

液压挖掘机驾驶舱窄带主动噪声控制研究

卢焱华^{1,2}, 吴方博^{1,2}, 刘志恩^{1,2}, 孙毅^{1,2}

(1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 430070, 武汉;

2. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 430070, 武汉)

摘要: 针对液压挖掘机驾驶舱内的阶次噪声污染问题, 本文建立了一种窄带主动噪声控制系统 (active noise control, ANC)。该系统在传统窄带 ANC 算法的基础上提出延时陷波算法, 即建立延时点数次级通路模型, 在进行参考信号滤波过程中以索引延时点数的操作替代卷积计算, 使系统计算效率得到提升; 对于驾驶舱内不相关频率成分的通带干扰影响, 引入二级自适应陷波滤波器以增强系统稳定性; 通过数值仿真分析与台架实验, 验证了该系统在干扰下的降噪性能, 并进行驾驶舱次级声源布放策略分析和搭载 ANC 台架的实机实验, 实现稳态工况下发动机二、四、六阶 14.83 dB(A)、20.82 dB(A) 和 19.43 dB(A) 的降噪量, 结果表明该系统在真实复杂环境中具有一定的实用性; 进一步对比该系统与有源降噪耳机和被动降噪技术发现, 本文所提的主动噪声控制系统在工程应用中有着较好的实用意义和发展前景。

关键词: 挖掘机驾驶舱; 主动噪声控制; 通带干扰消除; 次级声源布放

中图分类号: U467.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202211017 **文章编号:** 0253-987X(2022)11-0167-09

Research on Narrowband Active Noise Control in the Hydraulic Excavator Cabin

LU Chihua^{1,2}, WU Fangbo^{1,2}, LIU Zhi'en^{1,2}, SUN Yi^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In this paper, a narrowband active noise control (ANC) system is established to deal with engine order noise pollution in the hydraulic excavator cabin. The system incorporates a delay notch algorithm proposed based on the conventional narrowband ANC algorithm, which established a secondary path model with delay points. The system replaces the convolution calculation with the operation of indexing delay points in the process of filtering reference signals, which improves the computational efficiency. For the passband interference of irrelevant frequency components in the cabin, a two-stage adaptive notch filter was introduced to enhance the stability of the system. Numerical simulation analysis and bench experiments verified the noise reduction performance of the system under interference. The secondary sound source placement strategy analysis was also carried out together with the real machine experiment with ANC bench. The results show that noise of the second, fourth and sixth orders of the engine is lowered by 14.83 dB(A), 20.82 dB(A) and 19.43 dB(A) respectively under steady state

condition. The indicates that the system has certain practicability in the real-world complex environment. The system was also further compared with active noise reduction headphones and passive noise control technology. It is found that the active noise control system proposed in this paper has good practical significance and development prospects in engineering applications.

Keywords: excavator cabin; active noise control; passband interference cancellation; secondary sound source placement

随着工程机械产业的不断发展,其 NVH 性能逐渐成为用户关注的重点,挖掘机作为工程机械的代表,驾驶舱内的噪声控制成为大量学者研究的对象。

目前挖掘机的降噪方式大多为被动降噪,主要包括改进排气系统与增加穿孔声学元件^[1]、改进动力舱冷却风扇^[2],以及对噪声源的部分零部件进行包裹处理^[3]等。这些解决方案在一定程度上能对驾驶舱内的高频噪声进行控制,但低频声波的波长较长,被动降噪技术很难实现低频噪声的有效吸收与隔绝。作者所在课题组通过对车身板件进行形貌优化^[4]以及对液压油箱与悬置安装支座开展结构优化^[5],对低频噪声实现控制,但控制频率点的范围和控制效果仍较为有限。针对这一难题,主动噪声控制技术应运而生,作为驾驶舱内噪声的主要贡献者,发动机谐波噪声频率范围低,波长较长,相位相对容易控制,因此 ANC 技术特别适用于挖掘机驾驶舱内噪声的控制。

自 Widrow 和 Hoff 提出最小均方误差 (least mean square, LMS) 算法^[6]以来,包括工程机械在内的各领域 ANC 技术大多以该算法为内核开展研究,其中由 Burgess 提出的滤波-x LMS 算法 (Filtered-x LMS, FxLMS)^[7],以其简单性和稳定性被广泛采用。大量学者以 FxLMS 算法为基础,开展挖掘机等工程机械驾驶舱的 ANC 算法研究,针对工程机械驾驶舱中参考信号被次级声源破坏的问题,例如:李忠利等建立了基于误差信号的 FxLMS 算法^[8];龚孝平等提出的变步长归一化 FxLMS 算法,实现了收敛速度与稳态误差之间的平衡^[9]。针对含有脉冲干扰的宽窄带混合噪声,祝文昭提出了一种改进的基于正弦残差结构的宽窄带混合噪声控制算法,提高了宽、窄带子系统协调工作性能和降低了窄带滤波器误差互干扰^[10]。Wu 对比了 3 种脉冲噪声的主动控制算法的计算复杂度与降噪效果,其中一种改进型归一化算法兼具高效的计算能力和良好的降噪效果^[11]。Long 等提出一种用于挖掘机驾驶舱内的变步长次级通路在线建模的主动噪声控制技术,该算法在控制滤波器和辨识滤波器的权值更

