

9DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311878

# 一种稳健的窄带反馈型主动噪声控制系统\*

马亚平<sup>1,2,3</sup>, 胡计昶<sup>1</sup>, 吴定会<sup>1</sup>, 毕勤胜<sup>2</sup>, 路静<sup>3</sup>

(1. 江南大学物联网工程学院 无锡 214122; 2. 江苏大学 镇江 212013;  
3. 无锡和烁科技股份有限公司 无锡 214142)

**摘要:**传统窄带反馈型主动噪声控制系统采用并型自适应滤波器结构,用于合成参考信号时,仍存在参考信号合成质量较差、滤波器权值的初值设置难度高、应对非平稳窄带噪声的能力不足等问题。为解决以上问题,通过引入高效的串并型自适应滤波器结构来合成参考信号,提出新型的窄带反馈型主动噪声控制系统,改善参考信号合成质量,进而提升系统的整体降噪性能。新型系统不仅有效解决了传统系统存在的参考信号合成质量较差的问题,还降低了滤波器权值的初值设置复杂度,同时还提升了系统应对非平稳窄带噪声的能力。实验结果表明,新型系统较传统系统的前后两部分的降噪量分别提升了7.89和9.18 dB。仿真和实验结果共同验证了提出的系统较传统系统具有更强的稳健性和降噪性能。

**关键词:** 反馈型主动噪声控制; 自适应滤波器; 窄带噪声; 滤波-X最小均方算法; 降噪性能

**中图分类号:** TB535 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 41310

## Robust narrowband feedback active noise control system

Ma Yaping<sup>1,2,3</sup>, Hu Jichang<sup>1</sup>, Wu Dinghui<sup>1</sup>, Bi Qinsheng<sup>2</sup>, Lu Jing<sup>3</sup>

(1. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Wuxi Heshuofeng Technology Co., Ltd., Wuxi 214142, China)

**Abstract:** The traditional narrowband feedback active noise control (ANC) system uses the parallel adaptive filter to generate a reference signal. However, it still presents a poor quality of reference signal synthesis, high difficulty in setting the initial filter weights, and insufficient ability to suppress nonstationary narrowband noise. To solve the aforementioned problems, this article proposes a novel robust narrowband feedback ANC system where a cascaded-parallel adaptive filter is introduced to synthesize reference signal. In this way, the quality of reference signal synthesis is improved. In further, the overall noise reduction performance (NRP) is enhanced. The new system can not only solve the poor quality of reference signal synthesis in the traditional one but also reduce the complexity of the initial setting of filter weights and meanwhile improve the ability to cope with the non-stationarity of target noise. The experimental results show that the NRP of the new scheme is increased by 7.89 and 9.18 dB in the first half and second half respectively, as compared with the traditional one. Both simulated and experimental results show that the proposed system does present nice robustness and better NRP as compared with the traditional one.

**Keywords:** feedback active noise control; adaptive filter; narrowband noise; filtered-X LMS algorithm; noise reduction performance

## 0 引言

主动噪声控制(active noise control, ANC)技术已被广泛应用到降噪中,根据目标噪声频率分布特征,可分为宽带ANC和窄带ANC。其中,窄带ANC能够应对旋转设备(如切割机、风机、引擎)等产生的多频窄带噪

声<sup>[1-3]</sup>。窄带ANC系统根据控制器结构可进一步分为前馈型和反馈型两种。其中,前馈型窄带ANC系统围绕提升系统收敛性<sup>[4-5]</sup>、改善降噪性能<sup>[6]</sup>、次级通道辨识<sup>[7-8]</sup>、频率失调<sup>[9-11]</sup>、非线性控制<sup>[9-12]</sup>等被广泛研究并应用,上述前馈型窄带ANC系统均需采用参考传感器获取与目标噪声有关的频率等先验信息。

然而,前馈型窄带 ANC 系统所需的参考传感器难以应用到恶劣的降噪场合(如高温、污染等),相反,反馈型窄带 ANC 系统无需安装参考传感器,打破了对物理空间的限制,逐渐成为国内外学者的研究热点之一<sup>[1-3,13-19]</sup>。一种简化反馈型 ANC 系统直接把残余噪声用作控制器的输入,其可以降低传统的反馈型 ANC 系统的复杂度,但以牺牲降噪性能为代价<sup>[13]</sup>。改进的反馈型 ANC 系统采用自适应线性预测滤波器,其输入为初级噪声估计,经该自适应线性预测滤波器处理后的信号直接用作控制器的输入,以改善降噪性能<sup>[14]</sup>。围绕反馈型 ANC 系统在实际应用中可能发生的次级通道的时变性,开展基于次级通道在线辨识的反馈型 ANC 系统设计,提升系统的稳定性和降噪性能<sup>[15-17]</sup>。

为进一步提升参考信号合成质量和应对频率偏移能力,学者 Ho 等<sup>[18]</sup>提出了基于自适应线性增强器的窄带反馈型 ANC 系统,其中该自适应线性增强器仅采用并型自适应带通滤波器结构,用于合成参考信号并为控制器提供输入。然而,所采用的并型自适应带通滤波器用于合成参考信号进而用于噪声控制时,存在 3 方面的问题:1)该并型自适应带通滤波器对滤波权值的初值设置需要预测目标噪声的初始频率信息,如果选取不当,将导致窄带目标噪声中的不同频率分量估计收敛到同一频率值,则无法为次级声源合成提供准确的参考信号;2)该系统针对窄带目标噪声的频率分量发生较大突变的情形,会产生频率偏移;3)并型自适应带通滤波器为合成准确的参考信号要求其输入信号具有较高的信噪比;上述问题均会严重影响系统的稳定性和降噪能力<sup>[18]</sup>。最近,学者 Wu 等<sup>[19]</sup>提出了一种基于串并结合型自适应带通滤波器的频率估计方法,通过仿真和实验(振动信号等)共同验证了其良好的频率估计性能,然而该方法尚未应用于反馈型 ANC 系统,亟待将其推广到噪声控制领域,以寻求解决复杂环境下窄带目标噪声的噪声抑制问题。

