

汽车车内噪声主动控制变步长 NFB-LMS 算法

张 帅, 王岩松, 张心光

(上海工程技术大学汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 为规避最小均方(Least Mean Square, LMS)算法不能同时提高收敛速度和降低稳态误差的固有缺陷, 以及已有变步长 LMS 算法存在收敛速度慢和稳态误差估计精度差的问题, 文中提出了一种基于变步长归一化频域块(Normalized Frequency-domain Block, NFB)LMS 算法的汽车车内噪声主动控制方法。为了比较, 应用传统的 LMS 算法、基于反正切函数的变步长 LMS 算法和变步长 NFB-LMS 算法分别进行实测汽车车内噪声的主动控制。结果表明, 与其他两个算法相比, 变步长 NFB-LMS 算法的收敛速度提高了 70%以上, 稳态误差减小了 90%以上。变步长 NFB-LMS 算法在处理车内噪声信号时具有很高的效率, 为进行汽车车内噪声主动控制提供了一种新方法。

关键词: 汽车内部噪声; 主动噪声控制; 变步长 NFB-LMS 算法; 算法收敛速度; 稳态误差

中图分类号: U467.4+93

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-06-0680-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.06.014

A variable step-size NFB-LMS algorithm for active vehicle interior noise control

ZHANG Shuai, WANG Yan-song, ZHANG Xin-guang

(Automotive Engineering College, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The LMS algorithm has an inherent shortcoming that the convergence speed can not be increased simultaneously with reducing the steady-state error. For the existing variable step-size LMS algorithm the convergence rate is low and the accuracy of estimating steady-state residual error is poor. To avoid such disadvantages, an active control method of vehicle interior noise based on variable step-size NFB-LMS algorithm is presented in this paper. The traditional LMS algorithm, the variable step-size LMS algorithm based on arctangent function and the variable step-size NFB-LMS algorithm are respectively applied to the active control experiments of the measured vehicle interior noise for comparison. The results show that the convergence speed of the variable step-size NFB-LMS algorithm is increased by 70% and the steady-state error is reduced by more than 90%, compared with the other two algorithms. Therefore, the variable step-size NFB-LMS algorithm has high efficiency in processing the vehicle interior noise signals, and provides a new method for active control of vehicle interior noise.

Key words: vehicle interior noise; active noise control; variable step-size NFB-LMS algorithm; convergence speed; steady-state error

0 引 言

随着汽车技术的发展和汽车行驶速度的提高, 汽车噪声、振动与声振粗糙度(Noise, Vibration, Harshness, NVH)问题越来越引起消费者的关注。车内噪声是汽车 NVH 的核心问题之一, 会直接影响车上乘员的乘坐舒适性和身心健康, 不利于汽车的行驶安全性^[1]。

汽车车内噪声的控制方法主要包括两种: 被动

噪声控制^[2-3]和主动噪声控制^[4-5]。被动噪声控制方法是利用声学材料或消声结构来抑制噪声, 对中高频噪声特别是高频噪声有较好的效果, 但对低频噪声抑制效果不佳。而主动噪声控制方法对低频噪声的抑制效果较显著, 并且具有系统体积小、便于安装和轻量化设计等优点, 近年来得到了国内外研究者的广泛关注^[6-7]。

在汽车车内噪声主动控制系统的设计过程中, 其核心在于噪声主动控制算法的改进和应用。其中最小均方算法(Least Mean Square, LMS)因其具有计算量小、计算简单和稳定性强, 且能自适应跟踪声环境的变化等优点, 目前在车内噪声主动控制系统中得到了广泛应用^[8-10]。由于传统 LMS 算法存在不能同时提高收敛速度和降低稳态误差的缺陷, 因此, 研究人员提出了一些变步长 LMS 算法^[11-13]。

收稿日期: 2018-06-09; 修回日期: 2018-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675324)、上海汽车工业科技发展基金(1523)

作者简介: 张帅(1989-), 男, 河南商丘人, 硕士, 研究方向为汽车 NVH 测控技术、车内噪声主动控制方法。

通讯作者: 王岩松, E-mail: jzwb@163.com

LMS 算法和已有变步长 LMS 算法对汽车车内噪声数据采用逐点处理的方式。由于车内噪声具有很明显的时变性，其参考信号功率会不断变化，此时为了保证噪声主动控制系统的稳定性，必须在一定程度上降低算法的收敛速度。而且在处理随汽车驾驶时间成正比例增长的车内噪声数据时，算法梯度向量估计不够准确，会导致算法稳态误差精度差^[4]。