新算法中,采用了变步长的收敛因子,加快了算法的收敛速度^[12]。针对窄带主动噪声控制中可能出现的频率失调的问题,Liu 等设计了一种基于线性级联自适应陷波器 (linear cascaded adaptive notch filter, LCANF) 和自回归模型相结合的频率估计算法,LCANF 算法在提供零初始值的情况下估计近似频率,AR 模型提供更高的频率跟踪精度^[13]。谷飞鸿在分析现有主动噪声控制算法优缺点的基础上提出了一种宽窄带混合主动噪声控制算法,该改进算法可保障控制系统在高压级脉冲噪声干扰下的稳定性^[14]。张立军等在建立自适应陷波算法的离散系统状态空间方程的基础上,针对收敛系数、陷波频率数、通道数、次级通路特性与参考信号特性对收敛速度和稳态误差的影响进行了分析^[15]。高放等以发动机阶次噪声为研究对象,基于自适应陷波滤波算法在乘用车上建立多通道主动噪声控制实车系统,该系统能够有效的消除各稳态工况下的发动机阶次噪声^[16]。

考虑到挖掘机工作在复杂的声场环境下,驾驶员耳旁采集的误差信号中可能存在的不相关噪声分量对 ANC 系统产生的不良影响,Kuo 等提出在窄带 ANC 系统中附加一种自适应滤波器来滤除不相关噪声,并允许以较大的步长实现更大的收敛速度^[17];Aslam 等提出了一种前馈和反馈混合控制的 ANC 系统,并设计出一种递归算法用于更新加权因子^[18];Padhi 利用离散小波变换将包含不相关干扰的 ANC 系统的误差信号分解为各种带限部分,对每个部分进行独立的分析,从而提高误差建模的精度^[19];周博将 FxLMS 算法与虚拟传声控制相结合,并引入二级误差滤波算法来消除通频带干扰,在仿真中获得一定的降噪效果^[20]。

以上研究在仿真或算法中均获得一定程度的降噪效果,但在挖掘机 ANC 系统的产品化应用中对算法的计算效率和鲁棒性提出了较高要求。为解决以上问题,本文提出的挖掘机窄带 ANC 系统以计算量低的自适应延时陷波算法为内核,并融合二级自适应陷波滤波器进行通带干扰消除,开展挖掘机

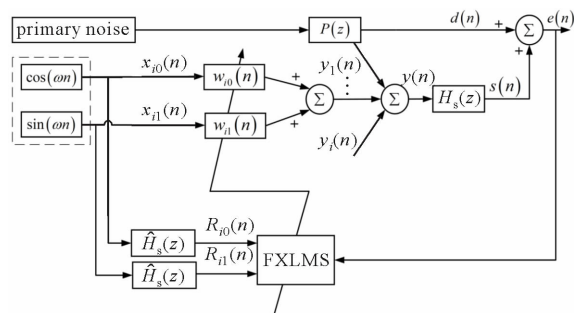
驾驶舱的主动噪声控制研究,通过计算机仿真与实时实验的方式验证该算法的有效性与可靠性。

1 窄带主动噪声控制系统

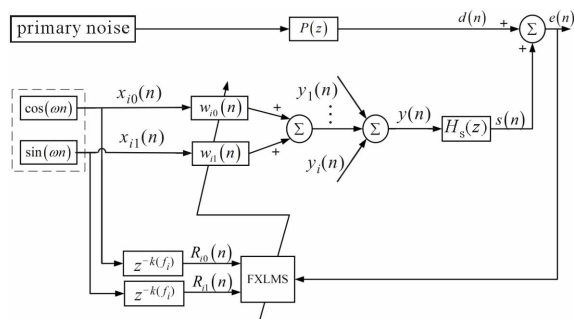
挖掘机驾驶室窄带 ANC 系统需对发动机阶次噪声实现有效控制,同时要避免不相关噪声的干扰。

1.1 自适应延时陷波算法

自适应陷波算法是一种简单的窄带噪声控制方法,该算法框图如图 1(a)所示。本文在此基础上采用了更为精简的延时陷波算法,该算法的框图如图 1(b)所示。



(a) 自适应陷波算法框图



(b) 延时陷波算法框图

图 1 窄带控制算法框图

Fig. 1 Principle diagram of narrowband control algorithm

在该系统中,首先采用传感器识别出噪声源的谐波频率信息,通过系统中的正弦波发生器实时产生与第 i 个谐波频率相同的正余弦波参考信号 $x_{i0}(n)$ 、 $x_{i1}(n)$,参考信号经两个一阶横向 FIR 滤波器滤波后输出为该频率声波的抵消信号 $y_i(n)$,若有 I 个降噪频率点,可将各自适应滤波器并联,则抵消信号可叠加为

