间有源消声大有可为，是空间ANC系统实用化的主要发展方向。

3 有源消声应用及产品

有源消声经过近20年的发展，在有源消声耳机、管道有源消声、局部空间有源消声等领域成功应用，国内外陆续有相应的专利和产品问世。

3.1 有源消声耳机与耳罩

有源消声耳机与耳罩可以应用于很多场合，如发动机实验室和生产车间、飞机驾驶舱和客舱、火车驾驶室和乘客车厢、坦克驾驶舱、工厂厂矿、高噪声环境中的无线对讲通讯系统及其他存在连续低频噪声的场合。有源消声耳罩可以看作是有源消声技术在空间一个点上的应用，是空间有源消声的一种简单化模型，目前最有可能产品化。国外对有源消声耳罩的研究已经比较完善，目前已有较为成熟的产品出售^[25]，国内在该领域虽取得了一定的研究成果、申请了发明专利，但还没有真正进行产品的实用化推广。

有源消声耳机控制器有模拟式和数字式两大类型，其中模拟式控制器具有体积小、成本低、实现易等特点，但是同时也存在稳定性欠佳、不易调节、适应性较差等不足。目前国内有源消声耳罩控制器主要采用模拟电路。清华大学张耿等人^[17]以频率特性函数和传递函数为基础，采用二阶模拟电路实现前馈加反馈的有源消声复合控制器，该结构已获国家专利。英国艾塞克斯大学的O. Jones和R. A. Smith采用数字式自适应结构设计出了同步有源消声耳罩。在美国主要有NCT、Telex、Bose、Sennheiser、Koss等公司生产有源消声耳机，其价格从200到1000美元不等。

3.2 管道有源消声实例

管道有源消声可以应用于建筑物供热管道、通风管道、空调管道、烟囱或其它大型管网中的消声，也可以应用于汽车、摩托车排气管道的消声。许多汽车制造厂家正在研究车用排气管道的有源消声器，虽然目前造价高于传统消声器，但是它不会增加排气阻力，可省油5%，还能减少废气的排放量。这对于今后新型汽车的环保要求无疑是非常有吸引力的。另外，空气压缩机、泵中管道的有源消声研究已经较为成熟，正在陆续投入使用。国内关于该领域的研究起于20年80年代初，采用基于数字信号处理系统的自适应滤波器，可以在很宽的频率范围实现较为复杂的相频和幅频特性，而且即使管道系统的一些物理参数发生变化，滤波器的参数会自适应调整，以保证管道下游的消声效果最好^[20]。

3.3 局部空间有源消声应用

目前有源消声还不能很好实现全空间的有源消声，这在复杂声场分析、控制稳定性、次级声源阵列等方面尚有一些问题有待解决，但是目前的技术条件还是可以实现特定情况下的局部空间有源消声，如船舶舱室、飞机舱室、汽车驾驶室内局部工作空间的有源消声^{[21][22]}，次级声源嵌入在座椅的内部，不影响座椅的外观和舒适；日本蓝鸟汽车公司正在研究把有源消声技术应用于其高级轿车座椅头部的局部空间有源消声，从而提高乘坐舒适性。目前局部空间有源消声的研究正在逐步深入，研究目标是实现任意指定声学环境和空间范围内的有源消声。

4 有源消声技术存在的问题和发展方向

有源消声技术虽然在声学理论、实现技术和方法等方面取得了长足进步，并且随着数字信号处理器和现代控制算法的进步，其研究与应用在深度和广度上日益发展，但仍存在诸多难点有待解决：

(1) 空间有源消声：从总的情况来看，三维空间有源消声的研究仍处于实验室阶段，几乎没有成

功的实际应用实例，这主要是由于以下一些问题尚待解决：(a) 空间有源消声的机理研究不够深入彻底，例如消声过程的能量转化机理等；(b) 空间消声的基本单元及其消声的空间特性，尚缺乏满足实际应用要求的简单、有效的消声结构；(c) 复杂的外界环境条件对消声效果的影响，这些外界条件包括声学环境、物理条件、声学器件特性等，而且目前的自适应控制算法尚未在实际应用中很好地解决该问题。

(2) 时变噪声信号的控制：现在空间有源消声的实验报道大多数是针对单频或窄带噪声信号，一旦初级声源是非线性、时变信号，其自适应控制算法就不能保证消声系统的稳定性和较好的消声量，往往造成控制系统不能收敛，引起啸叫，所以针对实际应用中常常出现的时变噪声信号，如何有效地进行控制是空间有源消声走向实用的一个重要问题。

(3) 产品实用工程化中的稳定性问题：目前有源消声实用化程度较高的产品是有源消声耳机和管道有源消声设备，但是都在不同程度上存在稳定性问题，在受到一些意外的环境干扰时，产品常常不能正常工作，影响了产品的进一步推广。例如国外的开放式有源消声耳机，当声级过高时有可能造成信号过载；而且在高声级的低频噪声环境中会出现明显的“挤压”现象。