综上所述,为进一步解决传统窄带反馈型 ANC 系统<sup>[18]</sup>主要存在上述滤波权值收敛性、应对窄带目标噪声突变能力不足、对信噪比要求较高等问题,本文将提出新型的窄带反馈型 ANC 系统,引入高效的串并型自适应滤波器结构,提升其中的并型自适应滤波器的输入信号的信噪比,有效改善参考信号合成质量,同时解决了滤波器权值的初值设置复杂度、应对非平稳窄带噪声能力不足、频率偏移的问题,提升系统在复杂应用场合的整体降噪性能。

## 1 传统窄带反馈型 ANC 系统及存在的问题

### 1.1 传统窄带反馈型 ANC 系统

传统窄带反馈型 ANC 系统的数学模型如图 1 所示,以多个频率参考分量为输入,且每个频率参考分量由基于自适应线性增强器的参考信号合成子系统产生。 $P(z)$

表示初级通道模型。 $S(z)$  表示真实次级通道模型,其单位脉冲响应系数为  $s(n) = [s_0, s_1, \dots, s_M]$ ,其中  $M$  为阶数。 $\hat{S}(z)$  表示次级通道估计模型,其单位脉冲响应系数为  $\{\hat{s}_j\}_{j=0}^{\hat{M}-1}$ ,其中  $\hat{M}$  为阶数。 $\{h_{k,0}(n), h_{k,1}(n)\}_{k=1}^K$  为控制器系数,由幅度相位调整结构组成。

窄带目标噪声可以表示为:

$$p(n) = \sum_{i=1}^{q_0} [A_i \cos(\omega_{p,i}n) + \theta_i] + v_p(n) \quad (1)$$

其中,  $v_p(n)$  为均差为 0、方差为  $\sigma_p^2$  的高斯白噪声;  $q_0$  为窄带频率分量的数目;  $A_i, \omega_{p,i}, \theta_i$  分别为第  $i$  个频率分量的幅值、频率和初始相位。

定义  $x(n)$  为参考信号,其实质是对窄带目标噪声  $p(n)$  的估计,即:

$$x(n) \equiv \hat{p}(n) = y_p(n-1) + e(n-1) \quad (2)$$

定义  $y(n)$  为次级声源信号,表示为:

$$y(n) = \sum_{k=1}^K y_k(n) = \sum_{k=1}^K h_{k,0}(n)x_k(n) + h_{k,1}(n)x_k(n-1) \quad (3)$$

其中,  $x_k(n)$  为第  $k$  个通道的频率参考分量,  $K$  为自适应线性增强器提供的窄带频率数目,取  $K \geq q_0$ 。

根据滤波-X 最小均方误差算法可以得到控制滤波器权值的更新公式如下:

$$h_{k,0}(n+1) = h_{k,0}(n) + \mu_1 e(n) \hat{x}_k(n) \quad (4)$$

$$h_{k,1}(n+1) = h_{k,1}(n) + \mu_1 e(n) \hat{x}_k(n-1) \quad (5)$$

其中,  $\mu_1$  是控制滤波器权值的更新步长,  $\mu_1 > 0$ 。

### 1.2 传统参考信号合成子系统

由图 1 可知,传统窄带反馈型 ANC 系统通过内部模式结构得到目标噪声估计,进而经传统参考信号合成子系统后获得  $K$  个频率参考分量。因此参考信号合成子系统快速且有效地估计每个频率参考分量对于 ANC 系统至关重要。传统系统中的参考信号合成子系统为自适应线性增强器,其本质是基于自适应二阶无限冲激响应(infinite impulse response, IIR)陷波器的并型滤波结构,如图 2 所示。

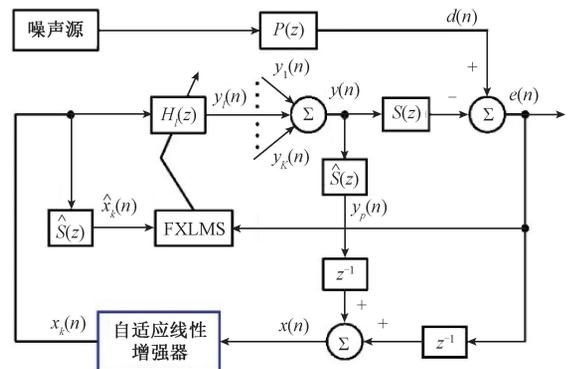


图 1 传统窄带反馈型 ANC 系统

Fig. 1 Traditional narrowband feedback ANC system

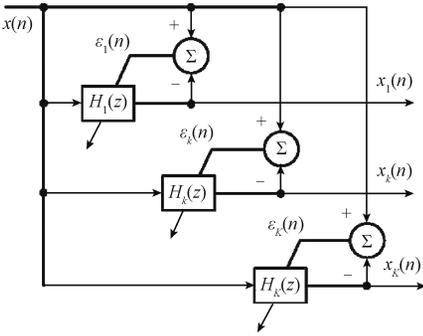


图 2 传统基于自适应线性增强器的参考信号合成子系统

Fig. 2 Traditional adaptive linear enhancer based reference signal synthesis subsystem

第  $k$  个二阶 IIR 陷波器的  $z$  域模型  $H_k(z)$  和相应的自适应带通滤波器的  $z$  域模型  $H_{k,bp}(z)$  分别为:

$$H_k(z) = \frac{1 + a_k z^{-1} + z^{-2}}{1 + \rho a_k z^{-1} + \rho^2 z^{-2}} \quad (6)$$

$$H_{k,bp}(z) = (\rho - 1) \frac{a_k z^{-1} + (\rho + 1)z^{-2}}{1 + \rho a_k z^{-1} + \rho^2 z^{-2}} \quad (7)$$