$$y(n) = \sum_{i=1}^I y_i(n) \quad (1)$$

该信号经次级通路抵达目标降噪区域形成次级

信号 $s(n)$,次级通路传递函数表示为 $H_s(z)$,噪声源产生的噪声信号经初级通路在目标降噪区形成初级信号 $d(n)$,初级通路传递函数表示为 $P(z)$,初级信号与次级信号相互抵消实现噪声消除,信号抵消后存在残余的误差信号 $e(n)$ 由误差麦克风采集,参与控制器中滤波器权系数的更新,基于最小均方准则的权系数迭代公式为

$$\begin{cases} w_{i0}(n+1) = w_{i0}(n) + 2\mu R_{i0}(n)e(n) \\ w_{i1}(n+1) = w_{i1}(n) + 2\mu R_{i1}(n)e(n) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $R_{i0}(n)$ 和 R_{i1} 为滤波参考信号,用于补偿次级通路对输出信号 $y(n)$ 的影响。在传统的自适应陷波算法中,滤波参考信号由参考信号和次级通路单位脉冲响应 $\hat{H}_s(n)$ 的卷积计算得到,如图 1(a)所示,即

$$\begin{cases} R_{i0}(n) = \hat{H}_s(n) * x_{i0}(n) \\ R_{i1}(n) = \hat{H}_s(n) * x_{i1}(n) \end{cases} \quad (3)$$

为获得高精度的次级通路模型,单位脉冲响应 $\hat{H}_s(n)$ 的滤波器长度会取一个较大值,对于多频率点多通道的 ANC 系统,多路次级通路和多个参考信号的输入,无疑加重了系统控制器的计算负担。

针对此问题,本文提出的自适应延时陷波算法对这一计算过程实现了精简。由于参考信号经次级通路滤波后不会改变信号的频率信息,仅改变参考信号的幅值与相位,因此可建立一种更为简单的次级通路模型 $\hat{S}(z) = A(f)z^{-k(f)}$,其中 $A(f)$ 表示次级通路单位脉冲响应在频率 f 处的幅频特性, $k(f)$ 表示在频率 f 处对应的延时点数,可被表示为

$$k(f) = \text{round}\left[-\frac{P(f)}{2\pi f}f_s\right] \quad (4)$$

式中:round 表示就近取整函数; f_s 表示采样率; $P(f)$ 表示次级通路单位脉冲响应的相频特性,次级通路在相位上只起到延时的作用,因此将 $P(f)$ 的取值范围保持在 -2π 到 0。

取参考信号中某一阶频率 f_0 的噪声作为消声对象时,从式(4)的计算结果中索引出当前频率 f_0 所对应的延时点数 $k(f_0)$ 并令其等于 k ,则滤波参考信号可表示为

$$\begin{cases} R_{i0}(n) = x_{i0}(n-k) \\ R_{i1}(n) = x_{i1}(n-k) \end{cases} \quad (5)$$

对比两种陷波算法在进行滤波参考信号运算时的计算量如表 1 所示,可以看出本文所提延时陷波算法随着系统通道数的提升拥有更为优越的计算效率。

表 1 运算量比较

Table 1 Comparing the amount of computation

运算类型	运算量	
	传统自适应陷波算法	延时陷波算法
乘法	$2NKJL$	0
加法	$2NKJ(L-1)$	0

注： N —待控制频率数； K —次级扬声器个数； J —误差传声器个数； L —次级通路阶数。

1.2 通带干扰消除

误差麦克风在驾驶舱内采集的误差信号难免会出现一些不相关的频率成分,这些信号在参与滤波器迭代的过程中会产生通带干扰。为防止其对系统的稳定性和降噪效果产生影响,需在 ANC 系统中加入通带干扰消除的模块,本文所提出的结合通带干扰消除的 ANC 系统算法框图如图 2 所示。

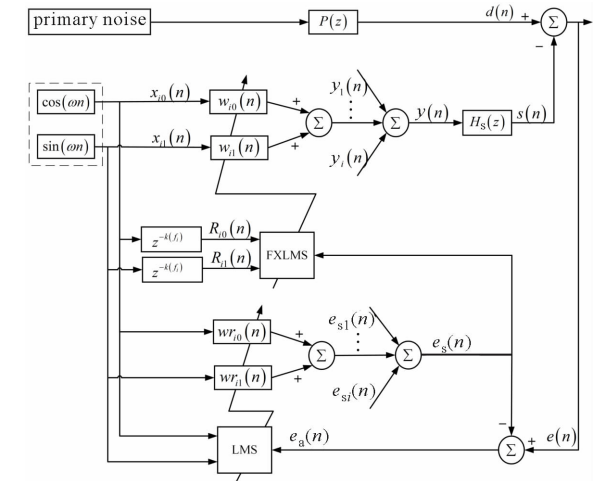


图 2 结合通带干扰消除的延时陷波算法框图
Fig. 2 Principle diagram of delay notch algorithm combined with passband interference cancellation

