

孙道宗, 占旭锐, 刘思菁, 等. 基于 NLMS 算法的风送式喷雾机窄带有源降噪仿真研究 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 71-78.
SUN Daozong, ZHAN Xurui, LIU Sijing, et al. Simulation research on narrow-band active noise reduction of wind driven sprayer based on NLMS algorithm[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 71-78.

基于 NLMS 算法的风送式喷雾机窄带有源降噪仿真研究

孙道宗^{1,2}, 占旭锐¹, 刘思菁¹, 薛秀云^{1,2,3}, 谢家兴^{1,2}, 李震^{1,2,3}, 宋淑然^{1,2,3}

(1 华南农业大学 电子工程学院/人工智能学院, 广东 广州 510642; 2 广东省农情信息监测工程技术研究中心, 广东 广州 510642; 3 国家柑橘产业技术体系机械研究室/广东省山地果园机械创新工程技术研究中心, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】研究风送式喷雾机出风口噪声类别,并探索合适的降噪方法以提高降噪效果。【方法】通过分析风送式喷雾机出风口噪声频谱,采取窄带有源降噪方法对风机出风口噪声进行降噪,比较了3种常见的降噪算法,综合考虑算法收敛速度和降噪性能,选取NLMS算法作为核心算法;为改善窄带有源降噪系统中由非声学传感器引起的频率失调问题,引入遗传算法对转速器采集参数计算出的初始频率进行优化。将风机噪声作为输入信号,采取197、394、591、788和985 Hz 5个频率通道进行窄带有源降噪仿真。【结果】风送式喷雾机噪声以扇叶转动引起的旋转噪声为主。仿真结果表明,经过遗传算法迭代33次调频后的系统性能得到较好的改善,在NLMS算法迭代10 000次时系统收敛,5个频率通道噪声幅值分别降低了0.192、0.041、0.024、0.018和0.210 mm,取得总体约14 dB的降噪效果。【结论】NLMS算法对风送式喷雾机噪声有较好的降噪效果,遗传算法能够有效改善非声学传感器引起的频率失调问题。本研究为风送式喷雾机主动降噪方法提供了参考。

关键词: NLMS 算法; 主动降噪; 风送式喷雾机; 遗传算法; 窄带噪声; 调频
中图分类号: S224.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2021)06-0071-08

Simulation research on narrow-band active noise reduction of wind driven sprayer based on NLMS algorithm

SUN Daozong^{1,2}, ZHAN Xurui¹, LIU Sijing¹, XUE Xiuyun^{1,2,3}, XIE Jiaying^{1,2}, LI Zhen^{1,2,3}, SONG Shuran^{1,2,3}

(1 College of Electronic Engineering/College of Artificial Intelligence, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Guangdong Engineering Research Center for Monitoring Agricultural Information, Guangzhou 510642, China; 3 Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System/Guangdong Engineering Technology Research Center for Mountainous Orchard Machinery, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To analyze the noise in the air outlet of wind driven sprayer, explore the appropriate noise reduction methods and improve the noise reduction effect. 【Method】This paper analyzed the noise frequency spectrum in the air outlet of the wind driven sprayer, adopted the narrow-band active noise reduction method to reduce the noise of fan outlet, analyzed three common noise reduction algorithms, comparatively

收稿日期:2021-04-30 网络首发时间:2021-10-12 12:48:01
网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20211012.1110.002.html>
作者简介:孙道宗(1979—),男,副教授,博士,E-mail: sundaozong@scau.edu.cn; 通信作者: 宋淑然(1965—),女,教授,博士,E-mail: songshuran@scau.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金(31671591, 31971797); 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设专项资金(2021KJ108); 广州市科技计划(202002030245); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助(CARS-26); 广东省教育厅特色创新类项目(2019KTSCX013); 大学生创新创业训练计划(201910564147); 广东省现代农业关键技术集成与示范推广

considered the convergence speed and noise reduction performance of three algorithms, and selected the NLMS algorithm as the core algorithm. In order to improve the frequency disturbance caused by non acoustic sensors in the narrow-band active noise reduction system, genetic algorithm was introduced to optimize the initial frequency calculated by the acquisition parameters of the rotator. The fan noise was taken as the input signal, and five frequency channels (197, 394, 591, 788 and 985 Hz) were used for narrow-band active noise reduction simulation. 【Result】 The noise of the wind driven sprayer was mainly rotating noise caused by fan blade rotation. The simulation results showed that the system performance was improved after 33 iterations of the genetic algorithm. When the NLMS algorithm was iterated 10 000 times, the system converged, and the amplitudes of the five frequency channels were reduced by 0.192, 0.041, 0.024, 0.018 and 0.210 mm respectively, and the overall noise reduction effect was about 14 dB. 【Conclusion】 The NLMS algorithm has better reduction effect on the noise of wind driven sprayer. Genetic algorithm can effectively improve the frequency disturbance caused by non acoustic sensors. This study provides a reference for active noise reduction methods of wind driven sprayers.

