基于 FxLMS 的汽车车内噪声变步长主动均衡算法

张 帅，王岩松，郭 辉，王孝兰，刘宁宁
(上海工程技术大学汽车工程学院，上海 201620)

摘要：提出了一种可用于汽车车内噪声主动均衡控制的变步长主动噪声均衡(Active Noise Equalization, ANE)算法，与传统车内噪声主动抵消控制方法所采用的滤波 x 最小均方(Filtered-x Least Mean Square, FxLMS)算法相比具有更好的实用性。应用固定步长主动噪声均衡(Active Noise Equalization, ANE)算法、所提出变步长 ANE 算法和已有变步长 ANE 算法分别进行汽车车内噪声主动均衡控制。结果表明，所提出变步长 ANE 算法具有更快的收敛速度和较低的稳态误差，并且能进一步降低汽车车内噪声响度，为汽车车内声品质主动控制提供了一种新方法。

关键词：车内噪声；响度；变步长；滤波 x 最小均方算法；主动噪声均衡算法
中图分类号：U467.4+93 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2019)-05-0574-06
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.05.015

A FxLMS based variable step-size active equalization algorithm for vehicles interior noise

ZHANG Shuai, WANG Yan-song, GUO Hui, WANG Xiao-lan, LIU Ning-ning
(*Automotive Engineering College*, *Shanghai University of Engineering Science*, *Shanghai* 201620, *China*)

Abstract: A new active equalization method for vehicle interior noise based on variable step-size ANE algorithm is presented in this paper, which has better practicality compared with the traditional active interior noise cancellation control method based on Filtered-x Least Mean Square (FxLMS) algorithm. The fixed-step Active Noise Equalization (ANE) algorithm, the proposed variable step-size ANE algorithm and the existing variable step-size ANE algorithm have been respectively applied to active interior noise equalization control for comparison. The results show that the proposed variable step-size ANE algorithm has faster algorithm convergence speed, less steady-state error and gives a lower loudness level, which provides a new method for active sound quality control of vehicle interior noise.

Key words: vehicle interior noise; loudness; variable step-size; Filtered-x Least Mean Square (FxLMS) algorithm; Active Noise Equalization (ANE) algorithm

0 引 言

近年来，噪声主动控制方法已经成为汽车车内噪声控制研究的一个热点[1-3]。该方法主要是通过以声消声的方式，人为地附加若干个次级声源并发出与初级噪声反相的声波，从而降低初级噪声的噪声水平。

在车内噪声主动控制方法中，噪声主动控制策略和算法的研究是关键。主动控制策略主要包括两种：主动噪声抵消控制和主动噪声均衡控制。主动噪声抵消控制方法往往是以尽可能的抵消车内初级噪声幅值为目的[4]，以车内噪声的声压级控制量为考核标准，在车内噪声主动控制方法早期的研究中应用广泛。如 OLIVEIRA[5]和 LI 等[6]分别采用滤波 x 最小均方(Filtered-x Least Mean Square, FxLMS)算法对车内发动机噪声进行了抵消控制，并取得了较好的降噪效果。但主动噪声抵消控制方法未考虑到乘员的主观感受，车内初级噪声经过抵消控制后，残余噪声的波形变成细窄的条状，已失去了初级噪声的声波特征[7]，此时乘员将无法根据车内声音来判断汽车行驶工况，不利于安全驾驶。而近来新兴的主动噪声均衡方法在降低车内初级噪声声压级的基础上保留一定的初级噪声幅值[8]，使残余噪声依然保持着初级噪声的声波特征，具有更好的实用性。此方法往往以控制车内声品质或提高车内声环境听觉舒适性为目的，以车内声品质参数控制

收稿日期：2018-04-25; **修回日期：**2018-06-25
基金项目：国家自然科学基金项目(51675324)、上汽基金项目(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: jzwbt@163.com