该算法引入另一个自适应陷波滤波器,输入的参考信号与主滤波器相同,用于辨识误差信号中的目标频率。误差麦克风采集到的误差信号 $e(n)$ 输入到新的滤波器时,信号中与目标频率不相关的成分得到有效抑制。滤波器处理后的新误差信号 $e_a(n)$ 参与新滤波器中的权系数迭代计算,新滤波器估计的误差信号 $e_s(n)$ 参与主滤波器的权系数迭代计算。

2 算法仿真分析

为验证前文所述系统在主动噪声控制中的应用效果,使用真实环境中长度为 512 阶的次级通路离线辨识结果,分别建立了两种 ANC 系统数学模型

进行仿真分析,一种是基于延时陷波算法的 ANC 系统,另一种在其基础上融合了通带干扰消除技术。

将两个模型设置为多频率点单通道系统,设定工况为发动机定转速 1 500 r/min,取发动机噪声贡献量最大的前三阶主频噪声作为初级噪声的目标频率点^[11],于是初级噪声的参考信号为

$$x(t) = \sum_{i=1}^3 a_i \sin(2\pi 50 j t) \tag{6}$$

式中 a_j 为第 $2j$ 阶主频噪声的幅值。将 3 个阶次噪声的幅值分别设定为 1、0.8、0.4,同时注入幅值为 0.6、频率为 70 Hz 和 120 Hz 的正弦波和信噪比为 20 dB 的白噪声,作为初级声源信号,仿真结果如图 3~5 所示。

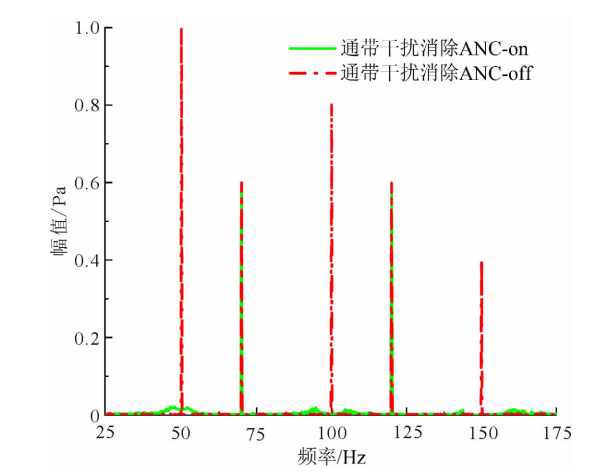


图 3 结合通带干扰消除的窄带 ANC 仿真结果
Fig. 3 Simulation result of narrowband ANC combined with passband interference cancellation

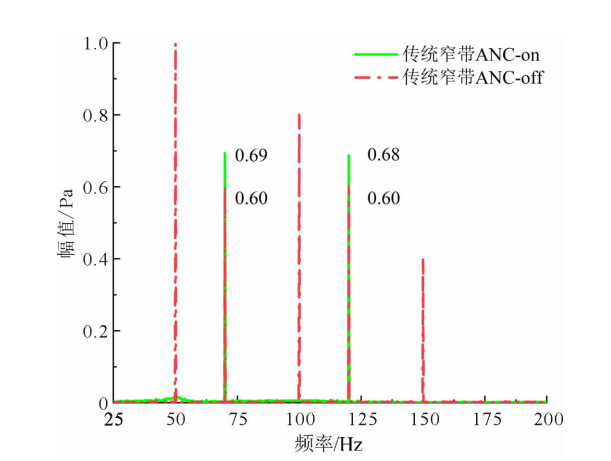


图 4 传统窄带 ANC 仿真结果
Fig. 4 Simulation result of traditional narrowband ANC

不难看出,两种 ANC 系统在开启控制功能后都能对目标频率点的噪声实现有效消除,但传统 ANC 系统受通带干扰的影响,不相关的噪声被系统

放大,而消除通带干扰的 ANC 系统不受影响。从图 5 的误差信号时域仿真结果也可以看出,通带干扰的消除更有利于整个频带的噪声控制。

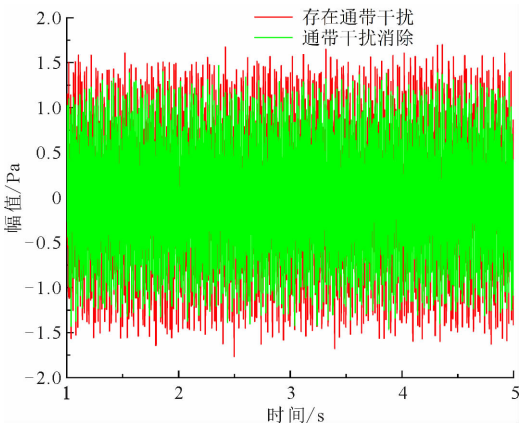


图 5 误差信号时域结果对比

Fig. 5 Comparison of error signal in time domain

仿真中两种算法主滤波器权系数迭代过程的如图 6 所示。相较于传统窄带 ANC 系统,干扰消除使得系统权系数明显更加稳定,保证了次级扬声器声信号的平稳输出,也抑制了系统对误差信号中不相关成分的放大作用。