针对 LMS 算法和变步长 LMS 算法的缺陷，文中提出了一种基于变步长归一化频域块 LMS(Normalized Frequency-domain Block LMS, NFB-LMS)算法的汽车车内噪声主动控制方法。与 LMS 算法和已有变步长 LMS 算法不同，变步长 NFB-LMS 算法对噪声数据进行逐块处理，其收敛速度不受输入信号功率的影响，梯度向量的估计精度也得到提高，克服了 LMS 算法和变步长 LMS 算法的缺陷。

1 变步长 LMS 算法

1.1 LMS 算法

汽车车内噪声主动控制 LMS 算法是一种线性自适应滤波器算法。其基本原理是沿期望数据与估计数据之间的均方误差曲面梯度的相反方向逐步迭代，使误差以最快速度下降，直到得到一个较为精确的初级噪声信号数据估计，并在均方误差曲面最低点附近做布朗运动，主要包含两个部分：

(1) 线性滤波包括：(a) 通过横向滤波器计算抵消期望信号的输出信号，(b) 计算输出信号与期望响应之间的误差；

(2) 滤波器系数自适应更新即根据计算的误差自适应更新线性滤波器系数值。

这两个过程一起工作构成一个前馈循环，如图 1 所示。

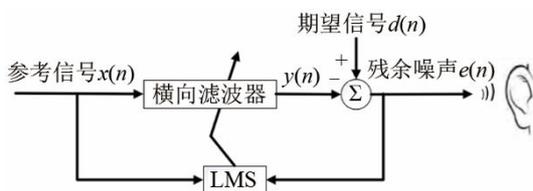


图 1 汽车车内噪声主动控制 LMS 算法框图
Fig.1 Block diagram of the LMS algorithm for active control of vehicle interior noise

基于最速下降法，汽车车内噪声主动控制 LMS 算法的计算过程为

(1) 滤波器输出 $y(n)$

$$y(n) = w(n) * x(n) \quad (1)$$

式中， $x(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)]$ 为参考信号向

量， $w(n) = [\omega_n(0) \ \omega_n(1) \ \dots \ \omega_n(L-1)]$ 为横向滤波器系数向量， L 表示信号的长度， $*$ 表示线性卷积运算。

(2) 残余误差信号 $e(n)$

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

(3) 滤波器系数向量自适应更新

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n) x(n) \quad (3)$$

式中， μ 为步长因子，表示滤波器系数沿梯度反方向下降一步的量值， μ 的选取将会影响整个算法的收敛速度和稳态误差。如果 μ 取一个较大值，算法收敛较快，但稳态误差精度较差；如果 μ 取一个较小值，稳态误差精度较高，但收敛速度就会变慢。

1.2 变步长函数

为优化固定步长 LMS 算法 μ 值选择的问题，文献[13]改进了步长 μ 值的调整原则，提出了一种变步长 LMS 算法。该算法通过使用修正的反正切函数建立了误差值与 μ 值之间的一种函数关系，使 μ 值大小随误差值变化而变化，如式(4)：

$$\mu(n) = \beta \cdot \arctan^\gamma[\alpha |e(n)e(n-1)|] \quad (4)$$

式中， α 、 β 、 γ 均为参数， \arctan 表示反正切函数。

由于反正切函数具有严格正相关单调性，式(4)中通过对误差取绝对值，使 μ 值的大小随误差值大小成正相关变化。当算法处于初始阶段或人耳周围声环境变化较大时，误差较大，反正切函数可使 μ 取得一个较大值以保证算法的快速收敛和更好地跟踪环境的变化；当人耳周围声环境趋于平稳，此时算法将收敛到稳定状态，误差值变小，反正切函数可使 μ 取得一个较小值，以保证算法得到一个较好的估计精度，同时稳态误差精度也会随着 μ 值的减小得到进一步改善，直到算法达到一个最优的收敛状态。