Key words: NLMS algorithm; active noise reduction; wind driven sprayer; genetic algorithm; narrowband noise; frequency modulation

风送式喷雾机使用时会产生较大的噪声,对操作人员和附近居民造成危害,其中扇叶转动引起的气动噪声是风机噪声的主要类别^[1]。近年来在风机降噪方向的研究中,大部分是采用被动降噪的方法对噪声进行控制,即对风机的机械结构进行研究改进,以降低风机的气动噪声和机械噪声^[2-4]。

对于低频噪声,单纯地改进结构很难显著地将其削弱,而降低低频噪声正是主动降噪的强项,这也促使主动降噪研究的发展^[5]。在主动噪声控制(Active noise control, ANC)系统^[6-9]中,最小均方(Least mean square, LMS)算法以计算复杂程度低、收敛性好等特性成为自适应算法中稳定性最好、应用最广的算法^[10-13]。LMS 算法及其相关的改进算法在管道噪声控制上取得了较好的效果^[14-15],但在实际风机噪声控制中,会遇到一些干扰因素。针对风机气流对主动降噪噪声采集会造成影响这一问题,Negri 等^[16]提出了一种利用管壁侧面钻孔、开槽来透声,并选取一个密闭小盒罩住透声位置,将参考和误差麦克风放在盒体内进行采集,该研究采集到了较为准确的管道噪声,为后续风机主动噪声控制的多通道排布方式指明了方向。毛梦菲^[17]及其他学者^[18-19]对管道噪声进行 DSP 硬件实现,取得了良好的降噪效果,为风机降噪硬件设计提供了参考。王玉成^[20]使用遗传算法改进了 ANC 系统,对 LMS 算法中的权值计算进行优化,改善了系统降噪性能。孙晓阳^[21]在 ANC 系统的次级声源优化算法中引入了遗传算法,调整了次级声源的位置分布、数量、音源强度,使得整体降噪效果显著提升。

尽管已经有很多学者对管道噪声有源控制进

行建模仿真,但对大型风送式喷雾机主动降噪研究较少。为了进一步分析风送式喷雾机噪声,改善风机带来的噪声污染,本文采集了风送式喷雾机出风口的噪声并进行频谱分析,对比 3 种常用主动降噪算法,并根据风送式喷雾机出风口噪声强度较大的特点,采用非声学传感器采集参考信号,提出了一种基于遗传算法的频率失调(Frequency mismatch, FM)调频措施,并进行仿真分析。本研究旨在利用窄带有源降噪系统降低风送式喷雾机出风口噪声,并改善由非声学传感器带来的频率失调问题。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验采用的风送式喷雾机如图 1 所示,风机具体参数如下:叶轮直径 780 mm,叶片 8 个,三相交流异步电动机,椭圆形导流器,导流片 5 个。采集该风机位于出风口处的噪声,并对采样得到的信号进行频域分析,得到的时域信号及频谱分别如图 2 和图 3 所示。



图 1 风送式喷雾机实物图

Fig. 1 The picture of wind driven sprayer

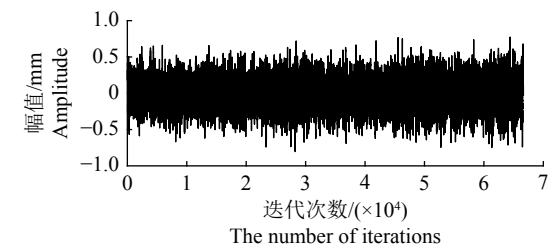


图 2 出风口噪声时域图

Fig. 2 Time domain diagram of air outlet noise

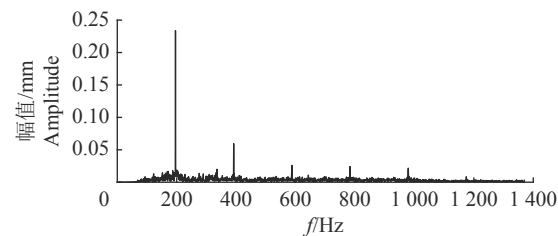


图 3 出风口噪声频域图

Fig. 3 Frequency domain diagram of air outlet noise

风机扇叶旋转对风筒内的气体进行周期性的拍打,引起气流的压力脉动,从而产生噪声。旋转噪声的频率与风机的转速存在一定的关系,基频的计算公式如式 (1)^[22-25] 所示:

$$f'(\text{Hz}) = \frac{va}{60}, \tag{1}$$

式中, v 为风机转速, r/min ; a 为叶片数目。旋转噪声在基频或者高次谐波 (基频的整数倍) 达到峰值,如图 3 所示,因为其频谱具有离散性,因此旋转噪声也被称为离散噪声^[26-28]。

