

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108312

## 压缩机噪声的主动噪声控制系统研究\*

袁 军 李 军 孟祥胜 赵 强

(重庆邮电大学微电子工程重庆市重点实验室 重庆 400065)

**摘要:** 主动噪声控制系统是运用声学干涉相消的理论,由自适应算法对参考噪声进行处理来产生抗噪声信号。针对燃气站压缩机在中低频段具有声压级高且难以抵消的问题,首先对压缩机噪声进行时频分析,然后提出了一种基于自适应 IIR 的主动噪声控制系统,该系统由两个参数可调的数字滤波器和相对应的自适应算法组成。最后利用 Xilinx FPGA 作为系统的核心控制模块进行系统的硬件设计。实测结果表明该方法在中低频段降噪效果可达 20 dBA,系统收敛速度为 30  $\mu$ s,且消耗更少的硬件资源。

**关键词:** 干涉相消;主动噪声控制系统;自适应算法

**中图分类号:** TN911.71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Research on active noise control system of compressor noise

Yuan Jun Li Jun Meng Xiangsheng Zhao Qiang

(Chongqing Key Laboratory of Microelectronics Engineering, Chongqing University of Post and Telecommunications,  
Chongqing 400065, China)

**Abstract:** The active noise control system uses the theory of acoustic interference cancellation, and the reference noise is processed by an adaptive algorithm to generate an anti-noise signal. Aiming at the problem that the compressor of gas station has a high sound pressure level in the middle and low frequency bands and is difficult to cancel, this paper first analyzes the compressor noise in time-frequency, and then proposes an active noise control system based on adaptive IIR. The system consists of two it consists of a digital filter with adjustable parameters and a corresponding adaptive algorithm. Finally, use Xilinx FPGA as the core control module of the system to design the hardware of the system. The actual measurement results show that the noise reduction effect of this method can reach 20 dBA in the middle and low frequency bands, the system convergence speed is 30  $\mu$ s, and the hardware resource consumption is lower.

**Keywords:** interference cancellation; active noise control system; adaptive algorithm

## 0 引 言

主动噪声控制的概念在 1936 年被提出,在集成电路兴起后开始蓬勃发展,目前在车载降噪、航空航天以及降噪耳机等领域广泛被使用。

在声音传播过程中,对声学噪声消除,主要有被动和主动降噪两种方法<sup>[1]</sup>。其中,采用被动降噪的方法处理低频时,由于材料的体积、质量和成本增加导致该方法变得不再实用<sup>[1-2]</sup>。在这种情况下,越来越多的场景将主动降噪的方法作为主要的降噪手段,因为主动降噪对低频噪声有效,成本低,方便调试<sup>[3-4]</sup>。其基本原理是通过参数可调的数字滤

波器和自适应算法对噪声进行处理。目前,基于自适应滤波器的主动噪声控制前馈系统得到广泛应用,其滤波器系数随着待滤波信号统计量的变化而调整<sup>[5-6]</sup>。该滤波器主要有两种实现结构:自适应有限脉冲响应(finite impulse response, FIR)和自适应无限脉冲响应(infinite impulse response, IIR)滤波器<sup>[7]</sup>。其中,自适应无限脉冲响应(IIR)滤波器同时使用极点和零点<sup>[8]</sup>,可以使用更少的滤波器阶数进行建模,相比较自适应有限脉冲响应(FIR)滤波器降低了计算的复杂度,提高了运算的速度,但引入的极点会导致系统存在不稳定的情况。

通过系统地分析燃气站压缩机的噪声特性、主动噪声

收稿日期:2021-11-10

\* 基金项目:国家自然科学基金(61404019)、重庆市科技局科技重大专项(cstc2018jszx-cyztzxX0054)、重庆市教委基金项目(KJ1500424)、重庆市科委集成电路产业类重大专项(cstc2018jszx-cyztzx0217)资助

控制系统的实时性需求,基于上述理论,本文综合提出了一种新的主动噪声控制系统,这个系统在传统的 IIR 滤波器的基础上,在次级通道加入两级反馈结构以此来提高系统收敛速度和降噪量<sup>[9]</sup>。该系统通过方程将极点消除,既克服了 IIR 滤波器存在极点,导致系统不稳定的情况,同时又提高了系统的收敛速度和降噪性能。最后,利用 Xilinx FPGA 搭建硬件平台进行实测。