2 变步长 NFB-LMS 算法

在汽车的实际运行过程中，当车速提高时或在城市道路上，车内噪声随时间变化往往比较剧烈。这就要求车内噪声主动控制算法对车内声环境有更好的追踪能力和更优的控制性能。由于 LMS 算法以及变步长 LMS 算法对噪声信号逐点处理，计算效率比较低，且其收敛性能受输入信号功率的影响。本文通过快速傅里叶变换和重叠保留法^[15]提出一种应用于汽车车内噪声主动控制的变步长 NFB-LMS 算法，该算法通过归一化的方法克服了收敛速度受输入信号功率的影响的缺陷，并通过变步长的方法克服了收敛速度和稳态误差之间的矛盾。变步长 NFB-LMS 算法的系统框图如图 2 所

示。其中大写字母均表示复数据向量，小写黑体字母均表示时域数据块。

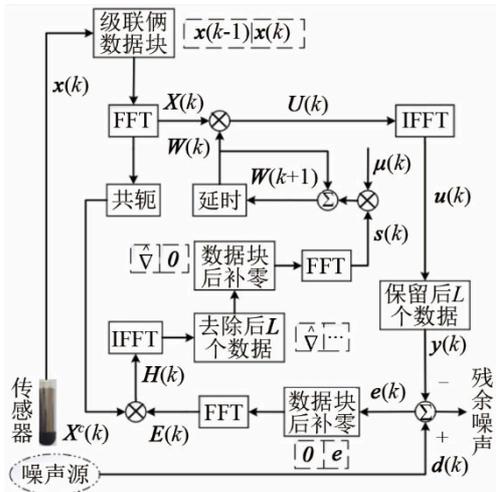


图2 变步长 NFB-LMS 算法框图

Fig.2 Block diagram of variable step-size NFB-LMS algorithm

2.1 计算过程

与 LMS 算法不同的是，对应式(1)中的线性卷积计算，变步长 NFB-LMS 算法在频域中实现，且对应式(2)、(3)中的计算，变步长 NFB-LMS 算法均以数据块的方式进行，大大提高了算法的计算效率，下面给出其详细的计算过程。

首先对采集数据按长度 L 进行分块，并分别定义第 k 块时域的参考信号数据块为 $\mathbf{x}(k)$ 、期望信号数据块为 $\mathbf{d}(k)$ 、输出信号数据块为 $\mathbf{y}(k)$ 、残余噪声信号数据块为 $\mathbf{e}(k)$ 、权系数向量为 $\mathbf{W}(k)$ ，其表达式分别为

$$\mathbf{x}(k)=[x(kL) \ x(kL+1) \ \cdots \ x(kL+L-1)] \quad (5)$$

$$\mathbf{d}(k)=[d(kL) \ d(kL+1) \ \cdots \ d(kL+L-1)] \quad (6)$$

$$\mathbf{y}(k)=[y(kL) \ y(kL+1) \ \cdots \ y(kL+L-1)] \quad (7)$$

$$\mathbf{e}(k)=[e(kL) \ e(kL+1) \ \cdots \ e(kL+L-1)] \quad (8)$$

$$\mathbf{W}(k)=[W_0(k) \ W_1(k) \ \cdots \ W_{2L-1}(k)] \quad (9)$$

对于式(1)的滤波器输出的计算过程为

$$\mathbf{X}(k)=\text{FFT}[\mathbf{x}(k-1), \mathbf{x}(k)] \quad (10)$$

$$\mathbf{U}(k)=\mathbf{X}(k) \otimes \mathbf{W}(k) \quad (11)$$

$$\mathbf{y}(k)=\text{IFFT}[\mathbf{U}(k)] \text{后} L \text{个数据} \quad (12)$$

其中，FFT 表示快速傅里叶变换，IFFT 表示快速傅里叶逆变换， \otimes 表示对两个数据向量进行对应位置元素点点相乘并形成一个新的向量。根据重叠保留法，在计算时要重叠 50% 的数据量，故式(10)计算之前预储存长度为 $2L$ 的数据块，对应式(9)中滤波器系数长度也为 $2L$ ，式(12)中只保留后 L 个数据，这是因为只有后一个数据块是有效数据。

对于式(2)的运算，以数据块的方式进行：

$$\mathbf{e}(k)=\mathbf{d}(k)-\mathbf{y}(k) \quad (13)$$

对于式(3)的滤波器系数向量自适应调整计算，这里有以下过程：

$$\mathbf{E}(k)=\text{FFT}[\mathbf{0}_L, \mathbf{e}(k)] \quad (14)$$

$$\mathbf{H}(k)=\mathbf{X}^c(k) \otimes \mathbf{E}(k) \quad (15)$$

$$\mathbf{f}(k)=\text{IFFT}[\mathbf{H}(k)] \text{的前} L \text{个数据} \quad (16)$$

$$\mathbf{s}(k)=[\mathbf{f}(k), \mathbf{0}_L] \quad (17)$$

$$\mathbf{W}(k+1)=\mathbf{W}(k)+\boldsymbol{\mu}(k) \otimes \text{FFT}[\mathbf{s}(k)] \quad (18)$$