转速仪测得风机转速为 $1\,480\,\text{r/min}$,由式 (1) 计算出旋转噪声基频为 $197\,\text{Hz}$,噪声信号能量集中在频率 $197\,\text{Hz}$ 及其整数倍的窄带内,且频率主要分布在 $1\,000\,\text{Hz}$ 以下,在 197 、 394 、 591 、 788 、 $985\,\text{Hz}$ 处呈现能量峰值,说明风送式喷雾机的出风口噪声以旋转噪声为主;因此,风送式喷雾机有源降噪系统仅需对能量集中的窄频带内噪声进行消除^[29-31]。

1.2 主动噪声控制算法原理

主动噪声控制是利用声波的相消干涉原理,通过加入与参考噪声幅值相同、相位相反的信号进行叠加,从而达到控制或者抑制噪声的目的。主动噪声控制中应用广泛的自适应滤波算法有递归最小二乘 (Recursive least squares, RLS)、LMS 算法等^[32-34],本文对比选取基于 LMS 算法改进的 1 种次级通道补偿的算法和 2 种变步长的算法,对比选取用于风送式喷雾机的降噪算法。

1.2.1 FxLMS 算法原理 滤波-x 最小均方 (Filtered-x least mean square, FxLMS) 算法的原理图如图 4 所示。图 4 中 $x(n)$ 为参考信号, $P(z)$ 为初级

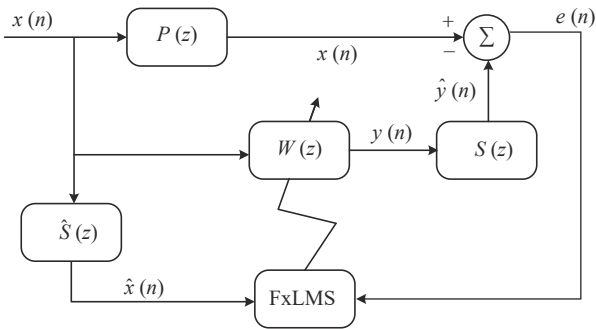


图 4 FxLMS 算法原理图

Fig. 4 Schematic diagram of FxLMS algorithm

通道, $S(z)$ 为次级通道, $W(z)$ 为 FxLMS 算法更新的滤波器,自适应滤波器长度为 M ,在误差传感器处参考信号 $x(n)$ 指实际采集到的噪声, $\hat{S}(z)$ 为次级通道估计, $\hat{x}(n)$ 是经过次级通道估计后的输出, $e(n)$ 是误差信号, $y(n)$ 是 FxLMS 算法滤波器输出, $\hat{y}(n)$ 是滤波器输出 $y(n)$ 经过次级通路后得到的响应。 $\hat{y}(n)$ 如式 (2) 所示:

$$\hat{y}(n) = y(n) \cdot s(n), \tag{2}$$

式中, $s(n)$ 为次级通道 $S(z)$ 在时刻 n 的脉冲响应。设时刻 n 滤波器权系数 $w(n)$ 和参考信号 $x(n)$ 分别如式 (3) 和式 (4)^[9] 所示:

$$w(n) = [w_1(n), w_2(n), \dots, w_M(n)]^T, \tag{3}$$

$$x(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-M+1)]^T, \tag{4}$$

滤波器输出如式 (5) 所示:

$$y(n) = x^T(n) \cdot w(n), \tag{5}$$

经过次级通道估计的输出如式 (6) 所示:

$$\hat{x}(n) = x(n) \cdot \hat{s}(n), \tag{6}$$

式中, $\hat{s}(n)$ 为次级通道估计在时刻 n 的脉冲响应。误差信号如式 (7) 所示:

$$e(n) = x_p(n) - \hat{y}(n), \tag{7}$$

根据最小均方差准则,有源控制系统的目标函数 $J(n)$ 如式 (8) 所示:

$$J(n) = E[e^2(n)], \tag{8}$$

根据最速下降法,权值更新如式 (9) 所示:

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu \cdot e(n) \cdot \hat{x}(n), \tag{9}$$