量为考核标准，这些参数包括响度、尖锐度、粗糙度、波动度等[9]，其中响度对车内声品质的贡献量在 60%以上而被重视[10]，许多国内外研究人员也都致力于降低车内噪声响度的主动控制方法研究[11-12]。

主动噪声均衡(Active Noise Equalization, ANE)算法通常在主动噪声抵消控制相关算法(如 FxLMS 算法)基础上进行改进而来[13]。但传统固定步长 ANE 算法存在着一个固有矛盾，即无法同时提高收敛速度和降低稳态误差：如果步长因子 μ 取一个较大值，则算法收敛较快，而稳态误差精度就会变差；如果取一个较小值，则算法稳态误差精度较好，而算法收敛速度就会变慢。采用变步长的方法可以有效的解决这一问题，即通过变步长函数 $\mu(n)$ 代替固定步长因子 μ，如文献[14]提出的一种车内噪声主动变步长最小均方(Least Mean Square, LMS)算法，并经过仿真实验验证了该算法在收敛速度得到提高的基础上依然保持着较低的稳态误差。但 LMS 算法未考虑到有源控制系统的次级路径对系统稳定性的影响，相应地，基于 FxLMS 的算法具有更好的实用性。

本文在文献[14]所提出变步长函数基础上进一步改进，提出一种新的变步长函数，并基于 FxLMS 算法提出一种变步长 ANE 算法。采集了正常行驶状态下汽车的车内噪声信号，应用所提出的变步长 ANE 算法对其进行主动均衡控制，结果表明，所提出的变步长 ANE 算法具有优异的性能。

1　FxLMS 算法

FxLMS 算法因其计算简单、稳定性强且对环境有自适应跟踪的能力，在车内噪声抵消控制方法研究中广泛应用，FxLMS 算法框图如图 1 所示。图 1 中 $x(n)$ 是传感器在噪声源处拾取的噪声参考信号，$P(z)$ 表示 $x(n)$ 传播到乘员耳侧的传递路径，$d(n)$ 是期望信号，$W(z)$ 是进行滤波的控制器，用于输出抵消噪声信号 $u(n)$。$S(z)$ 表示 $u(n)$ 传播到乘员耳侧的次级传递路径，$\hat{S}(z)$ 是 $S(z)$ 的估计，理论上两者是相等的。$x_f(n)$ 是控制器的输入信号，$y(n)$ 表示抵消噪声波，用于抵消 $d(n)$ 同时产生误差信号 $e(n)$。

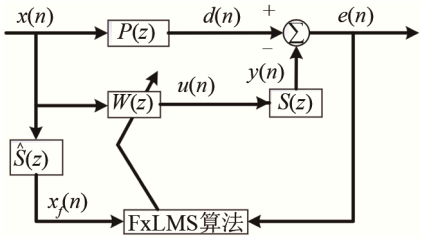


图 1　FxLMS 算法框图

Fig.1　Diagram of FxLMS algorithm

FxLMS 算法以 $e(n)$ 的最小均方为准则，依据最速下降法的原理进行迭代，其计算过程如下：

(1) 控制器 $u(n)$ 的输出信号为

$$u(n)=\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(n)\boldsymbol{x}(n) \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{w}(n)=[w(1), w(2), \cdots, w(L)]$ 是滤波器的系数向量，$\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(n)$ 表示 $\boldsymbol{w}(n)$ 的转置，L 是其长度，$\boldsymbol{x}(n)=[x(L), x(L-1), \cdots, x(1)]$ 是对应的参考信号。