### 1 主动降噪基本原理

主动降噪的原理是利用声波干涉叠加的方式,即两列声波幅度相同、频率相同、相位相反,相互叠加后会彼此抵消。主动噪声控制系统可以描述为利用传感器采集噪声信号,控制器对采集噪声进行信号处理得到次级声波的数据,最后次级信号通过全频喇叭播放抗噪声信号,达到抵消噪声的效果<sup>[10-13]</sup>。虽然基于 FIR 滤波器设计的主动噪声控制系统在一定程度上可以抑制噪声,但为了解决声反馈、系统运行速度以及降噪性能的问题,在次级路径上增加了两级反馈结构,使得输出响应(抗噪声信号)更逼近参考噪声信号,该结构为基于自适应 IIR 的主动噪声控制系统。

#### 1.1 LMS 算法基本原理

最小均方算法(least mean square, LMS)是基于最小均方误差准则,在梯度法的基础上,通过改进均方误差梯度值计算的方法,该算法可由递推公式如式(1)~(3)所示<sup>[14-17]</sup>。

$$y(n) = \mathbf{W}^H(n)\mathbf{X}(n) \quad (1)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2)$$

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + 2\mu\mathbf{X}(n)e^*(n) \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{W}(n)$  为滤波器的权值向量;  $\mathbf{X}(n)$  是输入信号组成的一组向量;  $y(n)$  是输出信号;  $d(n)$  是期望信号;  $e(n)$  是误差信号;  $\mu$  是步长因子,其中  $\mu$  越大,算法的收敛速度越快,反之越慢。但收敛速度越快会导致稳态性能变差,所以需要约束步长因子。

#### 1.2 基于自适应 IIR 滤波器的主动噪声控制算法

如图 1 所示为本文提出的基于自适应 IIR 算法的主动噪声控制系统,该系统分别由两个 LMS 算法和其对应的滤波器  $A(z)$  和  $B(z)$  组成。该结构是如图 2 所示的传统自适应 IIR 主动噪声控制系统基础上对次级路径进行了建模,通过合成了期望信号  $d(n)$  估计值  $\hat{d}(n)$ , 目的是为了解决传统自适应 IIR 主动噪声控制系统存在极点导致系统不稳定的问题<sup>[18]</sup>。其中,  $x(n)$  为参考噪声信号,  $P(z)$  为主通道传递函数,  $S(z)$  为次级通道补偿,  $\hat{S}(z)$  是其期望信号。图 2 中, KIM 提出的系统输出信号如式(4)所示<sup>[18]</sup>。

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N_a-1} a_i(n)x(n-i) + \sum_{j=1}^{N_b} b_j(n)y(n-j) \quad (4)$$

可以看出传统的自适应 IIR 的主动噪声控制系统输出由前项和递归项组成,是一个递归系统。同时在误差信号接近为 0 时,两个滤波器  $A(z)$  和  $B(z)$  必须满足:

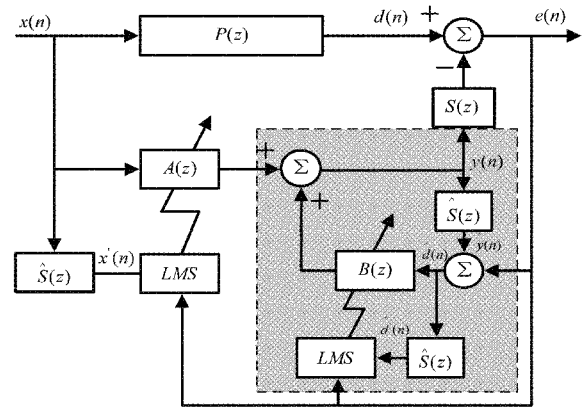


图 1 本文提出的基于自适应 IIR 滤波器的主动噪声控制系统

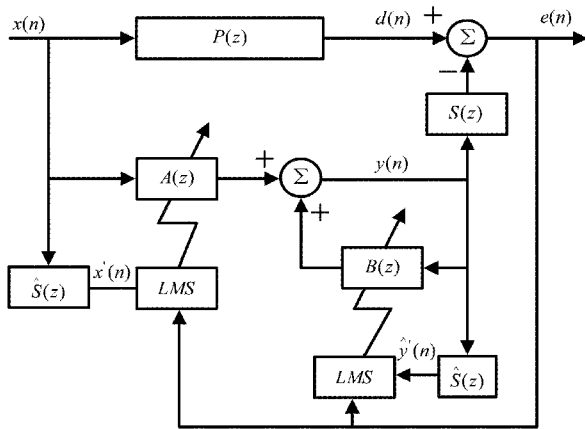


图 2 KIM 提出的基于自适应 IIR 滤波器的主动噪声控制系统<sup>[18]</sup>

$$\frac{A(z)}{1-B(z)} = \frac{P(z)}{S(z)} \quad (5)$$

根据式(5)可知,传统的基于 IIR 的主动噪声控制系统中  $S(z)$  使得系统存在极点,最终会导致系统的不稳定。本文提出的系统输出信号如式(6)所示。

$$y(n) = \mathbf{a}^T(n)x(n) + \mathbf{b}^T(n)\hat{\mathbf{d}}(n) \quad (6)$$

本文提出的基于自适应 IIR 的主动噪声控制系统的输出信号由非递归项组成,可以避免不稳定的情况。同时,当误差信号接近为 0 时,满足:

$$\frac{\Lambda(z)}{1-B(z)} = P(z) (|B(z)| < 1) \quad (7)$$

因此本文提出的系统不存在极点可使系统达到全局稳定。权值系数更新如式(8)和(9)所示。

$$\mathbf{a}(n+1) = \mathbf{a}(n) + \mu_a e(n) (\hat{s}(n) * \mathbf{x}(n)) \quad (8)$$

$$\mathbf{b}(n+1) = \mathbf{b}(n) + \mu_b e(n) \hat{\mathbf{d}}'(n) \quad (9)$$

#### 1.3 步长约束

假设  $x(n)$  为一个白噪声信号,均值为 0,方差为 1。滤波器  $A(z)$ 、 $B(z)$  的步长因子表示为如式(10)和(11)所示。

$$0 < \mu_a < \frac{2}{(N_a + 2\Delta_{eq})P_{x'}} \quad (10)$$

$$0 < \mu_b < \frac{2}{(N_b + 2\Delta_{eq})P_{\hat{d}'}} \quad (11)$$

其中,  $P_{x'}$  和  $P_{\hat{d}'}$  分别表示  $x'(n)$  和  $\hat{d}'(n)$  的功率,  $\Delta_{eq}$  表示次级路径延迟如式(12)所示。

$$\Delta_{eq} = \frac{\sum_{l=1}^{L-1} l s_l^2}{\sum_{l=0}^{L-1} s_l^2} \quad (12)$$

#### 1.4 全局最小值

本文的主动噪声控制系统的的核心最小均方误差(MSE)函数如式(13)所示。

$$\xi_{EE}(n) = E[e^2(n)] = E[d^2(n)] + \mathbf{a}^T(n) \mathbf{R}_{x'x'} \mathbf{a}(n) + \mathbf{b}^T(n) \mathbf{R}_{\hat{d}'\hat{d}'} \mathbf{b}(n) + 2[\mathbf{a}^T(n) \mathbf{R}_{x'\hat{d}'} \mathbf{b}(n) - \mathbf{a}^T(n) \mathbf{p}_{dx'} - \mathbf{b}^T(n) \mathbf{p}_{\hat{d}'d'}] \quad (13)$$

通过对其求偏导可以得到最优的权值向量如式(14)和(15)所示。

$$\mathbf{a}_{EE}^0(n) = \mathbf{R}_{x'x'}^{-1} [\mathbf{p}_{dx'} - \mathbf{R}_{x'\hat{d}'} (\mathbf{R}_{\hat{d}'\hat{d}'} - \mathbf{R}_{x'\hat{d}'}^T \mathbf{R}_{x'x'}^{-1} \mathbf{R}_{x'\hat{d}'})^{-1} \times (\mathbf{p}_{\hat{d}'d'} - \mathbf{R}_{\hat{d}'\hat{d}'}^T \mathbf{R}_{x'x'}^{-1} \mathbf{p}_{dx'})] \quad (14)$$

$$\mathbf{b}_{EE}^0(n) = (\mathbf{R}_{\hat{d}'\hat{d}'} - \mathbf{R}_{x'\hat{d}'}^T \mathbf{R}_{x'x'}^{-1} \mathbf{R}_{x'\hat{d}'})^{-1} (\mathbf{p}_{\hat{d}'d'} - \mathbf{R}_{\hat{d}'\hat{d}'}^T \mathbf{R}_{x'x'}^{-1} \mathbf{p}_{dx'}) \quad (15)$$

