

基于 SPU-McFxLMS 算法的涡桨飞机舱内噪声主动控制研究*

沈 昊¹, 董宁娟², 薛 青², 陈逸笑², 鹿澳沅¹, 沈 星¹

(1. 南京航空航天大学航空学院 南京, 210016)

(2. 中国飞机强度研究所 西安, 710065)

摘要 涡桨飞机座舱的主动噪声控制系统普遍采用传统的多通道滤波 x 最小均方 (multichannel filtered-x least mean square, 简称 McFxLMS) 算法, 该算法的计算量随着通道数的增加而激增, 严重影响控制效果。针对该问题, 基于连续局部迭代-McFxLMS (sequential partial update-McFxLMS, 简称 SPU-McFxLMS) 算法, 开发了多通道主动噪声控制系统。SPU-McFxLMS 算法通过更新部分滤波器权值, 在保证收敛精度的同时能够显著降低计算复杂度。首先, 对比分析了传统 McFxLMS 算法与 SPU-McFxLMS 算法的原理差异, 通过理论推导证明其计算效率提升特性; 其次, 建立了算法仿真模型, 通过仿真验证了理论分析结果; 最后, 基于 SOM-TL6678 核心板开发了 16 通道的主动噪声控制系统, 并搭建飞机座舱地面模拟实验平台进行实验。结果表明, 该系统在 108 Hz 和 216 Hz 双频噪声场景下, 各位置的平均降噪量能够达到 10 dB 以上。

关键词 主动噪声控制; 多通道系统; 滤波 x 最小均方算法; 涡桨飞机舱内噪声

中图分类号 TB535; TH113.1

1 问题的引出

涡桨飞机具有燃油消耗低、全天候飞行和起降场地要求低等优点, 是国际军用和民用飞机市场的重要组成部分。涡桨飞机舱内过大的噪声会造成飞机结构疲劳、飞机使用寿命降低等问题, 成为制约涡桨飞机进一步发展的技术瓶颈。涡桨噪声是涡桨飞机的主要噪声源, 其典型频谱是在宽带噪声的基础上叠加一系列线谱噪声, 主要能量分布在桨叶通过频率处及其前几阶谐波分量上, 通常不超过 500 Hz。图 1 为涡桨飞机噪声典型频谱图^[1]。

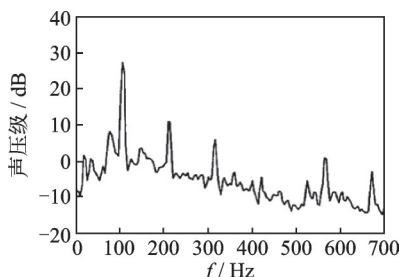


图 1 涡桨飞机噪声典型频谱图

Fig.1 Typical frequency spectrum of turboprop noise

噪声控制方法主要分为 2 种: ①被动噪声控制 (passive noise control, 简称 PNC), 即利用声学材料和声学结构使噪声的能量转化为热能; ②主动噪声控制 (active noise control, 简称 ANC), 即利用声波相消干涉原理, 控制次级声源发出与噪声幅值相同、相位相反的声波。PNC 对波长较长的低频噪声控制效果不佳^[2], 而 ANC 则能有效抑制低频噪声, 且系统体积与重量也相对较小。因此, ANC 对于涡桨飞机舱内噪声控制更加合适。

ANC 在提出之时便用于涡桨飞机舱内噪声控制。英国的研究者在 BAE748 飞机上使用 32 个麦克风和 16 个扬声器进行飞行实验, 在螺旋桨基频及其谐波处分别成功降噪 13、9 和 6 dB^[3-4]。我国研究人员在运七飞机上实现了基频处最大噪声降为 22.6 dB (平均 13.4 dB)、在其二次谐波处最大噪声降为 14 dB (平均 5.5 dB) 的降噪效果^[5]。