(2) $u(n)$ 传播到乘员耳侧处时，有：

$$y(n)=s(n)*u(n) \tag{2}$$

式中，*表示线性卷积运算，$s(n)$ 是 $S(z)$ 的脉冲响应。

(3) 残余的误差噪声 $e(n)$ 可表示为

$$e(n)=d(n)-y(n) \tag{3}$$

(4) 计算滤波信号 $x_f(n)$

$$x_f(n)=\hat{s}(n)*x(n) \tag{4}$$

式中，$\hat{s}(n)$ 是 $\hat{S}(z)$ 的脉冲响应。

(5) 最后自适应更新滤波器 $W(z)$ 的系数：

$$\boldsymbol{w}(n+1)=\boldsymbol{w}(n)-\mu e(n)\boldsymbol{x}_f(n) \tag{5}$$

式中，μ 为步长因子，它的收敛范围为[15]

$$0<\mu<\frac{1}{\lambda_{\max}} \tag{6}$$

式中，$\lambda_{\max}$ 是滤波输入信号向量 $\boldsymbol{x}_f(n)$ 自相关矩阵的最大特征值。

2　ANE 算法

ANE 算法的框图如图 2 所示。

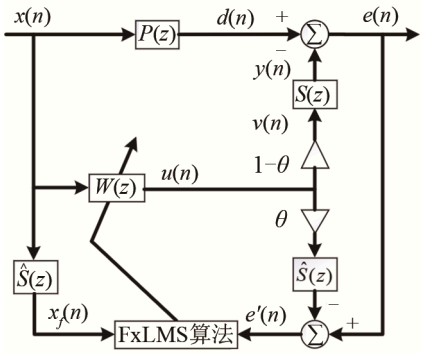


图 2　ANE 算法框图

Fig.2　Diagram of ANE algorithm

与 FxLMS 算法不同的是，ANE 算法在 $u(n)$ 输出前进行一定量的控制：

$$v(n)=(1-\theta)\cdot u(n) \tag{7}$$

式中，θ 为声音保留因子。此时传到人耳的次级声波可表示为

$$y(n)=s(n)*v(n) \tag{8}$$

假设 FxLMS 算法收敛后，初级噪声刚好被完全抵消，即：

$$d(n)\text{-}s(n)*u(n)=0\Rightarrow$$
$$d(n)=s(n)*u(n) \tag{9}$$

则此时的残余噪声为

$$e(n)=d(n)-v(n)=$$
$$d(n)-(1-\theta)\cdot s(n)*u(n)=\theta\cdot d(n) \tag{10}$$

初级噪声得到一定量的保留。

此时滤波器系数 $W(z)$ 自适应更新迭代的公式变为

$$\boldsymbol{w}(n+1)=\boldsymbol{w}(n)-\mu e'(n)\boldsymbol{x}_f(n) \tag{11}$$

式中，$e'(n)$ 是虚拟误差信号，即：

$$e'(n)=e(n)-\theta\cdot\hat{s}(n)*u(n) \tag{12}$$

3 变步长 ANE 算法

3.1 变步长函数

由于固定步长算法存在着不能同时兼顾收敛速度和稳态误差的缺陷，文献[14]优化了 μ 值的调整原则，提出的一种用于车内噪声主动控制的变步长 LMS 算法，在算法处于初始阶段或人耳周围声环境变化较大时，使 μ 取得一个较大值以提高算法的收敛速度和更好地跟踪环境的变化；随着算法趋于收敛，残余误差将逐渐变小，使 μ 值也跟着变小，以提高算法的估计精度，同时 μ 值的减小也会使残余误差噪声进一步降低，直到算法达到一个最优的收敛状态。

文献[14]提出的变步长函数为

$$\mu(n)=\beta[\sin(\alpha|e(n)|-\pi/2)+1] \tag{13}$$

式中，α、β 均为为常数参数。

对式(13)进行化简可得：

$$\mu(n)=\beta[1-\cos(\alpha|e(n)|]=$$
$$2\beta\sin^2\left(\frac{\alpha|e(n)|}{2}\right) \tag{14}$$