式中, μ 为常量,代表 FxLMS 算法步长。

相对于传统 LMS 算法, FxLMS 算法加入了对次级通道的估计,有效地对次级通道造成的影响进行了补偿,算法收敛迅速,得到了广泛的应用。

1.2.2 VSSLMS 算法原理 变步长 (Varied step size LMS, VSSLMS) 算法是基于 FxLMS 算法改进的算法,提出了一种变步长的权值系数更新算法,

能在一定程度上降低稳态误差,同时保证良好的收敛速度,且改良了 LMS 算法对不平衡信号处理能力弱的问题。VSSLMS 算法的结构图与 FxLMS 算法一致,只是改变了权值迭代式。VSSLMS 算法的权值更新和步长更新分别如式 (10) 与 (11)^[35]:

$$w(n+1)=w(n)+2\mu'(n)\cdot e(n)\cdot \hat{x}(n),$$

(10)

$$\mu'(n+1)=\alpha\mu'(n)+\beta e^2(n),$$

(11)

式中, $\mu'(n)$ 为 n 时刻的算法步长, α 与 β 是步长更新中的 2 个常量,用来控制步长。

1.2.3 NLMS 算法原理 NLMS(Normalized least mean square) 算法即归一化 LMS 算法,也是基于 FxLMS 算法改进的变步长算法, NLMS 算法的结构图与 FxLMS 算法一致,只是改变了权值迭代式。NLMS 算法的权值迭代式如式 (12)^[36] 所示:

$$w(n+1)=w(n)+\frac{2\eta}{r+\hat{x}^2(n)}e(n)\cdot \hat{x}(n),$$

(12)

式中, η 与 r 是 2 个常量,用来控制算法步长。在降噪过程中,瞬时功率会逐渐增大,根据式 (12),权值变化速度会逐渐增大,从而使系统收敛更快,稳定性更强, NLMS 也是有源降噪中常用的一种算法。

1.2.4 算法性能对比 为了尽量在相同降噪能力下比较算法收敛速度,以 NLMS 算法中参数为 $\eta=0.3$ 、 $r=0.0001$, VSSLMS 算法中参数为 $\alpha=0.97$ 、 $\beta=8\times10^{-3}$, FxLMS 算法中参数 $\mu=0.001$ 来对比收敛速度和降噪能力,图 5 为 3 种算法的收敛曲线图。

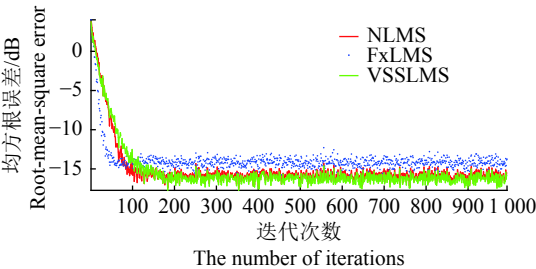


图 5 3 种算法收敛曲线

Fig. 5 Convergence curves of three algorithms

由图 5 可以发现,经过迭代后,3 种算法对应的曲线都已收敛,表现出了良好的性能。FxLMS 算法在迭代到 50 次时收敛,误差在 -14 dB 左右; NLMS 算法迭代至 100 次收敛,误差在 -16 dB 左右; VSSLMS 算法迭代至 200 次收敛,误差在 -16 dB 左右。相较于变步长的 NLMS 和 VSSLMS 算法,固定步长的 FxLMS 算法收敛速度更快,但降噪效果比变步长算法差, NLMS 算法和 VSSLMS 算法降噪效果更加明显。由图 5 对比可以看出, VSSLMS 算法与 NLMS 算法降噪性能差别不大,但 VSSLMS

算法复杂度更高,在相同降噪效果的前提下, NLMS 算法收敛速度更快;综合考虑收敛速度和降噪性能,本文选择 NLMS 算法作为风送式喷雾机有源降噪算法。

对变步长算法 NLMS 在 η 分别为 0.3、0.8、1.3 和 1.8 的条件下进行仿真,得到的仿真结果如图 6 所示。

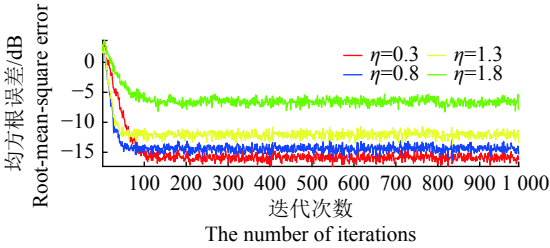


图 6 不同步长对 NLMS 算法的影响

Fig. 6 Influence of different step size on NLMS algorithm

由图 6 可以看出,随着步长的增大, NLMS 算法收敛速度先有所提高,之后又下降,而算法精度却逐渐减小。算法自适应收敛时收敛速度和精度相矛盾,步长大,即收敛系数大,收敛速度可能有所改善,但精度却变差,反之亦然。综合考虑,本文风送式喷雾机降噪系统参数 $\eta=0.3$ 。

