

## 基于微机控制实现的自适应有源消声\*

徐永成 陈 循 温熙森 唐丙阳 陶利民

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

**摘 要** 提出一个以微机为核心的自适应有源消声系统,该系统能为研究不同系统结构的有源消声提供一个灵活的实验平台。文中采用LMS算法为自适应滤波控制器,能自动补偿背景噪声、环境参数和电声参数变化对消声效果的影响,能在较宽频带内取得显著的消声量。实验结果表明:在双次级源的自由空间布放方式下,该系统对50~400Hz范围内的单频、窄带随机噪声取得的最大消声量在40dB以上。

**关键词** 有源消声, 自适应控制系统, 噪声控制

**分类号** TB535

## Adaptive Active Noise Control Based on the Micro-computer Control

Xu Yongcheng Chen Xun Wen Xisen Tang Bingyang Tao Limin

(Department of Mechantronics Engineering and Instrumentation, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** An adaptive active noise control system based on micro-computer is presented in this paper. This system can supply an agile experimental platform for the research of different system construction and control algorithm. This paper adopts LMS algorithm as an adaptive filter controller, which can automatically compensate for the effect on noise control caused by the changes of the background noise, environment factors and electrical or acoustical parameters. It can accomplish notable broad-band noise attention. The results of experiments show that under the condition of two secondary sound resources arranged within free space, the maximum attention level obtained by the system is more than 40dB to the single frequency and barrow-band random noise from 50 to 400Hz.

**Key words** active noise control, adaptive control system, noise control

\* 1995年9月11日收稿

随着自适应滤波技术、计算机技术、大规模集成电子技术的迅速发展,有源消声技术的控制系统小、重量轻、低频降噪效果好的优点日渐突出,并且越来越容易实现,其成本也迅速下降,已经引起人们的高度重视和浓厚兴趣。

据最新资料显示,英国、美国、日本等国家的有关科研机构已成功地利用有源消声技术完成了大型客机和高级轿车内的噪声抵消实验<sup>[1]</sup>;国内也有数家单位在进行有源消声的研究,并取得了较大进展<sup>[2]</sup>。从应用领域来看,管道中的有源消声技术已经成熟<sup>[3][4]</sup>,在国内外都已进入实用阶段,现在的研究热点是三维空间的噪声控制和实用化技术。

管道中只有平面波存在时,消声比较容易,而在声场复杂的三维空间中,要在指定的消声空域各点均产生一个与原噪声等幅反相的声音与原噪声抵消比较困难。以前管道消声系统由放大、相移等模拟电路组合而成,空间消声则需多路次级声源并行工作。要做到模拟控制电路频响平直、相位无畸变、放大倍数和相移独立可调比较困难,用模拟电路的方法来实现背景噪声和环境参数复杂多变的空间有源消声是不太现实的。

随着自适应控制技术、计算机技术的飞速发展和数字处理器件的日渐成熟,空间有源消声向数字化、计算机化方向发展已成必然。本文建立了一个以高性能微机为核心的自适应有源消声系统,以此为基础,可以进行各种系统结构和控制算法的原理性实验,例如分别对不同的次级声源结构进行空间有源消声对比实验和性能评价;对各种自适应控制算法的实现方法和性能指标进行对比研究等等。该系统为噪声场测试分析和有源消声提供了一个结构灵活、功能完善的研究实验平台。

## 1 自适应滤波器算法

自适应滤波的核心在于选择一个稳定性好、计算量小、收敛速度快的算法。由于横向结构的有限冲激响应滤波器实施方便,最小均方(Least Mean Squares)算法计算简单,因而本文采用基于 LMS 算法的横向结构自适应滤波器来实现有源消声。

图 1 为单通道消声系统原理图,  $L_p$  为初级声源,  $L_s$  为次级声源,  $M_p$  为初级传声器,  $M_s$  为误差传声器,  $X_j$  为滤波器参考输入,  $Y_j$  为滤波器输出;  $E_j = D_j - Y_j$ , 其中  $E_j$  为误差信号,  $D_j$  为初级声源在消声区域的声音输出。