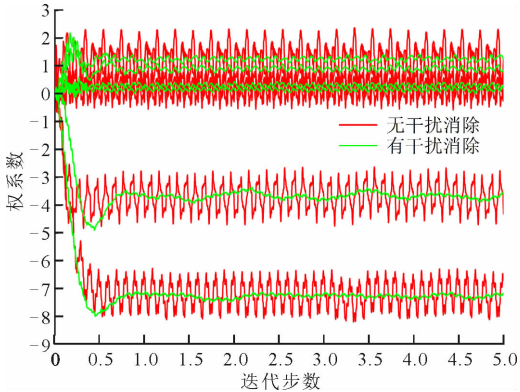


图 6 权系数迭代过程

Fig. 6 Weight coefficient iterative process

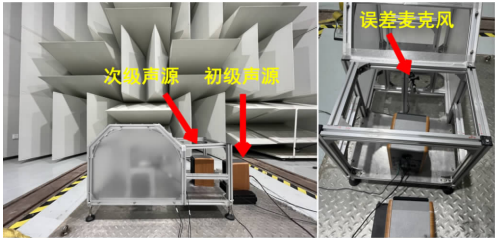
3 实验验证

为验证所述算法的有效性与实用性,本文分别进行实验室台架实验和挖掘机实机实验。

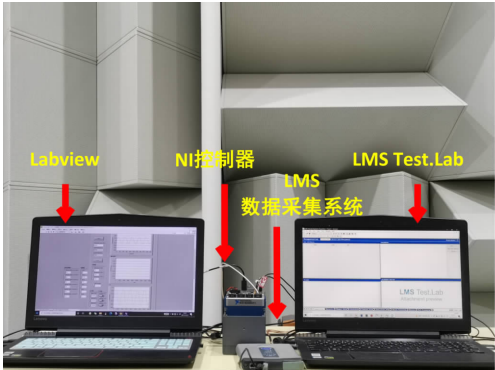
3.1 台架实验

台架实验在半消声室中进行,设备布置如图 7 所示。使用的设备包括 NI cRIO-9040 控制器、NI 9231 输入模块和 NI 9269 输出模块、计算机,LMS SCADAS Mobile 数据采集系统,两个漫步者 R1000BT 扬声器、两个 GRAS-46AE 麦克风,麦克风支架及驾驶室声腔模拟台架等。NI 控制器和

LMS 数据采集系统分别通过计算机中的 LabVIEW 和 LMS Test. Lab 软件进行操作。



(a)麦克风及音响布置



(b)计算机、控制器与数据采集系统

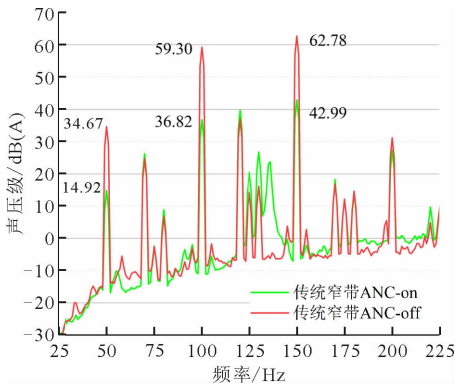
图 7 台架实验的布置

Fig. 7 The Setup of the bench experiment

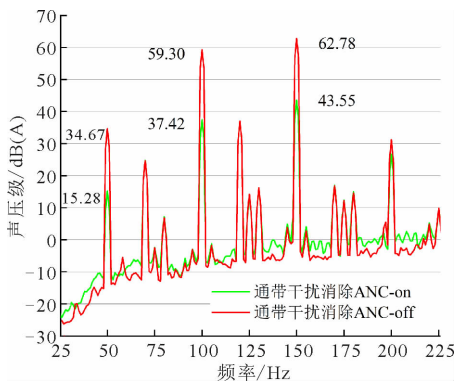
实验开始前,通过控制器驱动次级声源发出随机白噪声,误差麦克风采集噪声信号,待通路系数稳定后,完成通路辨识。根据辨识结果计算延时点数。

利用计算机的音频文件驱动初级声源发出 50 Hz、100 Hz 和 150 Hz 3 种频率点的混合噪声并注入一组干扰噪声,采用两种算法分别进行噪声控制,实验结果如图 8 所示。

实验结果显示,在传统窄带 ANC 系统的控制下,3 个目标频率点的降噪量分别为 19.75 dB(A)、22.48 dB(A)和 19.79 dB(A),但系统会使不相关频率点及其邻近频带的噪声放大;通过消除干扰,系