其中， $\mathbf{0}_L$ 表示一个长度为 L 的 0 向量， $\mathbf{X}^c(k)$ 是 $\mathbf{X}(k)$ 取共轭运算后的数据块。 $\boldsymbol{\mu}(k)$ 是归一化变步长函数。

基于反正切函数变步长 LMS 算法^[13]，首先通过归一化的方法使算法的收敛速度不受输入信号功率的影响^[16]，并采用变步长的方法来克服算法无法同时兼顾收敛速度和稳态误差的缺陷，如式(19)：

$$\boldsymbol{\mu}(k)=\frac{\alpha+\beta \arctan[|\boldsymbol{\theta}(k)|+1]}{\gamma+(1-\gamma) \mathbf{X}(k) \otimes \mathbf{X}(k)} \quad (19)$$

其中， α 、 β 、 γ 均为正常数， γ 是输入信号功率 $\mathbf{X}(k) \otimes \mathbf{X}(k)$ 的补偿因子，以防止 $\mathbf{X}(k) \otimes \mathbf{X}(k)$ 的值太小而导致 $\boldsymbol{\mu}(k)$ 过大， α 是 \arctan 函数的补偿因子。

2.2 计算量对比

现将 LMS 算法与 NFB-LMS 算法的计算复杂度进行比较，以实现数据长度为 L 时两种算法各自涉及的总乘法次数为依据进行比较^[17]。虽然在实际实现中存在其他要考虑的因素(例如加法次数和存储要求等)，但使用乘法次数来比较两个算法的计算复杂度可以提供一合理准确的基础。

首先考虑具有 L 个实数据权系数的 LMS 算法。这种情况下，每计算一个输出需要 L 次乘法，而更新一次滤波器权系数还需要 L 次乘法，故每次总共需要 $2L$ 次乘法。因此，对于 L 个输出样值，所需要的乘法次数总共为 $2L^2$ 次。

对于 NFB-LMS 算法。每次 D 点 FFT 需要约 $D \log_2 D$ 次实数乘法运算。根据图 2 所示频域块 LMS 的结构，要执行 5 次 FFT 计算，共计 $5D \log_2 D$ 次乘法，当需计算长度为 L 的数据时， $D=2L$ ，即为 $10L+10L \log_2 L$ 次乘法。此外，计算频域输出向量 $\mathbf{U}(k)$ ，需要 $8L$ 次乘法，更新一次抽头权系数还需要 $8L$ 次乘法。因此，所需要的乘法次数总共为 $10L \log_2 L+26L$ 次。

定义 F 为 NFB-LMS 算法与 LMS 算法的计算复杂度比值，经过化简可得到

$$F=\frac{5 \log_2 L+13}{L} \quad (20)$$

对于不同的长度 L ，其值如表 1 所示。

表 1 数据长度为 L 时 NFB-LMS 算法与 LMS 算法的计算量比值 F

Table 1 The calculation amount ratio F between NFB-LMS algorithm and LMS algorithm for the data length of L

长度 L	比值 F	长度 L	比值 F
32	1.1875	128	0.3750
64	0.6719	256	0.2070

从表 1 中可以看出，当 L 长度大于 64 时，NFB-LMS 算法计算量相对于 LMS 算法会大量降低，且 NFB-LMS 算法对采集数据以一次处理一个数据块的方式进行，很大程度上提高了 LMS 算法的计算效率。

3 汽车车内噪声采集、分析与处理

3.1 采集和分析

本节对在平顺公路上正常行驶状态下的汽车车内噪声信号进行了采集实验。本次数据采集依据国家标准 GB/T 18697—2002(声学—汽车车内噪声测量方法)^[18]进行。试验车辆为国产某品牌家用轿车，数据采集时车窗处于关闭状态，应用的噪声采集设备为 SIEMENS 生产的 LMS SCADAS Mobile，采集现场如图 3 所示。噪声采集过程中，信号通过采集麦克风获得模拟信号，并通过数据传输线传输到采集设备，之后采集设备将模拟信号转换到数字信号，并在笔记本电脑上储存和显示。采集环境为平顺公路上，采集数据为汽车以匀速 $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 直线行驶时驾驶员左右耳处的噪声信号，此时的车内噪声包含有发动机及传动机构噪声、车胎噪声、路噪、风噪以及周围环境噪声等，是一种汽车正常行驶状态下的综合噪声。