观察式(14)可知，参变量为 2β、$\alpha/2$，可分别用简化形式的 β、α 表示，并且本文认为正弦函数的指数对算法的收敛性能有很大的影响，因此本文所提出的变步长函数为

$$\mu(n)=\beta\sin^{\gamma}(\alpha|e(n)|) \tag{15}$$

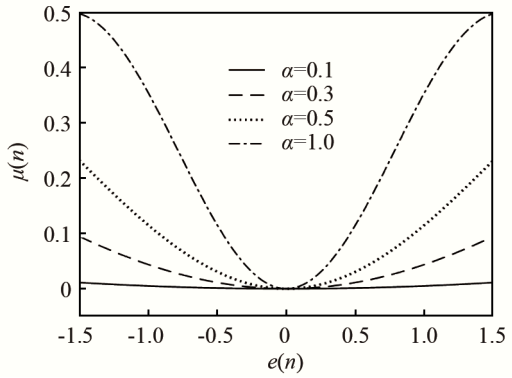
将式(15)应用到 ANE 算法中，最后式(11)对滤波器进行自适应更新时采用新的迭代公式：

$$\boldsymbol{w}(n+1)=\boldsymbol{w}(n)-\mu(n)e'(n)\boldsymbol{x}_f(n) \tag{16}$$

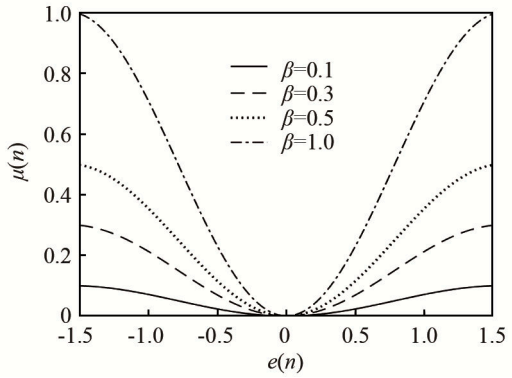
3.2 参数分析

式(15)中共有三个参数 (α,β,γ)，因此有必要对不同参数对算法收敛性能的影响进行定性分析。分析过程中，通过调整不同参数值，得出 $\mu(n)$ 值与 $e(n)$ 值一系列的函数曲线，结果如图 3 所示，其中 $\mu(n)$ 值的大小一定程度上反应了算法的收敛速度，在一定范围内的曲线波谷的宽度反映了算法的稳定性。

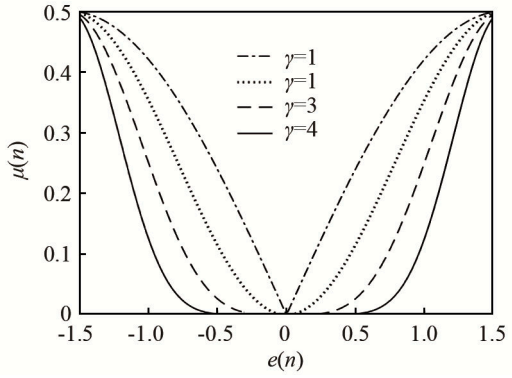
图 3(a)给出不同 α 值对 $\mu(n)$ 值的影响。α 主要用于修正 $e(n)$ 的初值，从图 3(a)中可以看出，在一定范围内，适当增大 α 值可以提高算法的收敛速度，但曲线波谷宽度变窄，即算法的稳态误差精度降低；如果减小 α 值，则刚好与其相反，但如果 α 过小，将会造成 $\mu(n)$ 函数一直处于很小的状态，不



(a) β=0.5, γ=2



(b) α =1, γ=2



(c) α =1, β=0.5

图 3 $\mu(n)$与 $e(n)$的函数曲线

Fig.3 Function curves between $\mu(n)$ and $e(n)$

利于算法的收敛。

从图 3(b)中可以看出，不同 β 值对 $\mu(n)$ 大小和波谷宽度也都存在很大影响。β 是函数方程的最外围系数，主要用于界定 $\mu(n)$ 值的范围，即参数的 β 值应确保 $\mu(n)$ 一直处于算法的收敛范围之内。