(a)传统窄带 ANC 控制效果



(b)通带干扰消除的窄带 ANC 控制效果

图 8 台架实验结果

Fig. 8 Bench test results

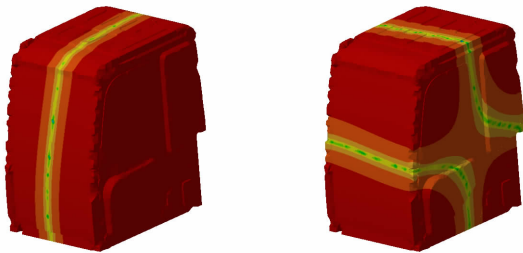
统对于干扰噪声的放大作用得到有效抑制,而 3 个目标频率点的降噪量分别为 19.39 dB(A)、21.88 dB(A)和 19.23 dB(A),与传统窄带 ANC 系统的控制效果相当,不难看出通带干扰消除模块的引入使窄带 ANC 系统获得更优秀的性能。

3.2 实机实验

相较于半消声室,挖掘机在工作时驾驶舱内的噪声环境更为复杂和恶劣,针对驾驶舱 ANC 系统的实机有效性验证也是必不可少的。本文以某小型液压挖掘机作为实验对象,驾驶舱为狭小的封闭空间,在实验开始前,需对系统的硬件布放策略进行研究。

对于次级扬声器,一种可行的方法是将其布置在远离目标频段内各阶声腔模态节线处^[21-22],通过前处理软件对挖掘机驾驶舱进行声腔模型网格的构建,并对该声学网格完成声腔模态的求解。由于本文仅控制低频段的噪声,因此取 200 Hz 以下的四阶声腔模态结果,如图 9 所示。

综合考量声腔模态分析结果和挖掘机驾驶舱内可行的布置点位,最终选取驾驶舱后方顶部一侧原装喇叭处作为布置点,并将原装喇叭替换为低频响应更好的喇叭(45 Hz~20 kHz)。误差麦克风布置在头枕一侧,并位于次级扬声器的中心线上^[23],布置效果如图 10 所示。



(c)第三阶 176.818 Hz (d)第四阶 181.731 Hz

图 9 声腔模态云图

Fig. 9 The modal cloud diagram of the acoustic cavity



图 10 实机实验布置图

Fig. 10 Setup of the excavator experiment

与台架实验相同,首先在驾驶舱内完成次级通路辨识及延时点数计算,结果如图 11、12 所示。

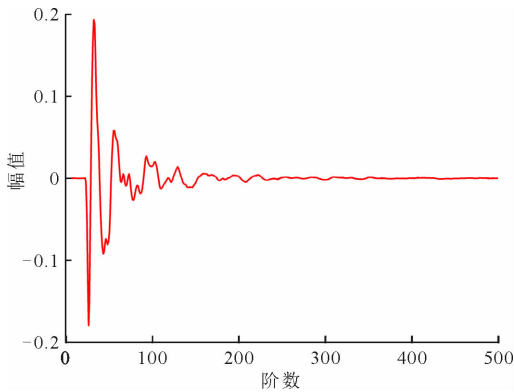
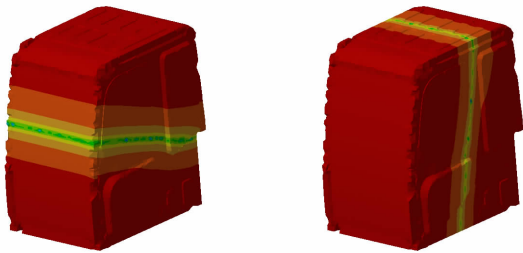


图 11 次级通路辨识模型

Fig. 11 Modeling results of secondary path

在实验阶段,将挖掘机工况设置为静置定转速 1 500 r/min,采用带有通带干扰消除的窄带 ANC 系统对驾驶舱内的噪声进行控制,实验结果如图 13 所示。不难看出,该系统对驾驶舱中的噪声具有良好的控制效果,发动机二、四、六阶噪声的降噪量分别为 14.83 dB(A)、20.82 dB(A)和 19.43 dB(A)。另外,人耳敏感的频率范围为 20~2 000 Hz^[24],结合图 13(a)和图 13(c)的频谱图可以看出,在与阶次