其中,  $\rho$  为极半径参数,  $\rho \in (0,1)$ ,  $a_k = -2\cos[\omega_k(n)]$  是与第  $k$  个二阶 IIR 陷波器的中心频率的余弦值有关的滤波权值(为便于描述,后续所述滤波权值均为  $a_k$ ),  $\omega_k(n)$  为二阶 IIR 陷波器的中心频率。

假设共有  $K$  个谐波需要消除,传统系统采用自适应线性增强器,把窄带目标噪声估计  $x(n)$  分成  $K$  个频率分量,用作控制器输入。

传统自适应线性增强器中第  $k$  个二阶 IIR 陷波器和第  $k$  个自适应带通滤波器的输出分别为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_k(n) = & -\rho a_k(n) \varepsilon_k(n-1) - \rho^2 \varepsilon_k(n-2) + \\ & \varepsilon_{k-1}(n) + a_k(n) \varepsilon_{k-1}(n-1) + \varepsilon_{k-1}(n-2) \end{aligned} \quad (8)$$

$$x_k(n) = x(n) - \varepsilon_k(n) \quad (9)$$

### 1.3 传统窄带反馈型 ANC 系统存在的不足

传统窄带反馈型 ANC 系统通过误差传感器合成窄带目标噪声估计,其自适应线性增强器实现对目标噪声估计的分离,获得多个频率参考分量,该系统无需非声学传感器获得参考信号,降低了系统硬件成本。

然而,该传统的窄带反馈型 ANC 系统仅仅采用串型自适应带通滤波器结构,其在参考合成时存在的主要问题是:滤波权值的初始值设置困难,若其初始值选取不当,将导致窄带目标噪声中的不同频率分量估计收敛到同一频率值,导致无法为次级声源合成提供准确的参考信号;该串型自适应带通滤波器结构要求其输入的信噪比较高;复杂应用场合中应对非平稳的窄带目标噪声的性能受到制约。

综上所述,传统的基于自适应线性增强器的窄带反馈型 ANC 系统,依然存在着诸如控制滤波器初值设置难度大、操作性不强、目标窄带噪声的频率分量发生突变时系统应对能力不足、对信噪比要求较高的问题,为其实际应用带来了较大的挑战。因此亟待开发更加稳健的窄带反馈型 ANC 系统,以满足实际应用。

## 2 基于串并型自适应滤波器的窄带反馈型 ANC 系统

为有效解决传统窄带反馈型 ANC 系统存在的上述问题,本节首先分析参考信号对于窄带反馈型 ANC 系统的影响,然后结合串并型自适应带通滤波器结构用以构成新型参考信号合成子系统,从而构建新型的基于串并型自适应滤波器的窄带反馈型 ANC 系统;并着重阐述本文所提出的新型参考信号合成子系统。

### 2.1 参考信号及其对窄带反馈型 ANC 系统的影响

反馈型 ANC 系统无需参考传感器,利用内部模式结构进行估计,从而合成参考信号,避免了前馈型结构 ANC 系统中广泛存在的声反馈问题。然而,当传统系统中的二阶 IIR 陷波器初值设置不当时,会导致后续的参考信号无法合成基频及各谐波参考分量,即多个频率参考分量可能收敛到同一频率,进而影响降噪效果,该情况在后续仿真及实验将对此进行验证。

### 2.2 新型窄带反馈型 ANC 系统

针对上述传统窄带反馈型 ANC 系统存在的问题,本文提出了新型的基于串并结合型自适应滤波器的窄带反馈型 ANC 系统,如图 3 所示。通过使用串并型自适应带通滤波器,实现对参考信号快速、准确地估计,进一步提高 ANC 系统地整体降噪性能。

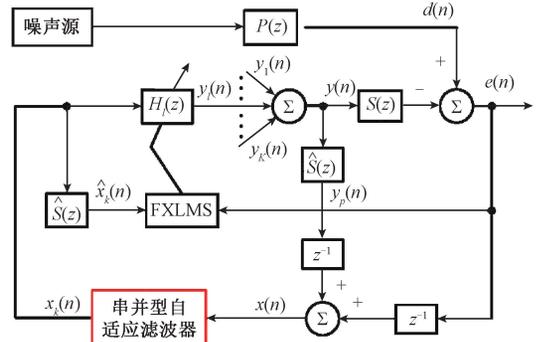


图 3 新型基于串并型自适应滤波器的窄带反馈型 ANC 系统

Fig. 3 The proposed narrowband feedback ANC system based on series-parallel adaptive filter

#### 1) 新型系统的基本组成结构

如图 3 所示,该系统包括窄带目标噪声合成子系统、

次级声源子系统和参考信号合成子系统。参考信号合成子系统采用串并型自适应带通滤波器结构用于合成参考信号;次级声源合成子系统用于提供次级声源;窄带目标噪声估计合成子系统用于估计目标噪声。

## 2) 新型参考信号合成子系统

所提出的新型参考信号合成子系统,如图4所示,其由串并型自适应带通滤波器结构组成,即串型前置结构和并型后置结构组成。其中的串型前置结构用于提升并型后置结构的输入信号的信噪比,进而提升参考信号的合成质量,为次级声源合成提供可靠的输入,进而改善系统的降噪性能。