本次实验采集时间为 15 s。为确保采集数据包含原噪声中的全部信息，进行数据采集时选择了一个较大的采样率 $51\,200 \text{ Hz}$ ，并对采集的车内噪声进行时频分析，分析结果如图 4 所示。

从图 4(a)的噪声信号波形可以看出，汽车车内噪声信号随着时间剧烈变化，且无规律可循，是一种非稳定信号。从图 4(b)的时频分析图可以看出，车内噪声信号能量分布在 $1\,500 \text{ Hz}$ 以下的频率范围，其主要能量分布于 500 Hz 以下频率范围内。由于初始采样率已经远大于噪声信号的频率分布，根据采样定理，说明本次采集数据已包含了原噪声信号里几乎所有的信息，是一种高保真数据。

3.2 重采样

在实际应用中，过大的采样率会大量增加主动控制系统中数字信号处理器(Digital Signal Processor,

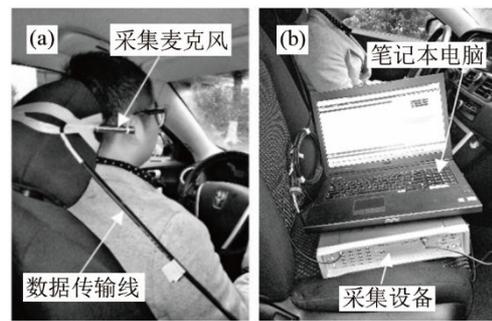
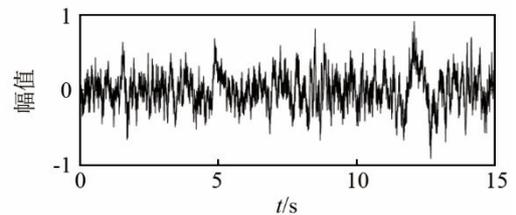
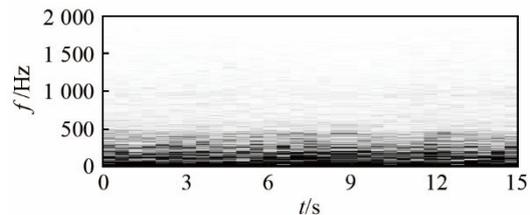


图 3 车内噪声采集现场图
Fig.3 The scene of vehicle interior noise acquisition



(a) 采集信号波形



(b) 时频分析图

图 4 采集噪声信号波形及其时频分析图
Fig.4 The measured noise signal waveform and its time-frequency analysis diagram

DSP)芯片的工作负荷，影响整个系统的工作稳定性和数据处理的实时性。因此在满足汽车车内噪声主动控制条件的前提下，应采用相对较小的采样率。这里对所采集数据进行了重采样，根据采样定理，采样率应大于所关心数据最大频率值的两倍以上，本次重采样率设置为 $4\,096 \text{ Hz}$ ，其结果如图 5 所示。

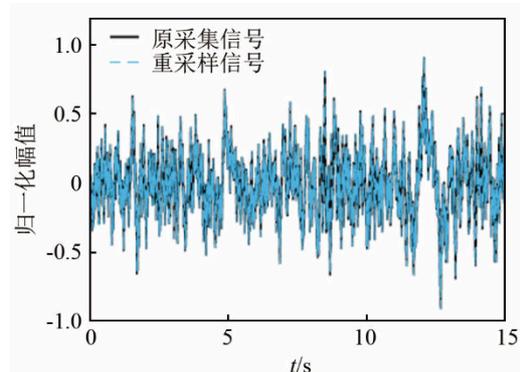


图 5 原采集信号与重采样信号波形对比图
Fig.5 Waveform comparison between original acquisition signal and resampled signal

从图 5 中可以看出，重采样噪声信号波形完全

覆盖了原采集噪声信号波形,说明重采样数据完全保留了原采集噪声信号的信息,是有效的。而此时需处理的数据量只占原数据量的 8%,很大程度上减少了 DSP 芯片的工作量。