#### 1.5 硬件系统设计

本文结合前面提出的自适应 IIR 滤波器的主动噪声控制算法进行硬件设计。根据整个信号的处理过程,将其划分为信号放大、误差信号的采集、参考噪声信号的采集、抗噪声信号的输出。将音频数据流在系统中的传输过程绘制成流程如图 3 所示。

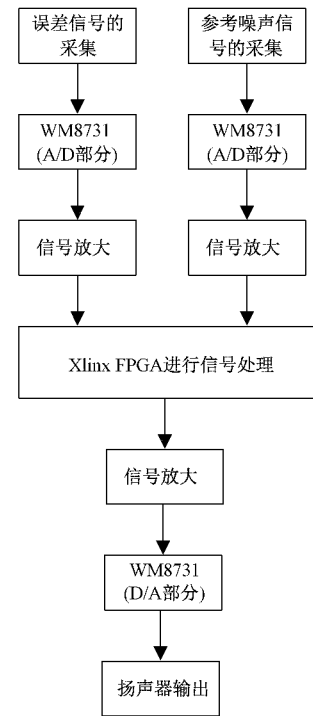


图 3 音频数据流传输示意图

如图 4 所示为现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)电路设计部分各模块的寄存器传输级(register transfer level, RTL)视图,主要包括的模块有音频数据接收模块、锁相环(phase locked loop, PLL)模块、自适应算法模块、音频编解码器配置模块、音频数据发送模块。

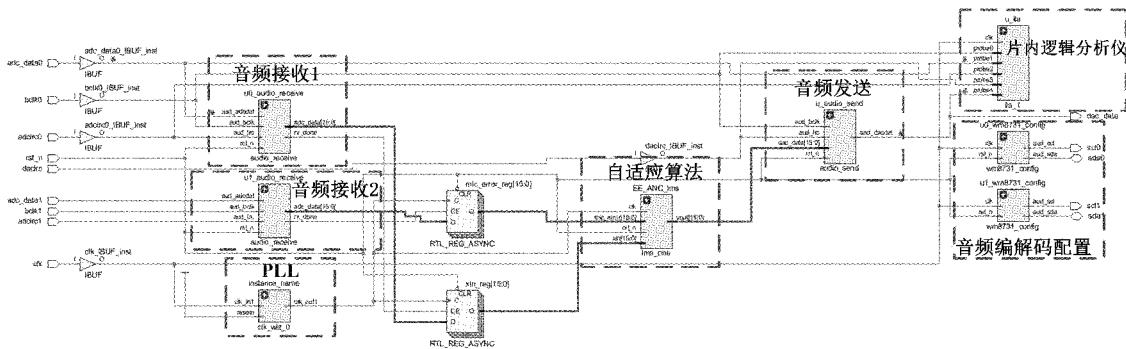


图 4 硬件电路的顶层 RTL 结构

## 2 实验与数据

### 2.1 参考噪声数据分析

本文噪声数据来自中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司,具体的实验场景如图 5 所示。

燃气站内压缩机噪声主要来自压缩机组和空冷器噪声。其中,压缩机组噪声为天然气发动机带动的压缩机噪

声,具有频带宽、低频声压级高的特性。空冷器噪声主要来自空冷器进风口和空冷器排风口噪声。其中,采集的噪声数据频谱如图 6 所示。

根据爱华仪器现场实际测量结果,天然气压缩机组 JGC-4/G3608 在中低频段有高的噪声值,在低频段最高可达 95 dB(A)以上。



图 5 燃气站压缩机厂房内

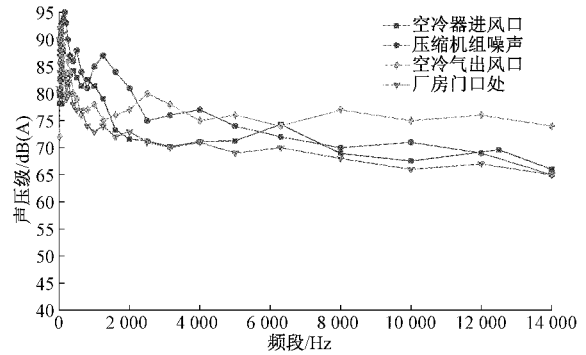
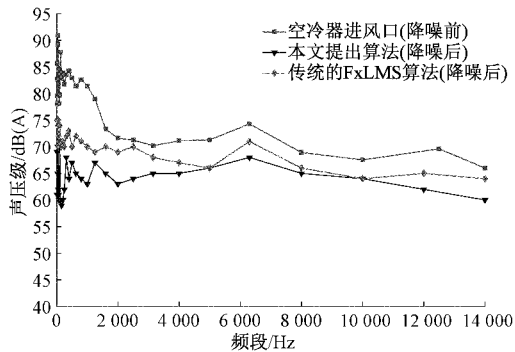