上述实验采用经典 McFxLMS 算法, 当 ANC 系统的通道数和滤波器权系数的阶数增加时, McFxLMS 算法的计算量将会急剧膨胀, 最终影响控制效果。针对该问题, 学者们对 McFxLMS 算法进行了改进。例如: 滤波 e 最小均方 (filtered-e least mean

* 航空科学基金资助项目 (2024Z009052003); 强度与结构完整性全国重点实验室开放基金资助项目 (ASSIK-FJJ202303001); 南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金资助项目 (BCXJ25-06)

收稿日期: 2022-11-09; 修回日期: 2022-12-08

square, 简称 FeLMS) 算法对 FxLMS 算法结构进行了改进, 省去了对参考信号的滤波处理, 使该算法的计算量显著减小^[6-7]。分块 x 最小均方 (filtered-x least mean square, 简称 FxLMS) 算法通过减少滤波器权系数的更新频率来降低计算量^[8]。变换域算法使用快速傅里叶变换将主信号和参考信号转换到频域, 将时域中的卷积运算转换为频域中的乘法运算, 从而降低计算量^[9-10]。符号 FxLMS 算法的目标函数为误差信号的绝对值, 减少了权系数更新过程中的运算次数^[11-12]。局部迭代算法在一次迭代周期中只对滤波器权系数的一部分进行更新, 能够显著降低计算量^[13-14]。

SPU-McFxLMS 算法以简单直接的形式降低计算量, 易于实现, 目前应用较为广泛。笔者基于该算法建立多通道主动噪声控制系统, 通过调节相关参数来平衡计算量与降噪性能之间的矛盾。首先, 对 2 种算法进行理论推导, 分析得到 SPU-McFxLMS 算法在大幅降低计算量的情况下, 能取得和 McFxLMS 算法接近的降噪性能; 其次, 在初级噪声为双频噪声的情况下对 2 种算法进行仿真对比; 最后, 基于 SOM-TL6678 核心板设计了搭载这 2 种算法的多通道主动噪声控制系统并进行实验。

2 多通道主动噪声控制算法

2.1 McFxLMS 算法

图 2 为多通道主动噪声控制系统示意图。假设该系统含有 I 个参考传声器、 J 个次级声源和 K 个误差传声器。每个参考传声器与每个误差传声器之间都存在一条初级路径, 共有 IK 条次级路径, 并以 P_{ik} 表示第 i 个参考传声器与第 k 个误差传声器之间的初级路径。相应的, 每个次级声源与每个误差传声器之间也都存在一条次级路径, 共有 JK 条次级路径, 以 $S_{jk}(n)$ 表示第 j 个次级声源与第 k 个误差传声器之间的次级路径。其中: $\hat{S}_{jk}(n)$ 为对次级路径 $S_{jk}(n)$ 的建模估计; n 为时刻。

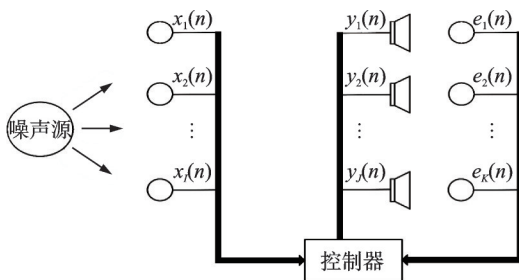


图 2 多通道主动噪声控制系统示意图

Fig.2 Diagram of multichannel active noise control system

以 $x_i(n) = [x_i(n) \ x_i(n-1) \ \cdots \ x_i(n-L+1)]^T$ 表示第 i 个参考传声器采集得到的参考信号数组, 其中: L 为控制滤波器权系数的阶数。 $y_j(n) = [y_j(n) \ y_j(n-1) \ \cdots \ y_j(n-M+1)]^T$ 表示第 j 个次级声源在第 n 个时刻的输出信号, 其中, M 为次级路径模型的阶数。由于每个次级声源的输出信号都需要所有的参考信号参与运算得到, 因此共需要 IJ 个控制滤波器。 $W_{ij}(n) = [w_{ij1}(n) \ w_{ij2}(n) \ \cdots \ w_{ijL}(n)]^T$ 表示相应的控制滤波器在第 n 个时刻的权系数。 $e_k(n)$ 表示第 k 个误差传声器在第 n 个时刻采集得到的误差信号。 McFxLMS 算法的目标函数为各误差信号的均方和, 即