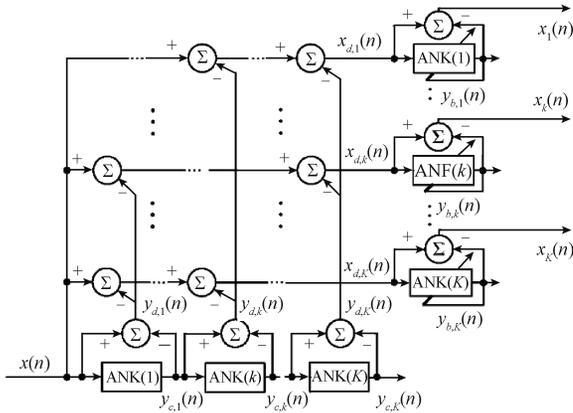


图4 基于串并型自适应滤波器的参考信号合成子系统

Fig. 4 Reference signal synthesis subsystem based on series-parallel adaptive filter

串型前置结构由  $K$  个带通滤波器组成,分别以依次首尾相连的串型连接方式连接,且为了尽可能地抑制目标噪声,带通滤波器的个数  $K$  应该不小于窄带目标噪声中的频率分量数目。每个带通滤波器,都是由二阶 IIR 陷波器构成。串型前置结构中,第  $k$  个带通滤波器组中的 IIR 陷波器的输出为:

$$y_{c,k}(n) = -\rho a_k(n) y_{c,k}(n-1) - \rho^2 y_{c,k}(n-2) + y_{c,k-1}(n) + a_k(n) y_{c,k-1}(n-1) + y_{c,k-1}(n-2) \quad (10)$$

串型前置结构第  $k$  个带通滤波器的输出信号为:

$$y_{d,k}(n) = y_{c,k-1}(n) - y_{c,k}(n) \quad (11)$$

该串型前置结构可有效地解决当滤波权值设置不当带来的窄带目标噪声中不同频率分量可能收敛到同一频率的问题。

并型后置自适应带通滤波器结构,也包含  $K$  个自适应滤波器,分别以并型连接方式连接,第  $k$  个自适应二阶 IIR 陷波器的输入和输出信号分别为:

$$x_{d,k}(n) = x(n) - \sum_{m=1, m \neq k}^K y_{d,m}(n) \quad (12)$$

$$y_{b,k}(n) = -\rho a_k(n) y_{b,k}(n-1) - \rho^2 y_{b,k}(n-2) + x_{d,k}(n) + a_k(n) x_{d,k}(n-1) + x_{d,k}(n-2) \quad (13)$$

并型后置结构中,第  $k$  个自适应带通滤波器的输出信号为:

$$x_k(n) = x_{d,k}(n) - y_{b,k}(n) \quad (14)$$

其中,  $x_k(n)$  即为第  $k$  个通道的频率参考分量,其为后续的控制提供输入。

为实现快速估计非平稳窄带目标噪声中的频率分量,基于梯度下降的思想,可采用归一化梯度算法对所提出的串并型自适应滤波结构中第  $k$  个二阶 IIR 陷波器的滤波权值更新迭代,即:

$$a_k(n+1) = a_k(n) - \mu_2 \frac{g_k(n) y_{b,k}(n)}{\varepsilon + G_k(n)} \quad (15)$$

其中,  $\varepsilon$  为保证分母非 0 的参数;  $\mu_2$  是  $a_k(n)$  的更新步长,  $\mu_2 > 0$ ;  $g_k(n)$  和  $G_k(n)$  分别是梯度信号和梯度信号滤波后能量值,分别表示为:

$$g_k(n) = -\rho y_{b,k}(n-1) + x_{d,k}(n-1) \quad (16)$$

$$G_k(n) = \alpha G_k(n-1) + (1-\alpha) g_k^2(n) \quad (17)$$

其中,  $\alpha$  是  $G_k(n)$  的遗忘因子,  $\alpha > 0$ 。

计算量方面,对比图2和4可发现,新型结构较传统结构引入了串型前置结构,该引入的串型前置结构包括  $K$  个 IIR 陷波器,每个 IIR 陷波器需要 4 次乘法和 4 次加法,因此,新型系统的计算量相较于传统系统增加了  $4K$  次乘法和  $4K$  次加法。另外  $K$  取值通常较小,该增加的计算量不会明显加重新系统的运行成本。

串并型自适应带通滤波器结构中 IIR 陷波器权值可设置为 -2 或 0,即各频率参考分量的数字频率值从 0 或  $0.5\pi$  开始自适应更新,无需窄带目标噪声的先验频率信息。

总之,提出新型的基于串并型自适应带通滤波器的窄带反馈型 ANC 系统,利用串并型自适应带通滤波器结构来构建参考信号合成子系统,不仅可实现快速且准确地跟踪窄带目标噪声中的频率分量,避免多个频率分量收敛到同一频率,还能够解决传统系统存在的滤波器滤波权值初值设置复杂度高的问题,有效改善参考信号合成性能,为控制器提供可靠输入,进而从整体上提升系统应对非平稳窄带目标噪声的能力。

## 3 仿真及实验验证

下面将从仿真和实验两个方面共同验证所提出新型系统的有效性。

### 3.1 仿真参数设置

利用 MATLAB 软件对所提出的新型基于串并型自适应带通滤波器的窄带反馈型 ANC 系统进行仿真验证。仿真次级通道为线性有限冲激响应 (finite impulse response, FIR) 滤波器,其长度为 21、截止频率为  $0.5\pi$ 。设置窄带目标噪声信号由 3 个归一化频率分别为  $0.1\pi$ ,  $0.2\pi$  和  $0.3\pi$  的正弦信号和加性高斯白噪声组成;所有频率分量幅值为

1、初始相位为 0;加性高斯白噪声的均值为 0、方差为 0.1。相应地,次级通道估计模型  $\hat{S}(z)$  长度为 31。仿真分为两组,每组中系统各模块的基本参数设置如下:

第 1 组仿真:滤波权值的初始值分为两种典型情形,一是初始值分别取窄带目标噪声中频率分量对应的初始值;二是取滤波初值为与目标噪声中频率分量无关的值。选取自适应带通滤波器个数为  $K = 3$ ;窄带控制器的更新步长为 0.01;二阶 IIR 陷波器的更新步长设定为 0.000 5、确保分母非 0 的参数设定为  $\varepsilon = 0.01$ 、极半径参数设定为 0.975、遗忘因子设定为 0.98;仿真数据总长度 30 000,系统独立运行 100 次,结果取其平均值。

第 2 组仿真:仿真数据总长度 60 000,在采样点 30 000 处目标噪声的频率分量发生突变,突变后目标噪声由 3 个归一化频率分别为  $0.15\pi$ 、 $0.25\pi$  和  $0.35\pi$  的正弦信号和高斯白噪声组成。其余条件与仿真 1 相同。

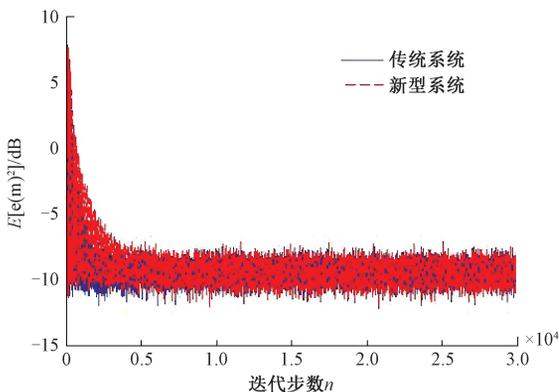
### 3.2 仿真结果及分析

#### 1) 仿真 1

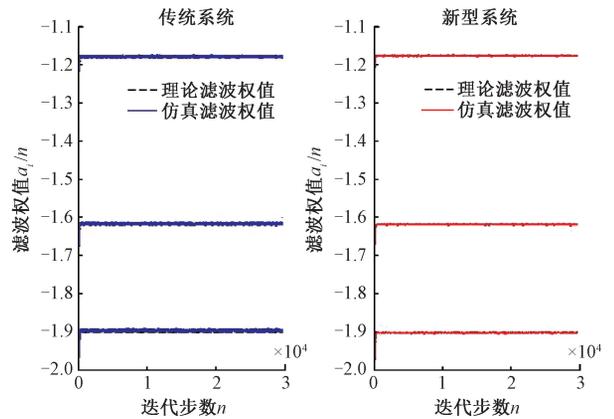
在第 1 组仿真中,传统的基于自适应线性增强器的窄带反馈型 ANC 系统和新型的基于串并型自适应带通滤波器的窄带反馈型 ANC 系统进行对比,其目的是验证传统窄带反馈型 ANC 系统中存在的滤波初值设置要求高问题以及所提新型 ANC 系统能够解决此类问题以及整体降噪性能。下面给出 3 种不同滤波权值初始值条件下的系统仿真结果及分析:

(1) 若 IIR 陷波器的滤波权值初值为 -2 分别乘以相应频率的  $\cos$  值,即需要以窄带目标噪声的频率值作为先验条件。图 5(a) 和(b) 分别为两个系统的残余噪声均方误差和滤波权值的对比变化图。

从图 5(a) 可知,当滤波权值的初值取别取窄带目标噪声中频率分量对应的初始值时,新型系统于传统系统在噪声抑制能力上相近,传统系统和新型系统在达到稳态后的残余噪声均方误差分别为 0.114 7 和 0.114 5,均趋于加性噪声的方差 0.1,说明两者的降噪性能相近。由图 5(b) 可知,无论是新型系统还是传统系统均能够快速准确地跟踪窄带目标噪声中频率分量。



(a) 系统残余噪声均方误差对比  
(a) Comparison of mean square error of residual noise

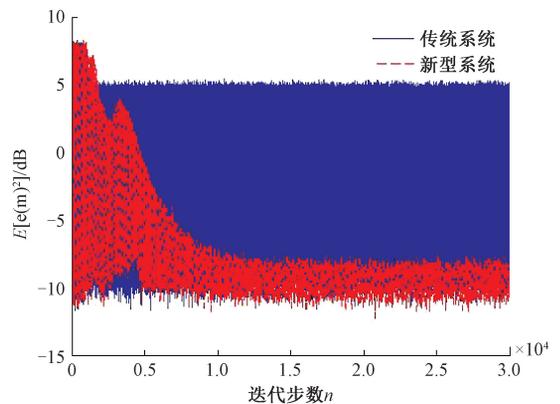


(b) IIR陷波器的滤波权值对比  
(b) Comparison of filtering weights of IIR notch filter

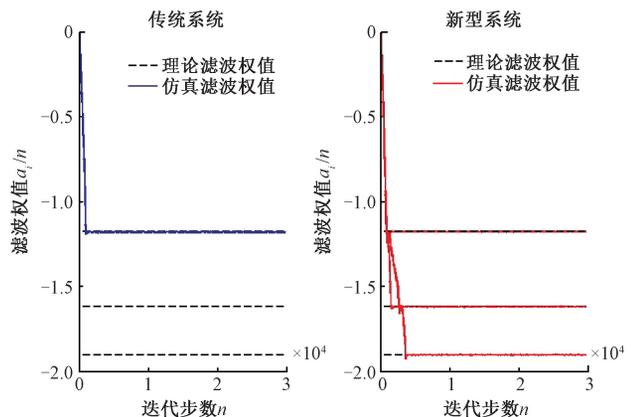
图 5 滤波权值初值均为  $-2\cos(\omega_{p,i})$  时噪声控制结果(仿真 1)

Fig. 5 Noise control result where initial value of filter weight is set to  $-2\cos(\omega_{p,i})$  (Case 1)

(2) 若 IIR 陷波器的滤波初值均为 0。图 6 残余噪声均方误差对比,以及两种系统的滤波权值变化。



(a) 系统残余噪声均方误差对比  
(a) Comparison of mean square error of residual noise



(b) IIR陷波器的滤波权值对比  
(b) Comparison of filtering weights of IIR notch filter

图 6 滤波权值初值为 0 时噪声控制结果图(仿真 1)