图 6 噪声数据频谱图

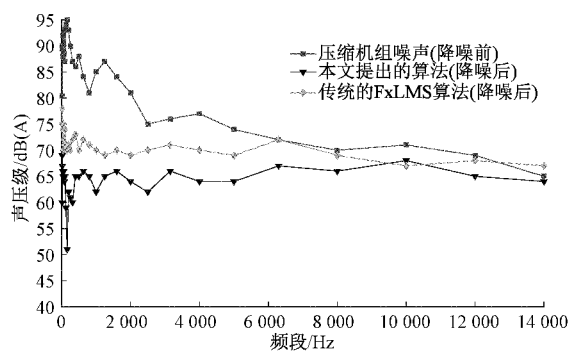
2.2 系统建模仿真结果

本文所设计的压缩机主动噪声控制系统的仿真所用仿真软件为 MATLAB2019a, 通过将压缩机旁不同位置的

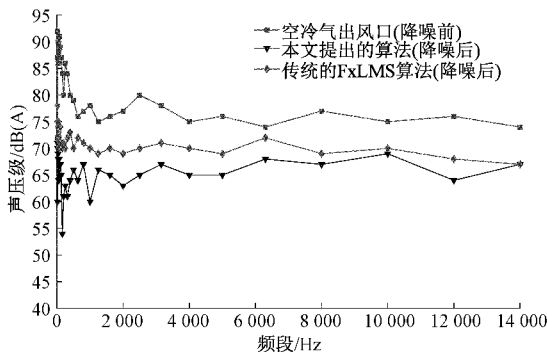
噪声数据输入模型进行处理可得到降噪后的数据频谱图如图 7 所示。



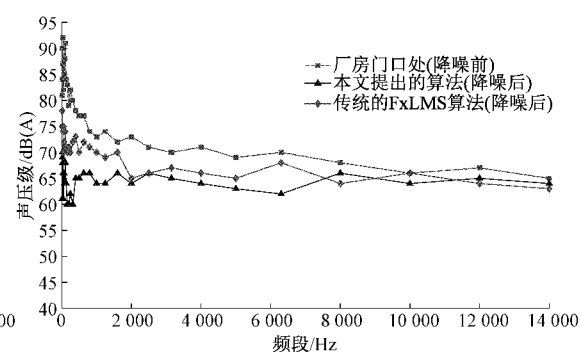
(a) 空冷器进风口处降噪前后对比



(b) 压缩机组降噪前后对比



(c) 空冷气出风口降噪前后对比



(d) 厂房门口处降噪前后对比

图 7 不同位置的降噪效果

如图 7 所示, 仿真结果表明分别将空冷器进风口、出风口、压缩机组以及厂房门口处的噪声作为输入时, 本文提出的算法最大降噪量可达 30 dB(A) 左右。

2.3 硬件调试结果

本文系统的核心控制模块采用 Xilinx A7 200T FPGA 进行设计, 同时借助爱华仪器的音频信号分析仪进行实时的噪声监控, 整个降噪装置所组成部分如图 8 所示, 主要包括的模块有 DCDC 开关电源、全频喇叭、音频信号分析仪、基于 FPGA 的音频信号处理板、参考麦克风、误差麦克风以及功率放大模块。

如图 9 所示, 利用 Vivado2019.1 软件的片内逻辑分析仪 ILA 抓取实时的音频数据, 该数据完全符合 IIS 协议标准, 表明音频数据的正常采集与播放。同时对算法的权值