$$J(n) = \sum_{k=1}^K E[e_k^2(n)] \quad (1)$$

由于在实际应用时不可能记录每一时刻的误差信号, 因此以瞬时误差的平方和代替目标函数, 即

$$J(n) = \sum_{k=1}^K e_k^2(n) \quad (2)$$

其中: $e_k(n)$ 为各次级声源发出的声波经过相应次级路径到达第 k 个误差传声器后, 与该处初级噪声叠加后的残余噪声。

$e_k(n)$ 的表达式为

$$e_k(n) = d_k(n) - \sum_{j=1}^J y_j(n) * S_{jk}(n) \quad (3)$$

其中: $*$ 表示线性卷积运算; $d_k(n)$ 为第 k 个误差传声器处的初级噪声; $y_j(n)$ 由控制滤波器权系数与相应的参考信号进行点积运算得到。

$y_j(n)$ 的表达式为

$$y_j(n) = \sum_{i=1}^I W_{ij}^T(n) x_i(n) \quad (4)$$

为使目标函数取得最小值, 由最速下降法可知, 各控制滤波器的权系数应沿着目标函数的负梯度方向更新, 因此需求得目标函数对各控制滤波器权系数的梯度。将式(3)代入式(2), 得到梯度为

$$\nabla_{ij} J(n) = -2 \sum_{k=1}^K e_k(n) [x_i(n) * S_{jk}(n)] \quad (5)$$

控制滤波器权系数的更新公式为

$$W_{ij}(n+1) = W_{ij}(n) + 2\mu \sum_{k=1}^K e_k(n) [x_i(n) S_{jk}(n)] \quad (6)$$

其中: μ 为迭代步长。

由于次级路径未知, 因此只能以其建模估计的结果 $\hat{S}_{jk}(n)$ 代替真实次级路径参与运算。记滤波参考信号为 $x'_{ijk}(n) = x_i(n) * \hat{S}_{jk}(n)$, 则式(6)改写为

$$W_{ij}(n+1) = W_{ij}(n) + 2\mu \sum_{k=1}^K e_k(n) x'_{ijk}(n) \quad (7)$$

式(7)即为 McFxLMS 算法最核心的控制滤波器权系数更新公式。

2.2 SPU-McFxLMS 算法

当多通道主动噪声控制系统的通道数和控制滤波器阶数不断增加时,算法的运算量将急剧增大,这给算法的实时实现带来了阻碍。针对该问题,使用 SPU-McFxLMS 算法对 McFxLMS 算法进行了改进,其核心思想是:假定参考信号的统计特性变化较慢,算法在一次循环期间只需迭代更新部分来控制滤波器的权系数,而其余权系数保持不变。SPU-McFxLMS 算法的策略是将控制滤波器的权系数 P 等分,在每个采样周期内只更新本周期对应部分的权系数,随着迭代次数的增加,在 P 次迭代后对全部权系数完成一次更新,此后如此循环。

SPU-McFxLMS 在每个采样周期都使用当前时刻的误差信号参与运算,其权系数数组中各元素的更新公式为

$$W_{ijl}(n+1)=\begin{cases} W_{ijl}(n)+2\mu\sum_{k=1}^K e_k(n)x'_{ijk}(n-l) & ((n-l)\%P=0) \\ W_{ijl}(n) & (\text{其他}) \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\%$ 表示取余运算; l 为控制滤波器权系数数组中的第 l 个元素。