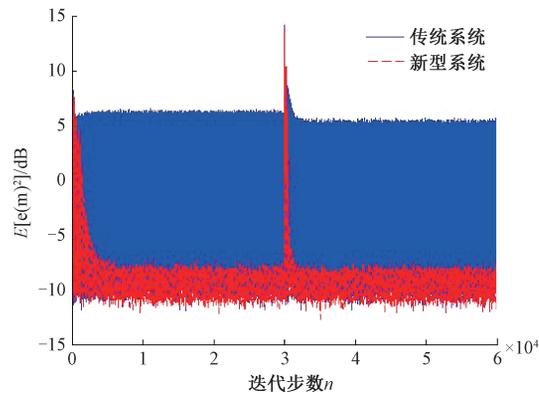
Fig. 6 Noise control result where the initial value of filtering weight is set to zeros (Case 1)

从图 6(a)可知,当滤波权值初值均取 0 时,传统系统和新型系统在达到稳态后的残余噪声均方误差分别为 1.084 2 和 0.114 3,显然新型系统的残余噪声均方误差更加性噪声的方差 0.1,说明了新型系统具有良好的降噪性能。图 6(b)进一步表明传统系统的参考信号结构中的滤波权值也无法准确跟踪正确值,且其收敛至一个频率对应的滤波初值上,而新型系统仍能够准确地收敛于理论滤波权值。

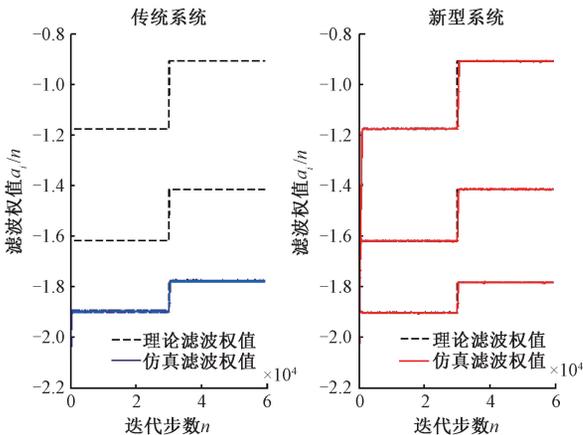
以上仿真从两种不同的 IIR 陷波器的滤波权值初值情形,共同验证了本文提出的新型系统较传统系统对初始值设置变化时具有更良好的鲁棒性,间接地说明新型系统不需要目标噪声中窄带分量的频率值作为先验信息,可简化系统参数设置,便于其实际应用。

2) 仿真 2

第 2 组仿真的目的是为了验证新型系统应对非平稳噪声的能力。图 7 给出了为两个系统的残余噪声均方误差对比、以及频率分量突变情况下传统系统与新型系统的滤波权值变化。



(a) 系统残余噪声均方误差对比  
(a) Comparison of mean square error of residual noise



(b) IIR陷波器的滤波权值对比  
(b) Comparison of filtering weights of IIR notch filter

图 7 滤波权值初始值为 0 时噪声控制结果图(仿真 2)

Fig. 7 Noise control result where the initial value of filtering weight is set to zeros (Case 2)

由图 7(a)可知,当目标噪声中的频率分量发生突变时,本文所提出的新型 ANC 系统具有更好的噪声抑制效果,而传统系统却无法有效抑制目标噪声。图 7(b)表明传统的基于自适应线性增强器的滤波权值无法收敛到正确值上。与之相反,新型系统的滤波权值能够快速准确地跟踪目标噪声中的频率分量,即新型系统面对目标噪声突变的跟踪性能同样优于传统系统。

表 1 给出了该仿真情况下系统残余噪声的均方误差,可知在仿真情形下,加性高斯白噪声的方差理论值为 0.1,传统系统的前后两部分的残余噪声均方误差值较大且严重偏离理论值,说明传统系统对于目标窄带噪声的抑制能力不足;与之相对,新型系统前后两部分的残余噪声均方误差接近理论值 0.10,说明新型系统对目标窄带噪声具有良好的降噪效果,进一步验证了新型系统鲁棒性更强,具有良好的降噪性能。

表 1 系统残余噪声均方误差值(仿真 2)

Table 1 Mean square errors of system residual noise (Case 2)

部分	传统系统	新型系统
前半部分	1.080 1	0.114 4
后半部分	1.095 0	0.113 5

上述两组仿真及结果分析,充分验证了本文新型基于串并型自适应带通滤波器的窄带反馈型 ANC 系统的有效性以及更好的降噪效果,可知当自适应 IIR 滤波权值相对于其理想值稍有一点偏差时,传统的滤波权值已经无法保证收敛到真实的频率分量。相反,新型系统由于使用了高效的串并型自适应带通滤波器结构合成参考信号,提升了参考信号合成质量,能够有效解决传统系统在合成参考信号时存在的不足,对目标窄带噪声具有更强的抑制效果,且整体降噪性能也更好。同时,提出的新型系统能够良好应对当窄带目标噪声中的频率分量发生较大突变的情形,鲁棒性更强。总之,新型系统具有良好的参考信号合成性能,能够有效解决滤波器权值的初值设置困难、目标噪声的非平稳等问题,具有良好的综合降噪性能。

3.3 实验结果及分析

为了验证本文所提出的新型窄带反馈型 ANC 系统具有更好的实用价值,此处选取的噪声源来自实际工况下的大型切割机噪声,采样率为 10.24 kHz,其由两段噪声组成,第 1 段转速为 1 600 rpm;第 2 段转速为 1 400 rpm。第 1 段窄带噪声的 4 个归一化频率分别为 0.090 3π、0.180 7π、0.271 0π 和 0.361 3π;后 1 段窄带噪声的 5 个归一化频率分别为 0.080 5π、0.160 9π、0.241 4π、0.321 8π 和 0.402 3π。