2 风送式喷雾机有源降噪系统

风送式喷雾机有源降噪系统采用前馈结构,由“1.1”对风机出风口噪声的分析可知,风机噪声主要成分是旋转噪声,由于风机噪声的强度较大,使用声学传感器采集参考信号会对次级信号产生干扰,考虑使用非声学传感器采集参考信号的情况,本文风送式喷雾机有源降噪系统采用转速器采集风扇转速作为同步信号,并通过式 (1) 计算旋转噪声的基频频率,并计算相应的多次谐波频率,以计算出的频率设计相应正弦信号,将多个正弦信号合成后作为系统的参考信号。

在使用非声学传感器进行窄带有源噪声控制时,系统不稳定的因素主要有参考信号的频率失调以及噪声信号的非平稳。在主动噪声的研究中,引起频率失调的因素有很多。在 ANC 系统中,非声学传感器(加速度计、转速计等)测量参考信号参数时,传感器不稳定、设备改变转速、环境温湿度等因素都会对参考信号有影响,使测量值与设备真实值不一致,造成频率失调^[37]。为解决转速器采集数据失真对降噪性能的影响,本文采用遗传算法对采集的转速参数进行实时调整,将转速器采集到的状态稳定的风机的转速参数作为初始条件参数,代入 NLMS 算法进行迭代,将误差信号的均方根差作

为目标函数进行遗传算法优化, 得出调频后的最佳频率。

基于 NLMS 算法的风送式喷雾机窄带有源降噪算法原理如图 7 所示。

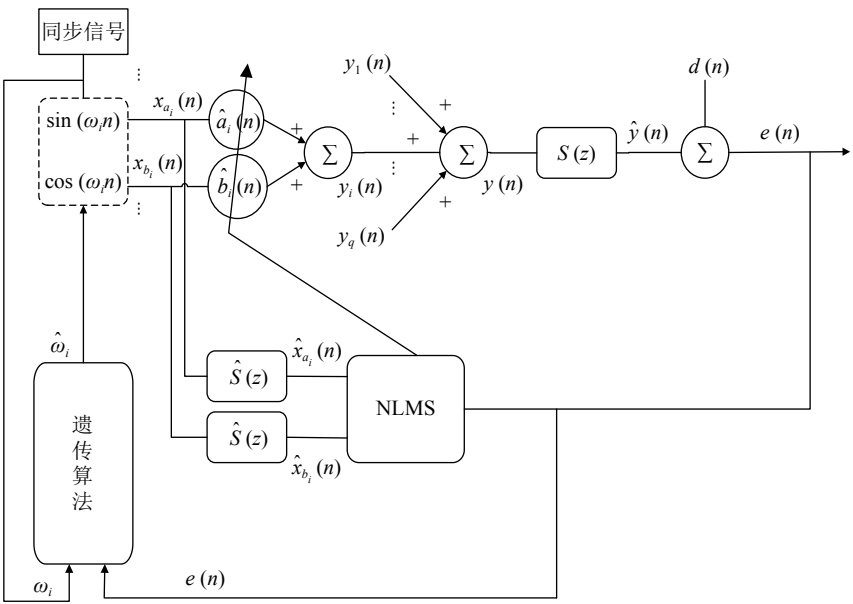


图 7 风送式喷雾机窄带有源降噪系统结构图

Fig. 7 Structure diagram of narrow-band active noise reduction system for wind driven sprayer

图 7 中, 第 i 频率通道中的第 i 个参考信号由正弦和余弦信号给出, 如式 (13) 和 (14) 所示:

散傅里叶系数估计迭代式如式 (19) 和 (20) 所示:

$$X_{a_i}(n) = \sin(\omega_i n), \tag{13}$$

$$X_{b_i}(n) = \cos(\omega_i n). \tag{14}$$

理论上 ω_i 应该与噪声信号中的第 i 个频率通道的频率值相等, 参考信号注入系统后, 经过次级通道估计 $\hat{S}(z)$ 滤波产生滤波参考信号 $\hat{x}_{a_i}$ 和 $\hat{x}_{b_i}$, 如式 (15) 和 (16) 所示:

$$\hat{x}_{a_i}(n) = \sum_{j=0}^{N-1} \hat{s}_j x_{a_i}(n-j), \tag{15}$$

$$\hat{x}_{b_i}(n) = \sum_{j=0}^{N-1} \hat{s}_j x_{b_i}(n-j), \tag{16}$$

式中, N 和 $\hat{s}_j$ 分别为次级通道估计的滤波器阶数和滤波器系数, 经过次级通道 $S(z)$ 的抵消噪声信号 $\hat{y}(n)$ 如式 (17) 所示:

$$\hat{y}(n) = \sum_{j=0}^{N-1} s_j \left[\sum_{i=1}^q y_i(n-j) \right], \tag{17}$$