4 算法验证

以驾驶员右耳处噪声作为输入信号,左耳处噪声作为参考信号,应用 LMS 算法和基于反正切函数变步长 LMS 算法以及变步长 NFB-LMS 算法分别对所采集的汽车车内噪声进行主动控制。其中 LMS 算法的 μ 值为 0.06,式(4)和式(19)中的参数设置如表 2 所示。

表 2 三种不同算法的参数值设置
Table 2 Parameter value setting for three different algorithms

参数	α	β	γ
变步长 LMS 算法	500.0	0.03	2.00
变步长 NFB-LMS 算法	0.6	0.80	0.94

为了验证变步长 NFB-LMS 算法的效果,将基于 LMS 算法、基于反正切函数变步长 LMS 算法及变步长 NFB-LMS 算法的汽车车内噪声主动控制结果进行比较,如图 6 所示。

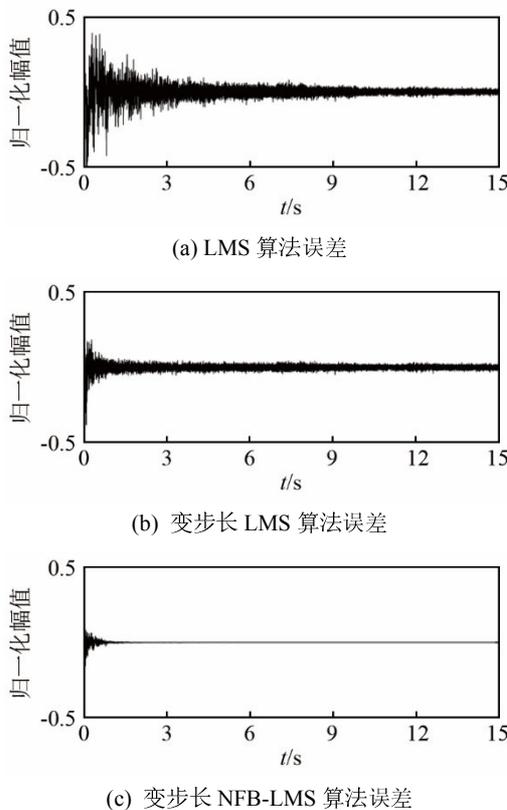


图 6 3 种不同算法的稳态误差对比图
Fig.6 The comparison of steady-state error between three different algorithms

从图 6 中可以看出,变步长 LMS 算法的残余误差略微小于 LMS 算法,而变步长 NFB-LMS 算法的残余误差却又明显小于变步长 LMS 算法。通过计算 3 种算法的残余误差在趋于稳定后的时间段 3~15 s 之间的绝对值均值,如表 3 所示。

表 3 三种不同算法的残余误差均值对比
Table 3 The comparison of mean residual error between three different algorithms

算法	残余误差均值
LMS	1.23×10^{-2}
变步长 LMS	7.80×10^{-3}
变步长 NFB-LMS	5.78×10^{-5}

从表 3 数值大小对比得出,本文所提变步长 NFB-LMS 算法的残余误差均值是变步长 LMS 算法的误差均值的 0.74%,而仅是 LMS 算法误差均值的 0.47%。

图 7 中以均方误差为标准对比了 3 种算法的收敛速度。从图 7 中可以看出,LMS 算法的均方误差曲线波动很大,表现出较差的收敛性能,变步长 LMS 算法则收敛性能相对于 LMS 算法较好,在迭代 500 次左右时收敛到稳定状态,而本文所提变步长 NFB-LMS 在迭代 280 次左右时就已收敛到稳定状态,变步长 NFB-LMS 算法相对于变步长 LMS 算法,其收敛速度又提高了 78%左右。

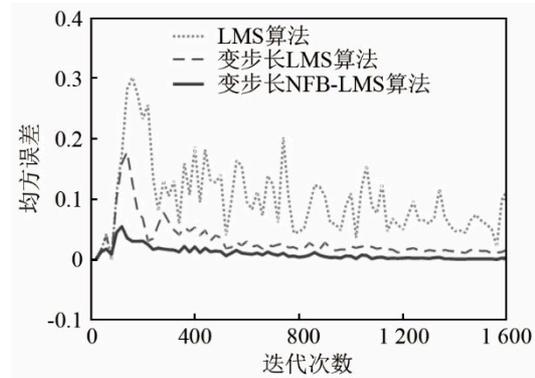


图 7 3 种不同算法的收敛速度对比图
Fig.7 The comparison of convergence speed between three different algorithms