观察式(8)发现,该算法在相邻的 P 个迭代周期内都使用同一组滤波参考信号参与权系数更新,即每 P 次迭代才会计算一次滤波参考信号。因此,SPU-McFxLMS 算法不仅减少了权系数更新部分的计算量,还减少了求滤波参考信号部分的计算量。由于各控制滤波器均采用此算法更新,因此计算量显著降低。相对于 McFxLMS 算法,SPU-McFxLMS 算法对全部权系数完成一次更新需要更长时间,且每一时刻的权系数都不完全是最新值,因此该算法在收敛速度和稳态性能 2 个方面的表现均差一些,只要控制好 P 的取值,其性能的恶化程度是可接受的。

2.3 计算量对比

上述 2 种算法的计算量主要集中在 3 个步骤:次级路径模型与参考信号进行卷积运算得到滤波参考信号、误差信号和滤波参考信号参与滤波器权系数的更新,以及滤波器权系数与参考信号进行点积运算得到输出信号。设多通道自适应有源噪声控制系统共有 I 个参考传声器、 J 个次级声源和 K 个误差传声器,控制滤波器权系数的阶数为 L ,次级路径估计模型阶数为 M ,连续局部迭代算法中的系数为 P ,以一个控制周期内需要的乘加次数为指标,2 种算法计算量统计如表 1 所示。

表 1 算法计算量统计

Tab.1 Algorithm computational complexity statistics

项目	McFxLMS 算法	SPU-McFxLMS 算法
计算 x'_{ijk}	$IJKM$	$IJKM/P$
计算 W_{ijl}	$IJKL+K$	$IJKL/P+K$
计算 y_j	IJL	IJL
总计算量	$IJKM+IJKL+K+IJL$	$IJKM/P+IJKL/P+K+IJL$

为使对比更加直观,对表 1 中的各参数赋值,各参数值与后续实验相同,即 $I=1$ 、 $J=16$ 、 $K=16$ 、 $M=500$ 、 $L=200$,2 种算法的计算量对比如图 3 所示。

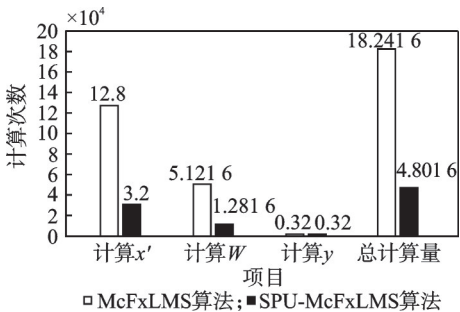


图 3 算法计算量对比

Fig.3 Comparison chart of algorithm computational complexity

可以看到,在 3 个计算步骤里,求滤波参考信号和权系数更新这 2 部分的计算量占到了总计算量的 90% 以上,又因次级路径模型的阶数远大于滤波器权系数的阶数,所以求滤波参考信号部分的计算量占比最大。SPU-McFxLMS 算法能使求滤波参考信号和更新权系数这 2 部分的计算量降至原来的 $1/P$,对计算量的降低十分明显。上述特点也使该算法对硬件的要求放低,同时降低了系统运行时的功耗,非常适用于大规模的多通道主动噪声控制系统。

3 多通道主动噪声控制系统仿真

3.1 仿真设置

使用 Matlab 软件对算法进行仿真分析,仿真设置尽量与后续实验保持一致。

某型涡桨发动机产生的噪声声压级可达 90 dB 以上,噪声能量主要集中在其桨叶通过频率 108 Hz 及其二阶谐波分量 216 Hz 处,只要能控制这 2 处频率的噪声便能有效降低整体噪声大小。因此,将初级噪声设为 108 Hz 和 216 Hz 相叠加的双频噪声。

用 64 阶有限脉冲响应(finite impulse response, 简称 FIR)滤波器模拟初级路径 $P(z)$ 和次级路径 $S(z)$,图 4 为某一初级路径的脉冲响应。