式中, s_j 为次级通道的滤波器系数。输入次级信号 $y(n)$ 如式 (18) 所示:

$$\begin{aligned} y(n) &= \sum_{i=1}^q y_i(n) \\ &= \sum_{i=1}^q \left[\hat{a}_i(n) \cdot x_{a_i}(n) + \hat{b}_i(n) \cdot x_{b_i}(n) \right], \end{aligned} \tag{18}$$

式中, q 为频率通道个数, $\{\hat{a}_i, \hat{b}_i\}_{i=1}^q$ 是输入次级信号各频率的离散傅里叶系数估计, 基于 NLMS 算法的离

则整个系统的误差信号如式 (21) 所示:

$$e(n) = d(n) - \hat{y}(n). \tag{21}$$

将每个频率通道的参考频率 ω_i 作为初始参数输入遗传算法中, 选取 5% 的频率误差范围作为本仿真中遗传算法的初代种群范围。以误差信号的均方根误差作为遗传算法的适应度函数如式 (22) 所示:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{b} \sum_{i=1}^b y_i^2}, \tag{22}$$

式中, b 为采样点数, y_i 为每点的信号幅值。遗传算法中每代种群数量 $P=50$, 参数在 $95\%\omega_i$ 到 $105\%\omega_i$ 间随机生成初代种群, 计算初代种群的适应度, 进行选择计算、交叉计算、变异计算, 生成的次代种群重复进行上述计算, 遗传算法终止条件为进化代数达到 100 代。输入参数选取 5 个频率通道, 即 $m=5$ 。通过 Matlab 遗传算法工具箱进行迭代优化, 将优化后的频率 $\hat{\omega}_i$ 作为新的参考信号的频率参数输入, 达到改善频率失调的目的。

在系统中加入调频算法后,将5个频率分量的初始值作为遗传算法的输入参数,遗传算法的具体参数见表2。仿真设置失调量为1%,经过遗传算法进行调频降噪,将噪声误差的均方根误差

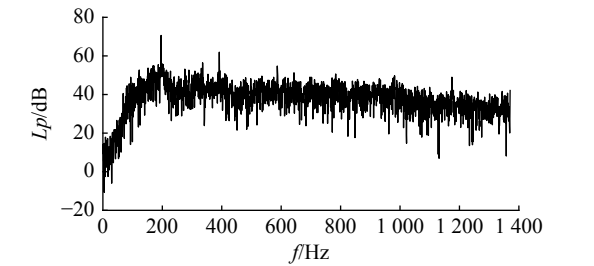


图 11 频率失调量 1% 时降噪后声压级

Fig. 11 Sound pressure level after noise reduction with the frequency misalignment of 1%

作为遗传算法的适应度函数, 得到的算法迭代数值如图 12 所示。

表 2 遗传算法参数

Table 2 Genetic algorithm parameters

名称 Name	数值 Value
种群大小(P) Population size	50
终止进化代数(S) Terminating evolution iterations	100
交叉概率(PC) Crossover probability	0.5
变异概率(PN) Mutation probability	0.01
输入参数个数(m') Input parameter number	5
初代种群/% Primary population	95~105

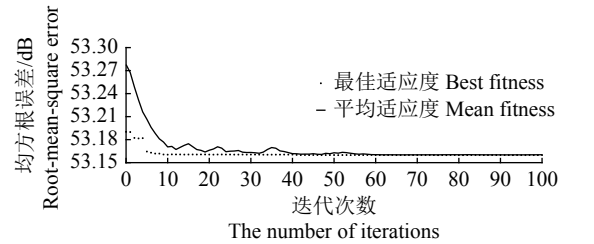


图 12 遗传算法迭代数值

Fig. 12 Genetic algorithm iteration value

由图 12 可知, 经过遗传算法的迭代, 在第 33 代种群时找到最佳频率参数, 最佳均方根误差=53.178 0。经过遗传算法找到最优的频率参数后降噪的时域信号如图 13 所示, 频域信号如图 14 所示, 降噪后的声压级与频域关系如图 15 所示。