5 结束语

随着汽车工作时间的增加,在汽车车内噪声主动控制中将产生大量的数据,且当车速提升或汽车处于嘈杂的环境中时,车内噪声时变比较剧烈,这就要求汽车车内噪声主动控制算法表现出更加优异的性能。本文提出了一种变步长 NFB-LMS 算法,解决了现有 LMS 算法以及变步长 LMS 算法的缺

陷, 且具有较低的计算量。通过算法验证的结果表明, 所提算法不仅收敛速度得到很大程度的提高, 且其残余误差也远远小于 LMS 算法和变步长 LMS 算法, 是一种汽车车内噪声主动控制的高效算法。

参 考 文 献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述: 2017 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 1-197.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's automotive engineering research progress: 2017[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(6): 1-197.
- [2] 邢鹏, 卢焱华, 华林, 等. 黏弹性约束阻尼结构对车内噪声控制的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 763-770.
XING Peng, LU Chihua, HUA Lin, et al. Application of viscoelastic constrained damping structure to interior noise control of a car[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(3): 763-770.
- [3] HAFIDI A E, MARTIN B, LOREDO A, et al. Vibration reduction on city buses: determination of optimal position of engine mounts[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(7): 2198-2209.
- [4] 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.
FENG Tianpei, SUN Yuedong, WANG Yansong, et al. Active noise control of automotive interior braking noise[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(1): 75-78.
- [5] de OLIVEIRA L P R, JANSSENS K, GAJDATSY P, et al. Active sound quality control of engine induced cavity noise[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(2): 476-488.
- [6] 高宾, 张心光, 王岩松, 等. 汽车车内噪声主动控制迭代变步长 LMS 算法[J]. 电子科技, 2017, 30(8): 9-12.
GAO Bin, ZHANG Xinguang, WANG Yansong, et al. Active noise control for vehicle interior noise using iteration variable step-size LMS algorithm[J]. Electronic Sci. & Tech., 2017, 30(8): 9-12.
- [7] CHEER J, ELLIOTT S J. Multichannel control systems for the attenuation of interior road noise in vehicles[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 60-61: 753-769.
- [8] L.P.R. de Oliveira, B. Stallaert, K. Janssens, et al, NEX-LMS: a novel adaptive control scheme for harmonic sound quality control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(6): 1727-1738.
- [9] 刘宗巍, 王登峰, 姜吉光, 等. 用主动噪声控制法改善车内声品质[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(2): 258-262.
LIU Zongwei, WANG Dengfeng, JIANG Jiguang, et al. Improving sound quality inside vehicle by active noise control method[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(2): 258-262.
- [10] WANG Y S, FENG T P, WANG X L, et al. An improved LMS algorithm for active sound-quality control of vehicle interior noise based on auditory masking effect[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 108: 292-303.
- [11] MAYYAS K. A variable step-size selective partial update LMS algorithm[J]. Digital Signal Process, 2018, 109: 15-26.
- [12] GUO H, WANG Y S, LIU N N, et al. Active interior noise control for rail vehicle using a variable step-size median-LMS algorithm[J]. Mech. Syst. Signal Process, 2018, 9(109): 15-26.
- [13] 管四海, 李智. 基于修正反正切函数的变步长 LMS 算法[J]. 中国科技论文, 2016, 11(14): 1655-1660.
GUAN Sihai, LI Zhi. Variable step-size LMS algorithm based on modified arctangent function[J]. China Sciencepaper, 2016, 11(14): 1655-1660.
- [14] PARRA I E, HERNANDEZ W, FERNANDEZ E. On the convergence of LMS filters under periodic signals[J]. Digital Signal Processing, 2013, 3(23): 808-816.
- [15] HAYKIN S. Adaptive filter theory, fourth edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [16] CHENG S S, WEI Y H, CHEN Y Q, et al. A novel fractional order normalized LMS algorithm with direction optimization[J]. IFAC Papers OnLine, 2016, 9(49): 180-185.
- [17] 张穴. 三维空间噪声主动控制方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
ZHANG Xue. Research on three-dimensional space active noise control approach[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18697—2002 声学—汽车车内噪声测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.