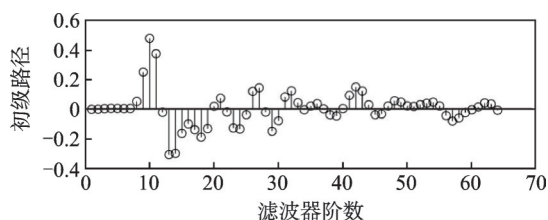


图4 初级路径的脉冲响应

Fig.4 Impulse response diagram of primary path

3.2 仿真结果

收敛速度和稳态误差是主动噪声控制算法最重要的2个性能指标。笔者建立规模为 $1 \times 16 \times 16$ (即1个参考传声器、16个次级声源和16个误差传声器)的系统模型,并对各参数进行设置:控制滤波器权系数和次级路径模型的阶数均为64,采样频率为2 kHz,步长均为 1×10^{-5} 。

通过误差信号在时域的幅值衰减速度来比较收敛速度,通过迭代至稳态后的频域声压级来比较稳态误差,分别将连续局部迭代系数 P 设置为4和16。这里仅以各算法运行25 s的误差信号1时域波形为例进行收敛速度对比,如图5所示。

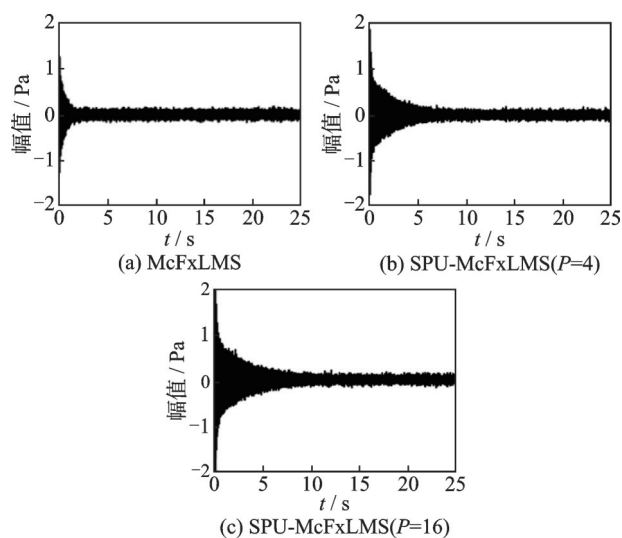


图5 收敛速度对比

Fig.5 Comparison of convergence speed

由图5可知,McFxLMS算法在2 s时收敛至稳态,而 P 为4和16的SPU-McFxLMS算法分别在5 s和8 s收敛至稳态。可见,SPU-McFxLMS算法在收敛速度上略慢于McFxLMS算法,且随着 P 值的增大,收敛速度会更慢。

算法稳态性能比较如图6所示。可以看到:SPU-McFxLMS算法表现出与McFxLMS算法接近的稳态性能;McFxLMS算法表现最好,在2个关键频率处分别有54.81 dB和40.84 dB的降噪量,总声压级降低32.61 dB; P 为4时,SPU-McFxLMS算

法在2个关键频率处分别有50.90 dB和45.23 dB的降噪量,总声压级降低30.84 dB; P 为16时,SPU-McFxLMS算法与McFxLMS算法表现相近,3个数据分别为39.52、46.54和26.31 dB;其余误差信号的表现基本一致。上述仿真结果验证了理论分析结论,在降噪性能接近的情况下,更低的计算量使SPU-McFxLMS算法更具有实际应用价值。