图 13 表明, 在经过约 10 000 次权值迭代后, 幅值降低 0.6 mm, 噪声信号显著减弱。由图 14 的频域分析发现, 经过窄带有源降噪后, 风送式喷雾机噪声在 197、394、591、788、985 Hz 5 个主要频率点幅值分别下降 0.192、0.041、0.024、0.018、0.210 mm; 对比图 9、11、15, 经过调频后, 比频率失调时在各个峰值频率处均降低 0.06 mm, 降噪效果得到明显改善, 风送式喷雾机整体取得约 14 dB 的降噪效果。

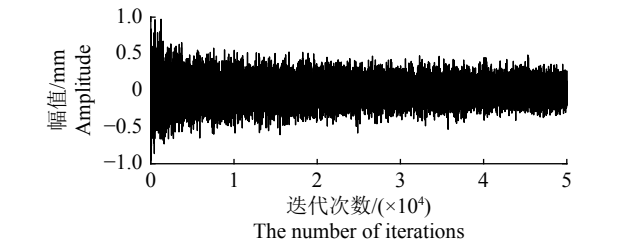


图 13 调频降噪后时域信号

Fig. 13 Time domain signal after noise reduction through frequency modulation

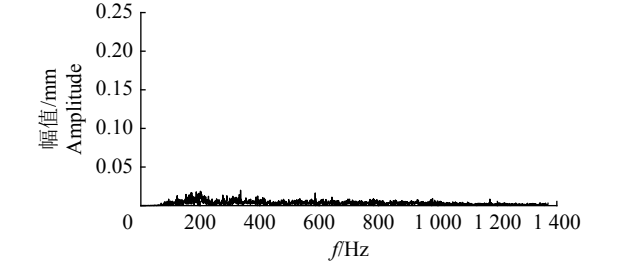


图 14 调频降噪后频谱

Fig. 14 Frequency spectrum after noise reduction through frequency modulation

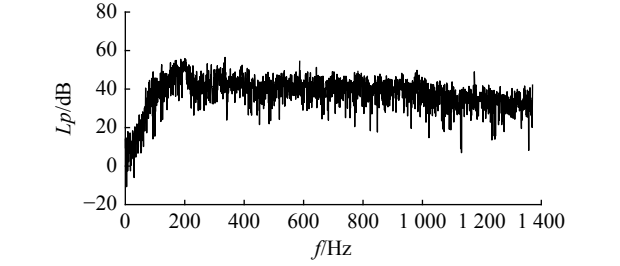


图 15 调频降噪后声压级

Fig. 15 Sound pressure level after noise reduction through frequency modulation

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文采集风机出风口噪声进行算法仿真取得了良好的降噪效果, 但由于风机噪声声压级大、风速快, 在实际设备制作安装上会遇到困难, 如何设计平稳有效的大型风机降噪装置需要进一步研究。在调频算法上, 当频率失调较大或者外部因素如电压不稳定等使风机转速波动时, 遗传算法的种群增大使得算法的收敛速度变慢, 导致系统不能及时收敛, 需要进一步完善。

4.2 结论

本文提出的基于 NLMS 算法的风送式喷雾机窄带有源降噪算法, 分析了风送式喷雾机的出风口噪声, 比较了 3 种常用的降噪算法, 通过 Matlab 对降噪算法进行仿真分析, 分析结果表明:

1) 风送式喷雾机出风口噪声以扇叶旋转引起

的旋转噪声为主,且噪声频率主要分布在基频的整数倍上;

2) 通过 3 种自适应算法的仿真对比,综合比较算法收敛速度和降噪效果,变步长的 NLMS 算法和 VSSLMS 算法的降噪效果优于固定步长的 FxLMS 算法,而收敛速度低于 FxLMS 算法。在相同的降噪效果条件下, NLMS 算法收敛速度优于 VSSLMS 算法,选为本文的风机降噪算法;

3) 存在 1% 频率失调时,窄带有源降噪系统取得约 9 dB 的总体降噪效果;遗传算法较好地改善了频率失调带来的影响,提高了窄带有源降噪的系统性能,通过对风机出风口处的噪声进行仿真降噪处理,取得约 14 dB 的总体降噪效果。

参考文献:

- [1] 邱威,顾家冰,丁为民,等. 果园风送式喷雾机防治效果试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 94-99.
- [2] 唐俊,王军,隗智辉,等. 正弦锯齿尾缘对轴流风机尾迹及气动性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(10): 2145-2150.
- [3] 伍先俊,李志明. 风机叶片噪声机理及降噪[J]. 风机技术, 2001(4): 11-13.
- [4] 杨冰冰. 对旋轴流风机噪声分布及降噪措施研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [5] 夏国芳,刘剑. 一种应对窄带主动噪声控制中频率不匹配的方法[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(1): 26-31.
- [6] 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.
- [7] 李楠,安峰岩,杨飞然,等. 一种用于主动降噪耳机的权重滤波误差信号滤波-x 最小均方算法[J]. 应用声学, 2018, 37(3): 391-399.
- [8] 苏雨,卢剑伟,邵浩然. 基于反馈系统 FXLMS 的非线性主动降噪[J]. 新型工业化, 2018, 8(3): 40-46.
- [9] 王士浩,王生栋,查富生,等. 基于 FXLMS 算法的主动噪声控制降噪效果研究[J]. 机械与电子, 2015(12): 23-27.
- [10] 张文清,何清波,顾正华. 基于次级声源布局优化的主动降噪实验研究[J]. 机械与电子, 2017, 35(6): 3-7.
- [11] 晋永荣,陈晓丽. 日本新干线列车噪声声源分布及主动降噪实车试验研究综述[J]. 现代信息科技, 2019, 3(3): 168-169.
- [12] 冯天培,孙跃东,王岩松,等. 汽车车内制动噪声主动控制[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(1): 75-78.
- [13] 周鑫楚. 浅谈纯电动汽车驾驶室减振降噪技术[J]. 汽车与驾驶维修(维修版), 2018(1): 117.
- [14] 潘立志,梁亚坤,占敏,等. 基于 SYSNOISE 的轴流式风机管道噪声辐射仿真分析[J]. 机械与电子, 2009(9): 32-35.
- [15] 张欢. 管道噪声主动控制系统通道建模的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2019.
- [16] NEGRI E, ARDAKANI H D, CATTANEO L, et al. A digital twin-based scheduling framework including equipment health index and genetic algorithms[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(10): 43-48.
- [17] 毛梦菲. 窄带主动噪声控制系统实时仿真及硬件实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [18] 于梦娇. 管道低频噪声主动控制系统的 DSP 实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [19] 张志永,韩秀琴,李传光. 管道及局部空间有源降噪系统几种算法的比较及其 DSP 实现[C]//第二十届中国控制会议论文集. 大连: 大连理工大学出版社, 2001.
- [20] 王玉成. 遗传算法在汽车管道噪声有源控制中的应用研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2015.
- [21] 孙晓阳. 电力变压器噪声分析与有源降噪研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [22] 褚志刚,蔡鹏飞,蒋忠翰,等. 基于声阵列技术的柴油机噪声源识别[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 23-30.
- [23] 翟之平,张龙,刘长增,等. 秸秆抛送装置外壳振动辐射噪声数值模拟与试验验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 72-79.
- [24] 李民,陈烨龙,庞建武,等. 消隙齿轮降低柴油机怠速噪声的应用研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 63-69.
- [25] 董亮,代翠,孔繁余,等. 叶片出口安放角对离心泵透平噪声的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 69-75.
- [26] CHU Y J, MAK C M, ZHAO Y, et al. Performance analysis of a diffusion control method for ANC systems and the network design[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 475: 115273. doi: 10.1016/j.jsv.2020.115273.
- [27] AKHTAR M T. A time-varying normalized step-size based generalized fractional moment adaptive algorithm and its application to ANC of impulsive sources[J]. Applied Acoustics, 2019, 155: 240-249.
- [28] ROUT N K, DAS D P, PANDA G. PSO based adaptive narrowband ANC algorithm without the use of synchronization signal and secondary path estimate[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 114: 378-398.
- [29] ZHU W, LUO L, XIE A, et al. A novel FELMS-based narrowband active noise control system and its convergence analysis[J]. Applied Acoustics, 2019, 156: 229-245.
- [30] DINH C L, LI D, ZHANG J. M-max partial update leaky bilinear filter-error least mean square algorithm for non-linear active noise control[J]. Applied Acoustics, 2019, 156: 158-165.
- [31] ZHOU C, UTUZHNIKOV S. Real-time active noise control with preservation of desired sound[J]. Applied Acoustics, 2020, 157: 106971. doi: 10.1016/j.apacoust.2019.07.019.
- [32] 浦玉学,张方,姜金辉,等. 一种基于延迟系数技术的次级通道在线辨识新方法[J]. 振动与冲击, 2014, 33(23): 74-80.
- [33] 刘永,张晓,梁健,等. 一种新型非线性自适应滤波器[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2005(1): 57-59.
- [34] 邹海山,邱小军. 复杂声学环境中人耳附近空间有源降噪研究综述[J]. 物理学报, 2019, 68(5): 7-18.
- [35] 袁军,吕韦喜,刘东旭,等. 基于次级通道在线辨识新算法交叉更新 ANC 系统[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(3): 58-65.
- [36] 杨理,蒋芸霜,周旋,等. 变压器自适应主动降噪技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(3): 875-878.
- [37] 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.