$x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Lj}$  采用同一信号的不同延迟组成延时线抽头形式的所谓横向 FIR 结构,令横向结构的自适应滤波器的权系数矢量和参考输入矢量为(式中  $L$  为自适应滤波器长度)

$$W(j) = [w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{Lj}]^T \quad (1)$$

$$X(j) = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Lj}]^T \quad (2)$$

为了提高计算控制速度,本文采用 Widrow 和 Hoff 运用最陡下降法提出的递推 LMS 算法,算法全过程如下,其中  $u$  为收敛系数。

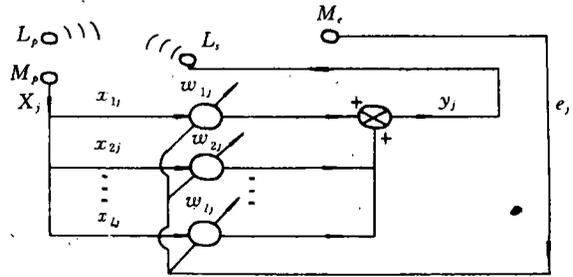


图 1 基于 LMS 算法的自适应滤波控制器原理图

$$y(j) = W^T(j)X(j) \quad (3)$$

$$e(j) = d(j) - W^T(j)X(j) \quad (4)$$

$$W(j+1) = W(j) + 2ue(j)X(j) \quad (5)$$

## 2 自适应有源消声系统的软硬件实现

为了能灵活地进行有源消声的原理性实验，建立了一个以微机为核心的自适应有源消声系统。由于自适应数字滤波技术的飞速发展，可以在微机平台上灵活地进行各种控制算法的仿真和性能比较。486DX4 型微机较快的浮点运算速度为控制理论在有源消声中的应用奠定了基础。由于有源消声主要应用于低频噪声的抵消，因而控制实时性可以得到满足。该实验系统总体结构如图 2 所示。

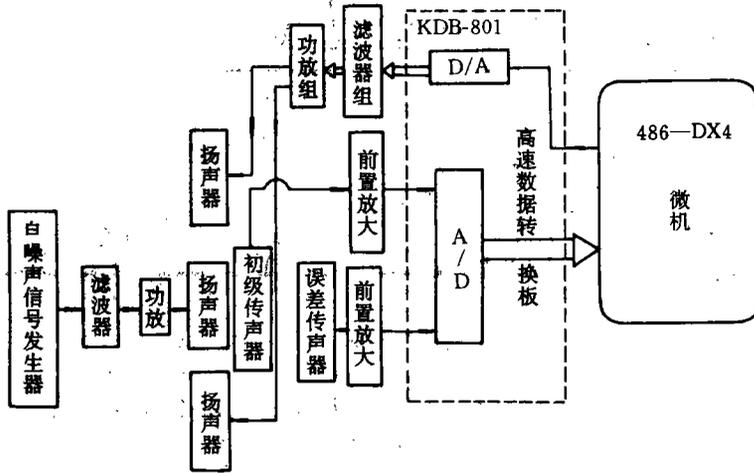


图 2 基于微机的自适应有源消声系统结构

采用单个次级声源和单个误差传感器的自适应有源消声(AANC)系统称为单通道系统。对于三维空间有源噪声控制，单个次级声源和单个误差传声器只能在有限的空间里取得有限的降噪量。扩大消声空间和加大消声量的根本途径之一就是采用多通道 AANC 系统，权衡次级声源数目和控制实时性之间的矛盾。本文采用双通道 AANC 系统。

将信号发生器经带通滤波器后产生的单频、窄带随机噪声信号作为初级声源。两个次级声源分立于初级声源两侧并成 120 度夹角，误差传声器位于初级声源正前方两个次级声源的中垂线上。为了避免次级声源对初级传声器产生声反馈，从而影响控制系统的稳定性，本系统采用指向性较强的初级传声器，并且将初级传声器紧靠初级声源。