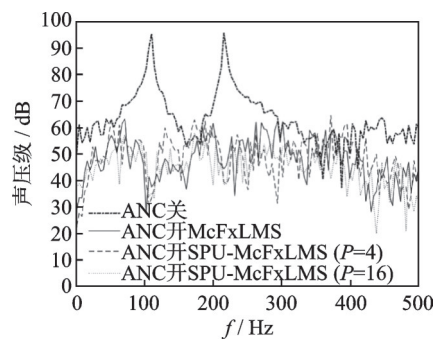


图6 稳态性能比较

Fig.6 Comparison of steady state performance

4 多通道主动噪声控制系统实验

4.1 实验系统及平台

实验采用一个内部没有安装座椅和装饰的舱段来模拟真实飞机的座舱,图7为实验舱段图。

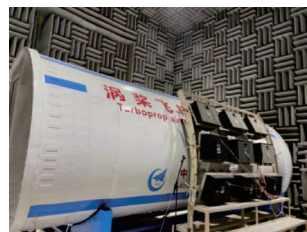


图7 实验舱段图

Fig.7 Picture of test cabin section

舱内空间长为6.4 m,宽为2.6 m,共13跨。在舱内对称布置16个误差传声器和次级声源,另外布置12个环境传声器用以测量降噪后的残余噪声。将次级声源、误差传声器和环境传声器用支架抬高约1 m。图8为实验平台俯视图。

在舱段外布置2个 3×3 排列的扬声器阵列,在舱段中部位置对称分布,来模拟涡桨飞机发动机产

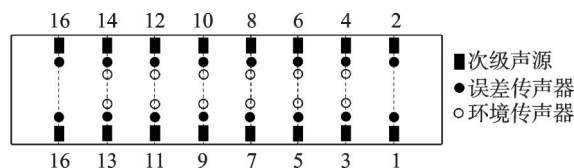


图8 实验平台俯视图

Fig.8 Top view of test platform

生的噪声。扬声器阵列如图 9 所示。与仿真条件一致,将外部声源设置为 108 Hz 与 216 Hz 叠加的双频噪声,该信号由一个布置在扬声器阵列旁的传声器采集得到,通过线路传输至控制器作为参考信号。

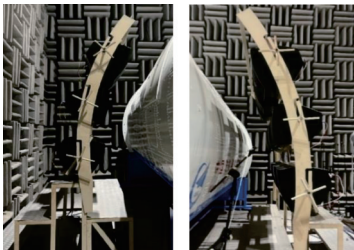


图 9 扬声器阵列
Fig.9 Loudspeaker array

图 10 为控制系统结构图,显示了各硬件设备在 ANC 系统中承担的功能和相互联系。控制器基于 SOM-TL6678 核心板开发设计,该核心板搭载 C6000 系列 TMS320C6678 八核 C66x 定点/浮点高性能处理器,其余主要硬件设备信息如表 2 所示。

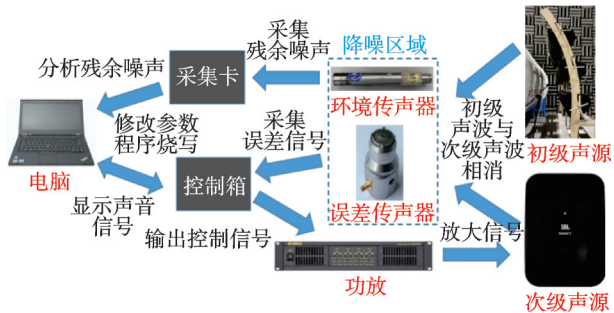


图 10 控制系统结构图
Fig.10 Control system structure diagram

表 2 硬件设备信息

Tab.2 Hardware device information		
设备	型号	主要参数
扬声器	Control X	阻抗为 8 Ω,功率为 200 W,频响范围为 50 Hz~20 kHz,灵敏度为 87 dB。
误差传声器	MPA241	频响范围为 20 Hz~20 kHz,灵敏度为 40 mV/Pa。
环境传声器	BK 4189	频响范围为 20 Hz~20 kHz,灵敏度为 50 mV/Pa。
功率放大器	IPA8200	输出功率(1 kHz 信号激励下): 阻抗为 4 Ω 时,200 W×8 通道; 阻抗为 8 Ω 时,100 W×8 通道。