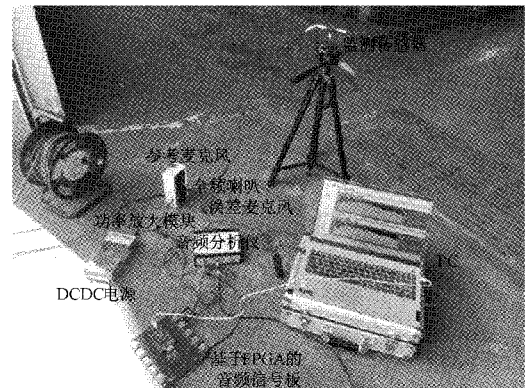


图 8 降噪装置



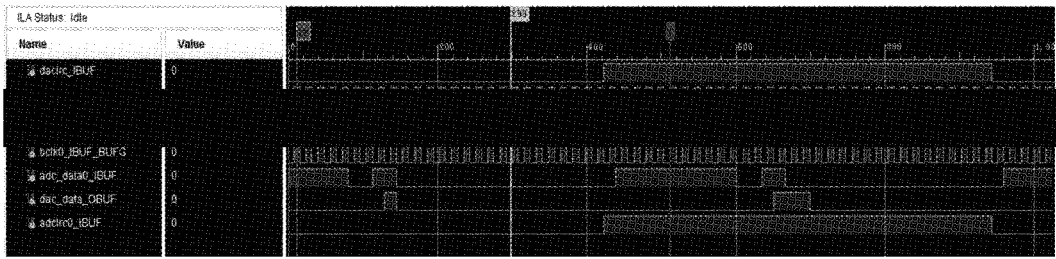


图 9 实时的音频数据

系数收敛过程以及误差信号变化过程进行抓取,实时波形 如图 10 所示。

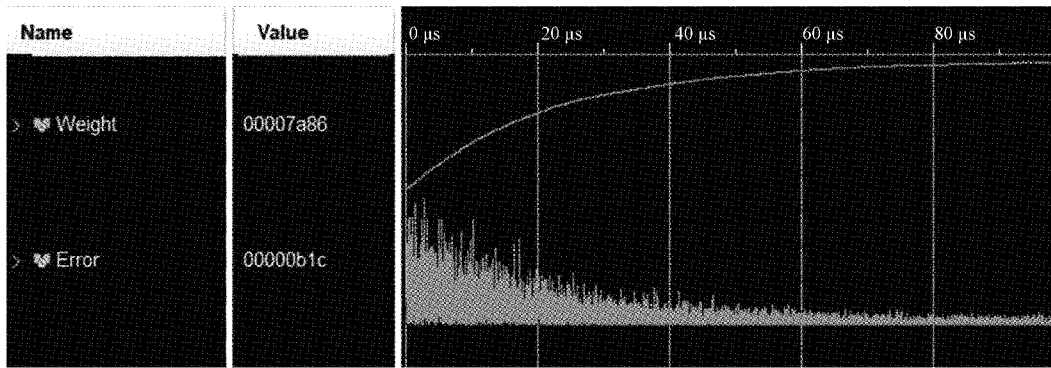


图 10 权值系数和误差信号的收敛过程

可以看出系统在运行  $30 \mu\text{s}$  时,收敛。通过音频信号分析仪可以获知误差麦克风处降噪前后的频谱图,如图 11 所示。

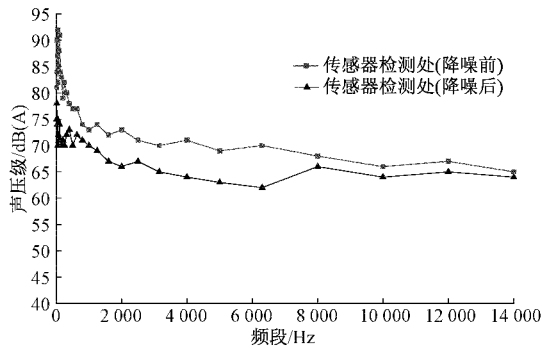


图 11 主动噪声控制系统传感器处的频谱图

利用爱华仪器声学设备对传感器检测处降噪前后的声压级进行测量,可以得到在低频部分有近  $20 \text{ dB(A)}$  的降噪效果。将本文提出的基于自适应 IIR 的主动噪声控制系统与传统的自适应 FIR、IIR 的主动噪声控制系统进行对比,如表 1 所示。

如表 1 所示,本文提出的主动噪声控制系统结构,在误差麦克风处实测有  $20 \text{ dB(A)}$  的降噪性能,硬件资源消耗更少,所消耗的 FPGA 的查找表资源为 8 671,寄存器为 1 104。与此同时,相对于传统的自适应 IIR 的主动噪声控制系统是非递归的系统,这保证了系统的稳定。