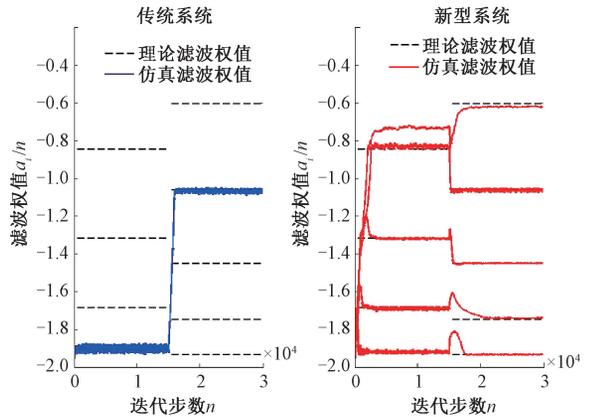
1) 参数设置

真实次级通道为分子和分母阶次均为 25 的实际 IIR 模型<sup>[1]</sup>。次级通道估计模型  $\hat{S}(z)$  可以通过系统辨识估计得到,设定线性 FIR 滤波器的长度为  $M = 32$ 。自适应带通滤波器个数为  $K = 6$ ;窄带控制器的更新步长为  $\mu_1 = 0.2$ ;二阶 IIR 陷波器的更新步长设定为  $\mu_2 = 0.012$ 、滤波权值的初值为  $-2$ , 确保分母非零的参数设定为  $\varepsilon = 0.01$ 、极半径参数设定为  $\rho = 0.92$ 、遗忘因子设定为  $\alpha = 0.98$ ;实际数据总长度为 30 000。

2) 实验结果分析

图 8(a)、(b)和(c)分别为实验情况下系统残余噪声波形、残余噪声能量、滤波权值变化的对比。从图 8(a)和(b)可发现,当实际噪声环境下的窄带目标噪声中的频率分量发生突变时,新型系统面对噪声突变的整体抑制效果仍然优于传统系统,具有显著的噪声抑制性能。从图 8(c)可知,当实际窄带目标噪声中的频率分量发生突变时,传统的基于自适应线性增强器的滤波权值无法收敛到正确的频率值。然而,新型系统的滤波权值仍能够快速跟踪目标噪声中的频率分量,即在实验情形下新型系统较传统系统仍具有更好的非平稳噪声抑制性能。

最后,表 2 给出了实验情况下传统系统和新型系统降噪量对比。由此可知,新型系统前后两半部分的降噪量较之传统系统分别提升了 7.89 和 9.18 dB,验证了提出的新型系统具有良好的噪声抑制性能。



(c) IIR陷波器的滤波权值对比  
(c) Comparison of filtering weights of IIR notch filter

图 8 实验情况下噪声控制结果

Fig. 8 Noise control result in experiment

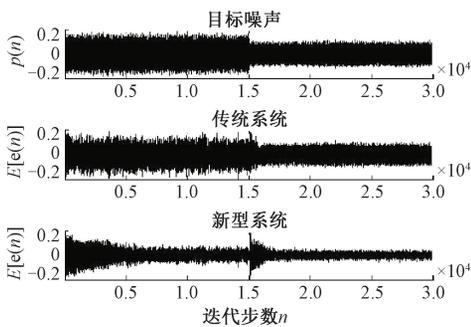
表 2 实验情况下传统系统和新型系统的降噪量对比  
Table 2 Noise reduction performance of both systems

部分	in experiment		dB
	传统系统	新型系统	
前半部分	2.85	10.74	
后半部分	2.10	11.28	

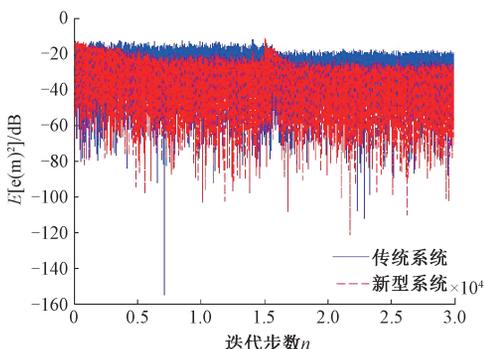
总之,实验结果进一步表明新型系统能够有效解决传统系统存在的参考信号合成质量较差、滤波器权值的初值设置困难、目标噪声的非平稳等问题,具有更高的应用价值。实时应用方面,现有 dSPACE 或 TI 公司 6000 系列数字信号处理器均可用于组成实时控制系统,保证新系统的实时运行。实际应用时,一方面可引入次级通道在线辨识技术<sup>[8,17]</sup>应对次级通道可能的时变性;另一方面可通过引入变步长自适应滤波算法<sup>[20]</sup>更新控制器和二阶 IIR 陷波器,进一步改善系统的收敛性和稳定性,利用其实际应用。

4 结 论

本文提出了新型基于串并型自适应滤波器的窄带反馈型 ANC 系统,该系统采用由二阶 IIR 陷波器按照串并型方式连接的自适应带通滤波器作为参考信号合成子系统,无需目标噪声的先验频率信息,可实现快速准确地跟踪目标噪声中的窄带频率分量,不仅解决了传统窄带反馈型 ANC 系统存在的各不同频率分量收敛到同一频率、参考信号合成质量较差的问题,还降低了滤波器权值初值设置复杂度,同时有效提升了其应对非平稳窄带目标噪声的能力。仿真和实验结果均表明提出的系统较传统