4.2 实验结果及分析

实验通过主动噪声控制系统开启前后噪声声压级的变化来衡量降噪效果,主要指标为 2 个关键频

率的声压级降低量和总声压级的降低量。将初级噪声调至各位置总声压级都约为 90 dB 的水平,这时接近于涡桨飞机真实飞行时的舱内噪声水平,此后开启主动噪声控制系统。

控制系统相关参数设置如下:控制滤波器权系数的阶数为 200、次级路径模型的阶数为 500、采样率为 2 kHz、步长为 1×10^{-6} 。将局部迭代系数 P 设置为 2、4 和 16,当 $P=2$ 与 $P=4$ 时,系统收敛速度与降噪量都非常接近; $P=16$ 时,系统收敛速度与降噪量都出现了明显的恶化。可见, $P=4$ 是较为合适的取值,后续实验也在 $P=4$ 的情况下进行。

图 11 为主动噪声控制系统降噪量,显示系统运行约 1 min 后,对残余噪声测量分析得到的结果。

降噪效果最明显的序号 3 处(见图 8)控制系统开启前后噪声 1/3 倍频程对比如图 12 所示。图中的声压级均为 A 声级。可以看出,2 种算法均有不错的降噪表现。除了序号 4 处(见图 8)108 Hz 频率成分的噪声有所增加外,其余位置都有明显的降噪效果。在未开启主动噪声控制系统时,序号 4 处频率为 108 Hz 的声压级只有 70 dB 左右。控制系统开启后,声压级虽然没有降低,反而有所增加,但该处的声压级也明显小于其余位置。所有位置在 2 个关键

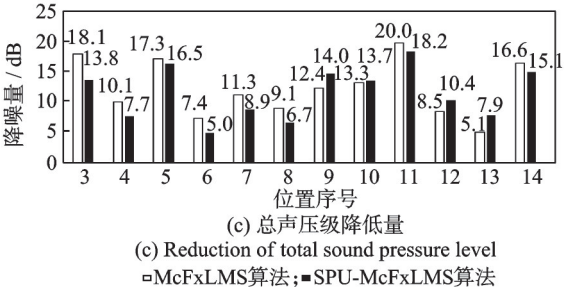
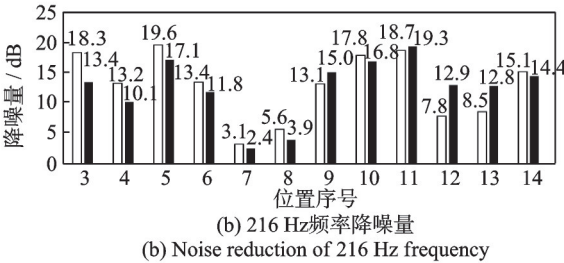
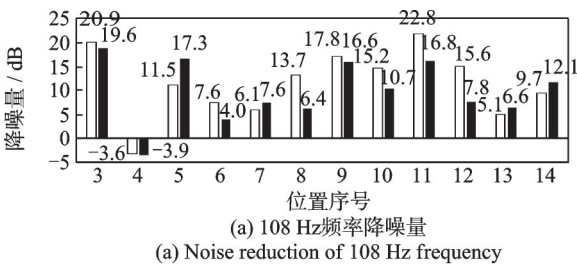


图 11 主动噪声控制系统降噪量
Fig.11 Noise reduction of active noise control system

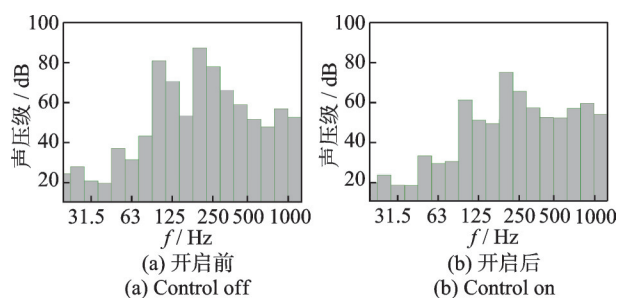


图12 控制系统开启前后噪声1/3倍频程图对比

Fig.12 Comparison of noise 1/3 octave band diagram before and after control system startup