(4) 有源消声中电声器件研究：作为有源消声的换能器的元件（包括压电陶瓷、电动激励器、扬声器等）要想适应有源消声的实际应用还需要在可靠性、稳定性等产品性能方面作进一步的提高。对于一般的电声设备，并不需要对其连续工作时间作过多的要求，但是应用于有源消声（如发电厂房），其电声器件就需要连续不停地工作数十年，因此对传声器、扬声器的可靠性、稳定性、技术指标偏移和寿命等方面提出了更高的要求，这也是有源消声走向实用的一个重要障碍。

综上所述，当前有源消声技术的研究侧重点和发展方向可归纳为：

- 各种声学环境下有源消声机理的研究；
- 适用于有源消声应用需求的声学器件（传声器、扬声器等）的研究；
- 兼有运行稳定和计算快速的自适应有源消声实时控制算法的研究；
- 以各种快速数字信号处理芯片为核心的有源消声应用系统的开发；
- 各种复杂声学环境下有源消声系统的稳定性、可靠性研究。

5 结语

虽然有源消声技术还存在上述问题和困难，但是有理由相信，人们对高品质生活的不懈追求和日益进步的科技水平最终会克服这些技术障碍，带给人们一个更加宁静、舒适的新世纪。

参考文献：

- [1] European Commission. Green paper—Future Noise Policy [J], NII, 1997, 5(2): 77-98.
- [2] Eriksson, L. J. Recent trends in the development of active sound and vibration control systems [A], Proc. Noise - Con ' 1994: 271-278.
- [3] 陈克安, 马远良. 噪声源有源噪声控制—原理、算法及实现 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1993.
- [4] 冯津伟, 沙家正. 空间有源消声的声能量流研究 [J]. 声学学报, 1996, 21(5).
- [5] 陈克安, 马远良. 自适应宽带有源消声 [J]. 声学学报, 1994, 19(2).
- [6] 陈克安, 马远良等. 弹性结构封闭空间有源消声理论研究 [J]. 振动工程学报, 1993, 6(4).
- [7] Munjal M L, Eriksson L. J. An analytical, one - dimensional, standing - wave model of a linear active noise control system in a duct [J]. Journal of Acoustical Society of America, 1988, 84.
- [8] 季振林, 沙家正. 气流管道有源消声器声学性能分析 [J]. 南京大学学报, 1995, 31(4).
- [9] Nelson P A, Elliott S. J. Active Control of Sound [M]. Academic Press, 1992.
- [10] 张瑞红, 王峰林. 封闭空间局部有源消声理论及仿真研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(1).
- [11] 王冲, 孙进才. 分布声源的有源消声理论研究 [J]. 振动工程学报, 1993, 6(2).
- [12] 王冲, 孙朝晖. 自适应空间有源消声中误差传声器的位置及个数优化 [J]. 声学学报, 1994, 19(3).
- [13] 韩飞, 沙家正. 空间有源消声中的次级源阵列的研究 [J]. 南京大学学报, 1996, 32(3).
- [14] 许昌春, 吴正国等. 应用于有源消声的变换域 LMS 算法 [J], 海军工程学院学报, 1997, 78(1).
- [15] 冯津伟, 杜学超等. 空间有源消声的微机控制 [J]. 应用声学, 1997, 16(2).

- [16] 侯宏, 杨建华等. 神经网络 BP 算法在有源消声中的应用 [J] . 西北工业大学学报, 1999, 17 (1) .
- [17] 朱彦武, 连小珉等. 复合式新型有源消声耳罩 [P] . 中国专利, 94204976.4.
- [18] 徐永成, 陈循等. 基于微机控制实现的自适应有源消声 [J] . 国防科技大学学报, 1996, 18 (2) .
- [19] 温熙森, 陈循, 徐永成等. 基于模糊策略的有源消声技术研究 [J] . 振动工程学报, 1997, 10 (1) .
- [20] 李毅民. 与阻性消声器结合的自适应管道有源消声器 [J] . 应用声学, 1992, 11 (3) .
- [21] Jay Warner. Active noise control in an off - road vehicle cab [J] . Noise & Vibration Worldwide , 1995 , (7) .
- [22] Dr. Colin Ross. Quieter air travel takes off with active noise control [J] . Noise & Vibration Worldwide , 1993 , (1) .
- [23] Sommerfeldt. SD, Nashif. P J. An adaptive Filtered - X algorithm for energy - based active control [J] . J. Acoust. Soc. Amer , 1995 (1) .
- [24] E. Eweda. Comparison of RLS , LMS and sign algorithms for tracking randomly time - varing channels [J] . IEEE transactions on signal processing , 1994 , (11) .
- [25] GMMT. Active noise - reduction headsets for fighting vehicles [J] . Noise & Vibration Worldwide , 1994 , (2) .