表 1 不同算法的性能对比

算法	仿真降噪量/ dB(A)	是否 递归	查找表	寄存器	实测 降噪量/ dB(A)
传统自适应 IIR <sup>[18]</sup>	22	是	9 807	1 368	16
FxLMS <sup>[19]</sup>	15	否	19 832	2 766	9
提出的自适应 IIR	30	否	8 671	1 104	20

### 3 结 论

本文针对燃气站内压缩机噪声控制进行研究,根据压缩机的噪声特性,提出基于自适应 IIR 滤波器的主动噪声控制算法,选取压缩机的空冷器进风口、空冷器出风口、压缩机组、厂房门口的噪声数据对算法进行软件验证,可以得到在低频段降噪量最高可以达到  $30 \text{ dB(A)}$ 。结合 Xilinx FPGA 搭建降噪装置,并借助音频信号分析仪实测厂房门的压缩机噪声降噪前后的变化情况,可以得到在低频段有着  $20 \text{ dB(A)}$  的降噪量。研究结果表明针对压缩机噪声的主动噪声控制有较好效果,本文设计的算法有着良好的性能。

### 参考文献

- [1] 庞立红,韩峰,刘玲,等. 客机发动机转子噪声主动控制研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2021(2):30-36.
- [2] 费艳锋,曹祖杨,李坚维. 关于主动降噪耳机的研究[J]. 电声技术, 2020,44(5):38-40.
- [3] AGGGERI F, ALBENDER F, BRUNNER B.

- Design of piezo-based avc system for machine tool applications[J]. Mech. Syst. Signal Pr., 2013, 36: 53-65.
- [4] GUO X, JIANG J, CHEN J, et al. Bibo-stable implementation of adaptive function expansion bilinear filter for nonlinear active noise control [J]. Appl. Acoust., 2020, 168: 107407.
- [5] LAM B, SHI C, SHI D. Active control of sound through full-sized open windows [J]. Building & Environment, 2018, 141(AUG.):15-27.
- [6] SHI C, JIA Z, XIE R. An active noise control casing using the multi-channel feedforward control system and the relative path based virtual sensing method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 144(4):106878.
- [7] NETTO S L, DINIZ P. Adaptive IIR filtering algorithms for system identification: A general framework [J]. Education IEEE Transactions on, 1995, 38(1):54-66.
- [8] CARINI A, MATHEWS V, SICURANZA G. Sufficient stability bounds for slowly varying direct-form recursive linear filters and their applications in adaptive IIR filters[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 47(9): 2561-2567.
- [9] 邹丽蓉, 张军峰, 林奇, 等. 某天然气处理厂压缩机噪声分析及治理方案[J]. 油气田环境保护, 2021, 31(2):30-35.
- [10] 孟凡姿, 张瑜, 王铮. 基于 ANC 技术的车载主动降噪系统设计[J]. 工业控制计算机, 34(4):148-149.
- [11] 谢豫娟, 谢锡海. 基于改进的 FXLMS 算法的主动降噪耳机系统研究[J]. 电声技术, 2021, 45(6):71-75.
- [12] 何康琪. 主动降噪技术于飞机机舱内的运用[J]. 中国航班, 2021(8):57-59.
- [13] 陈兵, 孙建伟. 齿轮箱振动噪声的研究综述[J]. 机电工程技术, 2020, 49(12):61-65.
- [14] 王海峰, 陈伟, 黄秋元. 基于 LMS 算法自适应噪声抵消器的分析研究[J]. 计算机与数字工程, 2009(3): 85-87.
- [15] 谷源涛. LMS 算法收敛性能研究及应用[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [16] 张倩. 变抽头长度 LMS 自适应算法研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(21):114-118.
- [17] 张红梅, 韩万刚. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法研究及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1822-1830.
- [18] KIM H W, PARK H S, LEE S K, et al. Modified-filtered-u LMS algorithm for active noise control and its application to a short acoustic duct[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2011, 25(1):475-484.
- [19] PURI A, MODAK S V, GUPTA K. Global active control of harmonic noise in a vibro-acoustic cavity using Modal FxLMS algorithm [J]. Applied Acoustics, 2019, 150(JUL.):147-161.

#### 作者简介

袁军, 博士, 副教授, 主要研究方向为混合信号 IC 设计和测试。

E-mail: yuanjun@cqupt.edu.cn

李军(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为数字信号处理及 VLSI 设计。

E-mail: 1093878959@qq.com