(a)第一阶 111.555 Hz (b)第二阶 138.484 Hz

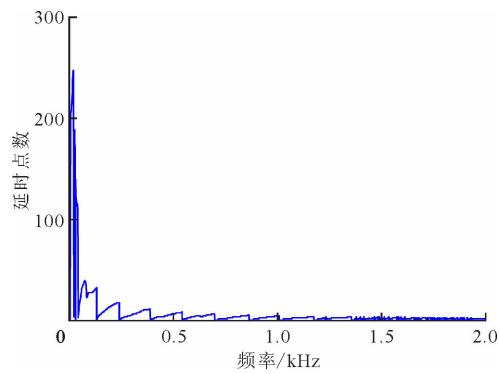


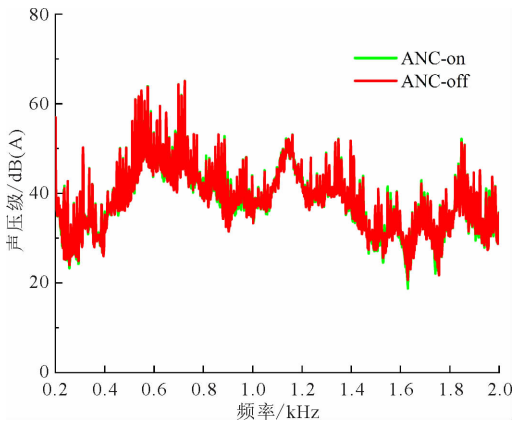
图 12 延时点数计算结果

Fig. 12 Delay number calculation result

噪声不相关的频段内,系统不会放大噪声,拥有稳定的降噪性能。

4 总 结

本文以挖掘机驾驶舱中的发动机阶次噪声为对象开展窄带 ANC 系统的研究。基于自适应陷波算法提出计算量要求更低的延时陷波算法,其以索引延时点数的方法替代卷积计算进行参考信号滤波,减轻了 ANC 系统的计算负担;针对挖掘机恶劣的声场环境,引入用于通带干扰消除的二级自适应陷



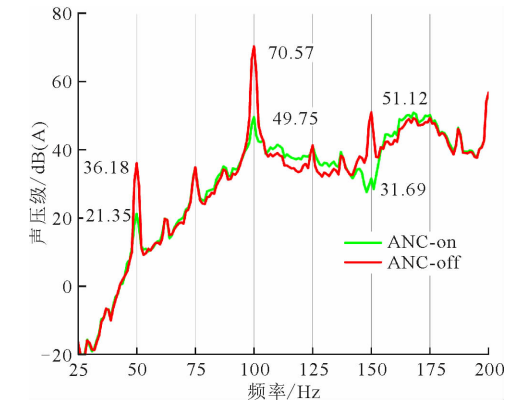
(c)200~2 000 Hz 频谱图

图 13 实机实验结果

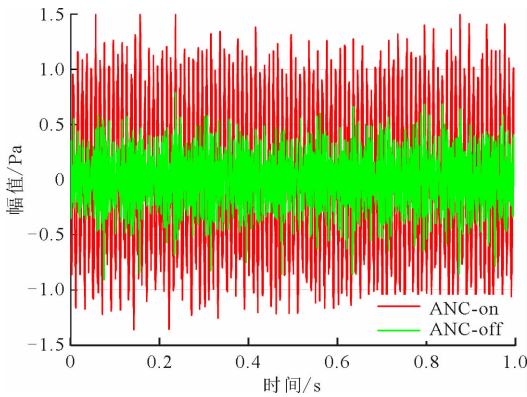
Fig. 13 Excavator experiment result

波滤波器,避免干扰噪声对窄带 ANC 系统产生影响;通过数值仿真和实验,证明通带干扰的消除能够改良系统的控制性能,从而获得良好的降噪效果;在实机实验中,为获得最佳的控制效果,以有限元仿真的方式对 ANC 系统硬件布放策略进行了研究,最终本文所提的窄带 ANC 系统在出现不恶化的情况下,分别实现真实环境中二、四、六阶 14.83 dB(A)、20.82 dB(A)和 19.43 dB(A)的降噪量。综合仿真与实验结果,验证了算法的有效性及实用性。

目前国内外有源降噪耳机发展成熟,降噪效果大多优于本文所述的方法,但舱内有源降噪技术研发成本更低,并且随着有源降噪系统在机载音频系统中的集成及其批量化生产,能进一步降低其开发成本;大多有源降噪耳机采用反馈控制结构^[25],而本文所提的控制方法采用前馈式控制结构,利用非声学传感器采集发动机转速信号作为参考信号并传输至控制器,以实现舱内阶次噪声的实时追踪控制,在声场环境复杂的驾驶舱内,前馈控制的稳定性会优于采用声学传感器采集参考信号的反馈控制结构;另外挖掘机的驾驶操作是一个长时间的作业过程,长期佩戴耳机也会对驾驶员的舒适性产生一定负面影响。对于挖掘机的被动降噪技术,作者所在课题组已做大量研究,包括对液压油箱和驾驶室安装支座进行结构修改、动力总成悬置刚度优化以及驾驶室壁板结构优化等方式^[26]实现低频段部分频率点 2~6 dB(A)的降噪量。相较于本文主动噪声控制的效果可以看出,主动降噪技术对低频噪声的控制更为显著,并且几乎无需对机体的结构进行更改,开发成本低周期短,不会对机体结构的耐久性产生影响。



(a)频域结果



(b)时域结果

综上所述,本文所提的液压挖掘机驾驶舱窄带主动噪声控制研究在工程应用中有着较好的实用意义和发展前景,并且对以燃油发动机为动力源的工程机械而言,本文的主动噪声控制算法也同样适用。

参考文献:

- [1] 石岩,李永刚. 液压挖掘机发动机噪声分析与降噪设计[J]. 工程机械, 2010, 41(1): 38-41.
SHI Yan, LI Yonggang. Noise analysis of a hydraulic excavator engine and its noise reduction design [J]. Construction Machinery and Equipment, 2010, 41(1): 38-41.
- [2] 陈龙灿. 小型挖掘机用发动机舱内部噪声源分析与降噪方案研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [3] 孙凤超. 小型液压挖掘机降噪技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [4] 刘志恩,王亚磊,柴鹏飞,等. 挖掘机驾驶室低频结构噪声分析与优化[J]. 应用声学, 2021, 40(2): 182-187.
LIU Zhien, WANG Yalei, CHAI Pengfei, et al. Analysis and optimization of low frequency structural noise of excavator cab [J]. Journal of Applied Acoustics, 2021, 40(2): 182-187.
- [5] 卢焯华,柴鹏飞,刘志恩,等. 基于子结构功率流的挖掘机噪声振动性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 37-42.
LU Chihua, CHAI Pengfei, LIU Zhien, et al. Research on noise and vibration performance of excavator based on substructure power flow method [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(1): 37-42.
- [6] WIDROW B, GLOVER J R, MCCOOL J M, et al. Adaptive noise cancelling: principles and applications [J]. Proceedings of the IEEE, 1975, 63(12): 1692-1716.
- [7] BURGESS J C. Active adaptive sound control in a duct: a computer simulation [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1981, 70(3): 715-726.
- [8] 李忠利,邹会勉,乔冬冬,等. 拖拉机驾驶室耳旁噪声主动降噪控制[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 30-35.
LI Zhongli, ZOU Huimian, QIAO Dongdong, et al. Active noise reduction control of the ear noise in the tractor cab [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(33): 30-35.
- [9] 龚孝平,郭勇,刘强,等. 驾驶室主动降噪的改进 Fx-LMS 算法及 DSP 实现[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(9): 135-138.
GONG Xiaoping, GUO Yong, LIU Qiang, et al. Improved FxLMS algorithm and DSP implementation of active noise reduction in cab [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(9): 135-138.
- [10] 祝文昭. 脉冲干扰环境下宽窄带混合主动噪声控制关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [11] WU Xianwen. Active noise control system with impulsive noise cancellation capability [D]. DeKalb: Northern Illinois University, 2013.
- [12] LONG Hongyue, ZHAO Hongqiang, LIU Qiang. A new online secondary path modeling method with white noise amplitude adjustment for excavator cab [C] // Journal of Physics: Conference Series. Bristol, UK: IOP Publishing, 2022: 012032.
- [13] LIU Jian, WANG Zhixin. A narrowband active noise control system with autoregressive model and linear cascaded adaptive notch filter [J]. Signal Processing, 2022, 196: 108502.
- [14] 谷飞鸿. 基于宽窄带混合控制算法的车内主动噪声控制系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [15] 张立军,皮雄飞,孟德建,等. 多通道自适应陷波算法性能的评价指标及影响因素[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 68-77.
ZHANG Lijun, PI Xiongfei, MENG Dejian, et al. Evaluation indexes and influencing factors of multi-channel adaptive notch algorithm [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2020, 48(1): 68-77.
- [16] 高放,黄海东,尹晶,等. 基于陷波法的乘用车主动噪声控制系统设计及应用[C]//2021 中国汽车工程学会年会论文集: 4. 上海: 机械工业出版社, 2021: 18-22.
- [17] KUO S M, JI M. Passband disturbance reduction in periodic active noise control systems [J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 1996, 4(2): 96-103.
- [18] ASLAM M S, SHI Peng, LIM C C. Robust active noise control design by optimal weighted least squares approach [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, I Regular Papers, 2019, 66(10): 3955-3967.
- [19] FACCENDA F, NOVARINI L. An amplitude constrained FxLMS algorithm for narrow-band active noise control applications [C]//2015 9th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 233-237.
- [20] 周博. 工程车辆驾驶室有源噪声控制策略的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.

[21] 刘斌. 车内噪声主动控制系统设计与实验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.

[22] 王珊珊. 室内主动降噪系统及实验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2020.

[23] 王登峰, 刘学广, 刘宗巍, 等. 车内自适应有源消声系统次级声源布放试验 [J]. 中国公路学报, 2006, 19 (3): 122-126.
WANG Dengfeng, LIU Xueguang, LIU Zongwei, et al. Layout experiment of secondary sound source for adaptive active noise control system in vehicle interior [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 122-126.

[24] 刘海强, 赵坚, 洪学武, 等. 智能空气净化器噪声源辨识与控制研究 [J]. 天津城建大学学报, 2018, 24 (4): 308-311.
LIU Haiqiang, ZHAO Jian, HONG Xuewu, et al. Study on noise source identification and noise control of intelligent air purifier [J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2018, 24(4): 308-311.

[25] 张帅. 一种大耳罩有源降噪耳机的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

[26] 柴鹏飞. 小型挖掘机驾驶室内低频噪声分析与优化 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.

(编辑 荆树蓉 亢列梅)