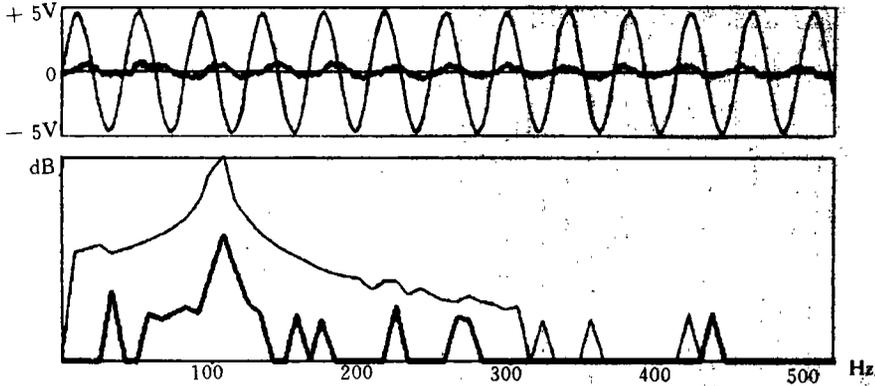
在消声实验中，通过采用“噪声场测量、分析和有源消声控制软件”，可以测量空间噪声场，分析噪声场的空间分布和得到噪声信号的频域谱图；微机在进行 I/O 操作、计算控制的同时，实时记录消声前后的初级、误差传声器的声压值；然后对其进行时域、频域分析，得到时域、频域的消声量分布图。

根据实验经验，(1)、(2) 式中的 LMS 自适应滤波器长度  $L$  取为 20，既考虑到控制过程的平稳性，又兼顾到控制的实时性；另外合理选取 (5) 式中的系统收敛系数  $u$  值对

消声系统收敛速度和稳定性影响很大： $u$  值越大，收敛速度越快，但可能导致控制过程振荡、甚至发散； $u$  值越小，控制过程越平稳，但收敛速度较慢。实验中，初级噪声的中心频率越高，收敛系数  $u$  值应取得越大。例如  $f=70\text{Hz}$ ,  $u=0.012$ ； $f=400\text{Hz}$ ,  $u=4.0$ ，这样既能获得较快的收敛速度，又能保证控制过程的平稳性。

### 3 实验结果

图 3 表示初级噪声为 100Hz 的单频信号时，采用 LMS 自适应控制算法，在消声区域得到的消声前后噪声信号的时域波形图和频域消声量图。



(1) 137.6	30.2013	(2) 48.57	29.8735	(3) 24.29	29.7603
(4) 40.48	28.7314	(5) 46.19	28.6301	(6) 89.05	28.3
(7) 145.7	28.2887	(8) 8.096	27.9525	(9) 97.15	27.1641
(10) 161.9	25.0859	(11) 80.96	23.0389	(12) 178.1	22.1566

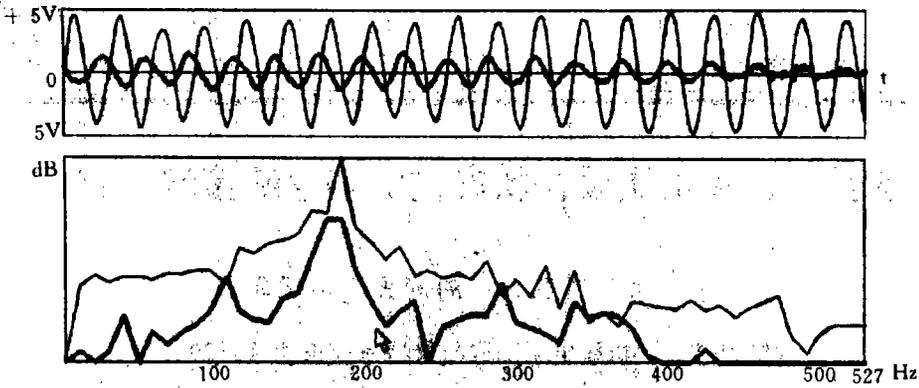
第 1 段 消声前/后该段总能量比：297185/2620 该频段总能量降噪量：41dB

图 3 采用 LMS 自适应算法消声前后时域波形图和频域消声量图 ( $f_0=100\text{Hz}$ )