频率处的声压级和总声压级平均降低10 dB以上,在某些位置甚至降低20 dB以上。

实验人员进入舱段给出主观感受:舱段两侧座位处的噪声明显要小于舱段中间区域,已经降至人耳可接受水平。通过多次实验发现,McFxLMS算法约在8 s时收敛至稳态,而SPU-McFxLMS算法的收敛速度稍慢,约在15 s时收敛至稳态。

5 结 论

1) 搭建了基于SPU-McFxLMS算法的多通道主动噪声控制系统。通过理论推导、Matlab软件仿真和地面模拟实验的方法,从降噪性能和计算量2个方面对McFxLMS算法和SPU-McFxLMS算法进行比较。结果表明,SPU-McFxLMS算法对计算量的降低非常显著,同时还能保证较高的降噪性能。

2) 多通道主动噪声控制实验取得了良好的降噪效果,在被控区域12个测量点位测得的关键频率声压级和总声压级平均降低10 dB以上,某些位置的降噪量甚至接近20 dB,被控区域噪声已降至人耳可接受水平。这表明SPU-McFxLMS算法可以有效控制涡桨飞机舱内的噪声,在大规模多通道主动噪声控制系统中有较好的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 陈克安.有源噪声控制[M].北京:国防工业出版社,2003:302-308.
- [2] 罗磊.基于前反馈混合结构的非线性主动噪声控制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [3] ELLIOTT S J, NELSON P A. Active noise control [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1993, 10(4): 12-35.
- [4] ELLIOTT S J, NELSON P A. The active control of sound [J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1990, 2(4): 127-136.

- [5] 吴亚锋,任辉,李江红.螺旋桨飞机舱内噪声的主动控制[J].声学技术,2001,20(1):29-31.
WU Yafeng, REN Hui, LI Jianghong. Active control of propeller induced aircraft cabin noise [J]. Technical Acoustics, 2001, 20(1): 29-31. (in Chinese)
- [6] DOUGLAS S C. Fast implementations of the filtered-x LMS and LMS algorithms for multichannel active noise control [J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 1999, 7(4): 454-465.
- [7] DEBRUNNER V E, ZHOU D. Hybrid filtered error LMS algorithm: another alternative to filtered-x LMS [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2006, 53(3): 653-661.
- [8] ROUT N K, DAS D P, PANDA G. Computationally efficient algorithm for high sampling-frequency operation of active noise control [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 56: 302-319.
- [9] FEINTUCH P L, BERSHAD N J, LO A K. A frequency domain model for 'filtered' LMS algorithms-stability analysis, design, and elimination of the training mode [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(4): 1518-1531.
- [10] YANG F, CAO Y, WU M, et al. Frequency-domain filtered-x LMS algorithms for active noise control: a review and new insights [J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2313.
- [11] MORGAN D R. History, applications, and subsequent development of the FxLMS algorithm [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(3): 172-176.
- [12] FREIRE N L, DOUGLAS S C. Adaptive cancellation of geomagnetic background noise using a sign-error normalized LMS algorithm[C]//1993 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 1993: 523-526.
- [13] GODAVARTI M, HERO A O. Partial update LMS algorithms [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(7): 2382-2399.
- [14] DOUGLAS S C. Adaptive filters employing partial updates [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 1997, 44(3): 209-216.



第一作者简介:沈昊,男,1999年10月生,博士生。主要研究方向为噪声振动控制。
E-mail:shenhao@nuaa.edu.cn

通信作者简介:沈星,男,1975年2月生,博士、教授。主要研究方向为航空智能结构、噪声振动控制。
E-mail:shenx@nuaa.edu.cn