(a) 目标噪声和系统残余噪声对比  
(a) Comparison of primary noise and residual noise



(b) 残余噪声均方误差对比  
(b) Comparison of mean square error of residual noise

系统具有更强的稳健性和综合降噪性能,利于复杂降噪应用。

### 参考文献

- [ 1 ] KUO S M, MORGAN D R. Active noise control systems-algorithms and DSP implementation [ M ]. New York: Wiley, 1996.
- [ 2 ] KUO S M, MORGAN D R. Active noise control: A tutorial review [ J ]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(6): 943-973.
- [ 3 ] LU L, YIN K, LAMARE R C, et al. A survey on active noise control in the past decade-PartI: Linear systems[J]. Signal Processing, 2021, 183: 108039.
- [ 4 ] 祝文昭, 罗磊, 张夏. 一种低复杂度快速收敛的窄带主动噪声控制系统[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 85-92.
- ZHU W ZH, LUO L, ZHANG X. Novel low-complexity and fast-convergence narrowband active noise control system [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 85-92.
- [ 5 ] 姜守达, 薄中, 孙超. 一种用于窄带主动噪声控制系统的性能优化算法[J]. 电子学报, 2015, 43(12): 2513-2517.
- JIANG SH D, BO ZH, SUN CH. A performance optimized algorithm for NANC Systems [ J ]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43 (12): 2513-2517.
- [ 6 ] CHANG C Y, KUO S M. Complete parallel narrowband active noise control systems [ J ]. IEEE Trans. Audio, Speech, Language Processing, 2013, 21 (9): 1979-1986.
- [ 7 ] 孙金玮, 孙琳, 刘剑, 等. 一种含次级通道在线辨识的窄带主动噪声控制系统[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 252-257.
- SUN J W, SUN L, LIU J, et al. A narrowband active noise control system with on-line identification of secondary channels [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(2): 252-257.
- [ 8 ] MA Y P, XIAO Y G. A new strategy for online secondary-path modeling of narrowband active noise control[J]. IEEE-ACM Transactions on Audio, Speech, Language Processing, 2017, 25(2): 420-434.
- [ 9 ] XIAO Y G, MA L Y, KHORASANI K, et al. A new robust narrowband active noise control system in the presence of frequency mismatch [ J ]. IEEE Transactions on Audio, Speech, Language Processing, 2006, 14(6): 2189-2200.
- [ 10 ] JEON H J, CHANG T G, KUO S M. A narrowband active noise control system with frequency corrector [ J ]. IEEE Transactions on Audio, Speech, Language Processing, 2011, 19(4): 990-1002.
- [ 11 ] 黄博妍, 常琳, 马亚平, 等. 一种应对非平稳频率失调的窄带主动噪声控制系统 [ J ]. 自动化学报, 2015, 41(1): 186-193.
- HUANG B Y, CHANG L, MA Y P, et al. A new narrowband ANC system against non-stationary frequency mismatch [ J ]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(1): 186-193.
- [ 12 ] 罗磊, 孙金玮, 黄博妍, 等. 一种应对窄带非线性主动噪声控制的混合结构 [ J ]. 电子学报, 2017, 45(8): 1801-1809.
- LUO L, SUN J W, HUANG B Y, et al. A hybrid structure coping with narrow-band nonlinear active noise control [ J ]. Acta Electronica Sinica [ J ]. 2017, 45(8): 1801-1809.
- [ 13 ] WU L F, QIU X J, GUO Y C. A simplified adaptive feedback active noise control system [ J ]. Applied Acoustics, 2014, 81: 40-46.
- [ 14 ] MIYAZAKI N, KAJIKAWA Y. Modified-error adaptive feedback active noise control system using linear prediction filter [ J ]. IEICE Trans. Fundamentals, 2014, E97-A (10): 2021-2032.
- [ 15 ] AKHTAR M T. Narrowband feedback active noise control systems with secondary path modeling using gain-controlled additive random noise [ J ]. Digital Signal Processing, 2021, 111: 102976.
- [ 16 ] TAN X Y, MA Y P, XIAO Y G, et al. A new feedback narrowband active noise control system with online secondary-path modeling based on adaptive notch filtering [ C ]. Proceedings of Int. Conf. Adv. Mechatron. Syst., 2020: 78-82.
- [ 17 ] MA Y P, XIAO Y G, HUANG B Y, et al. A robust feedback active noise control system with online secondary-path modeling [ J ]. IEEE Signal Processing Letters, 2022, 29: 1042-1046.
- [ 18 ] HO C Y, SHYU K K, CHANG C Y, et al. Efficient narrowband noise cancellation system using adaptive line enhancer [ J ]. IEEE-ACM Transactions on Audio, Speech, Language Processing, 2020, 28: 1094-1103.

- [19] WU W Y, XIAO Y G, LIN J H, et al. An efficient filter bank structure for adaptive notch filtering and applications[J]. IEEE-ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2021, 29: 3226-3241.
- [20] MA Y P, XIAO Y G, MA L Y, et al. Statistical analysis of narrowband active noise control using a simplified variable step-size FXLMS algorithm [J]. Signal Processing, 2021, 183: 108012.

### 作者简介



马亚平,2010年于青岛科技大学获得学士学位,2012年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2019年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为江南大学副教授,主要研究方向为自适应信号处理、主动噪声控制。

E-mail: ypma@jiangnan.edu.cn

**Ma Yaping** received his B.Sc. degree from Qingdao University of Science and Technology in 2010, received his

M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2012, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2019. He is currently an associate professor at Jiangnan University. His main research interests include adaptive signal processing and active noise control.



吴定会(通信作者),1994年于北京大学获得学士学位,2004年于江南大学获得硕士学位,2010年于江南大学获得博士学位,现为江南大学教授,主要研究方向为信号处理、故障诊断。

E-mail: wdh123@jiangnan.edu.cn

**Wu Dinghui** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beihua University in 1994, received his M. Sc. degree from Jiangnan University in 2004, and received his Ph. D. degree from Jiangnan University in 2010. He is currently a professor at Jiangnan University. His main research interests include signal processing and fault diagnosis.