图中上部是消声前后在消声区域由误差传声器得到的声场时域波形图，在实际测量中对其进行了归一化处理；下部是消声前后声场信号的频谱图，纵坐标是相对声压级（单位 dB），图中细线为消声前的信号，粗线为消声后的信号。图中附表显示了消声频谱里降噪量最大的 12 个点，前值是频率，后值是该频率点的降噪量（单位 dB）。因为纵坐标进行了对数运算，所以在频谱图中，只有最高峰值点附近具有较大的绝对声能，其余较小的峰值相对比值较大，绝对能量值较小，对总的消声效果的贡献不大。表 1 的“该频段总能量降噪量”综合反映了实际消声效果。由图可知：对 100Hz 的单频噪声来说，有源消声系统采用 LMS 自适应控制算法有显著的消声效果，消声频带较宽，消声量可达 40dB。

图 4 表示初级噪声为中心频率 150Hz、带宽 100Hz 的窄带随机噪声时，在消声区域得到的消声前后噪声信号的时域波形图和频域消声量图。数据表明本文建立的空间有源消声实验系统对带宽近 100Hz 的窄带随机噪声有明显的消声效果，消声量可达 20dB 以上。

用该实验系统还进行了 70~400Hz 的单频噪声和中心频率为 100~300Hz、带宽 100Hz 的窄带随机噪声的抵消实验，得到了同样的实验结论。表 1 是在初级噪声源信号为单频或窄带随机时，根据误差传声器测得的消声前后总声能之比得到的不同频率噪声的消



(1) 231.6	23.0245	(2) 18.53	21.5234	(3) 46.33	21.2137
(4) 129.7	19.3239	(5) 64.86	17.3999	(6) 27.8	17.1011
(7) 305.8	16.8818	(8) 203.8	16.6532	(9) 454	16.6372
(10) 120.5	16.4203	(11) 213.1	16.2249	(12) 9.266	16.0437

第1段 消声前/后该段总能量比: 169618/9207 该频段总能量降噪量: 25dB

图4 采用LMS算法对窄带随机噪声进行消声的实验结果图图 ( $f_c=150\text{Hz}$ )

声量,表明对单频噪声采用LMS算法的有源消声系统可以取得很显著的消声效果,可消声的频宽达350Hz,最大消声量达40dB;对窄带随机噪声的消声量最大也可达25dB。

表1 不同频率噪声的消声量

初级噪声频率(Hz)	70	100	150	200	250	300	350	400	150*	250*
LMS算法降噪量(dB)	26.2	41.1	25.6	20.3	14.2	19.0	14.2	7.70	25.0	12.1

(其中带\*号的指中心频率为该值、带宽为100Hz的窄带随机噪声)

实验证明,本文建立的以微机为核心的自适应有源消声系统具有结构灵活、性能可靠、功能完善的特点,能为各种有源消声技术的研究提供一个灵活的实验平台。本系统采用LMS算法,能在较宽频带里取较大的消声量。在我们后续的研究中,将针对空间有源消声的非线性特点,利用运算速度更快的微处理器,采用多路并行处理策略,探讨更优异的控制算法(如基于模糊控制或神经网络的有源消声方法),以获得更大的消声空间和消声量。

### 参考文献

- 1 Elliott S J, Nelson A, Stothers I M, et al. In-flight Experiments on the Active of Propeller-induced Cabin Nabin Noise, J. Sound and Vib., 1990, 140(2): 219~238
- 2 史新华, 马远良. 自适应有源消声系统: 系统分析及一种新的控制算法. 应用声学, 1993, (1): 17~21
- 3 Burgess J C. J. Acoust. Soc. Am., 1981, 70(3): 715~726
- 4 Eriksson L J, Allie M C. A practical System for Active Attenuation in Ducts, Sound/Vib., 1988: 30~34
- 5 徐永成. 噪声场测试分析与基于智能模糊控制策略有源消声的实验系统研究: [学位论文], 长沙: 国防科技大学, 1996

(责任编辑 卢天颢)