从图 3(c)中可以看出，γ 值对 $\mu(n)$ 值大小和曲线的波谷宽度都有很大影响。γ 较小时，$\mu(n)$ 曲线呈 V 字形，此时 $\mu(n)$ 值较大，但曲线波谷比较狭窄；γ 较大时，$\mu(n)$ 值有降低趋势，但波谷宽度变宽，表示 $\mu(n)$ 函数能够维持较高精度的稳态误差的能力得到提高，但 γ 的取值不应过大，否则会造成该部分计算量成指数级增长，不利于算法的稳定性。

从以上的分析中可以看出，这 3 个参数值的大小对算法的收敛性能都有很大影响，这也初步验证了改进函数的合理性。但由于目前变步长函数的最佳取值仍无法通过理论计算给出，在实际应用中，可以根据实际状况参考以上的分析对参数进行调试，进而达到较好的收敛状态。

4　仿真实验

为进一步验证所提出算法的有效性，依据声学—汽车车内噪声测量方法(国家标准 GB/T 18697_2002)[16]，本节对汽车车内噪声信号进行了采集。选取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。采集设备为西门子公司生产的 LMS.test.Lab 噪声与振动信号采集设备。采集数据为汽车以匀速 60 km·h^{-1} 直线行驶时驾驶员右耳处的噪声信号，此时的车内噪声包含有发动机以及传动机构噪声、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，结果如图 4 所示，其中纵轴幅值进行了归一化。

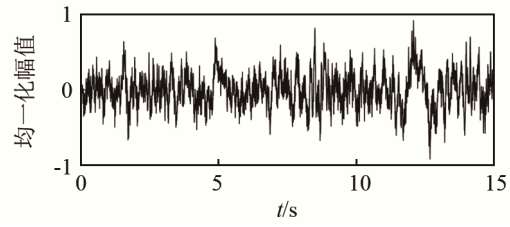


图 4　车内噪声信号
Fig.4　Measured vehicle interior noise signal

将所提出的变步长函数分别应用到 FxLMS 算法和 ANE 算法上，并应用变步长 FxLMS 算法、变步长 ANE 算法和固定步长 ANE 算法对所采集车内噪声进行主动控制仿真实验。所用实验车的初级传递路径以及次级传递路径分别为[0.01 –0.05 –0.05 0.75 0.5 0.5 –0.4 0.2 –0.03 –0.01]和[0.01 0.1 0.9 –0.75 –0.1]。

在进行仿真实验之前，采用离线方法对次级路径进行拟合以消除次级路径的影响。为了保证拟合的精度，$\hat{S}(z)$ 的长度设置应大于 $S(z)$ 的长度，因此 $\hat{S}(z)$ 的长度设置为 8，其拟合结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出，$\hat{S}(z)$ 的前 5 个数据已覆盖了 $S(z)$ 的数值，且后 3 个数据为 0，这说明 $\hat{S}(z)$ 已经达到了较为理想的拟合状态，可以很好地应用到各个算法中。

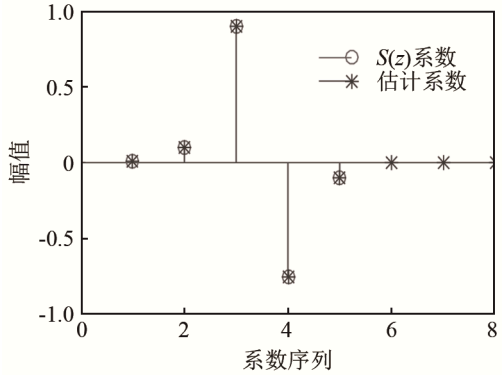


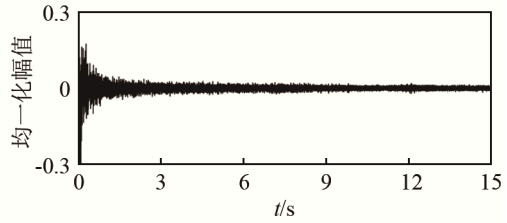
图 5　次级路径的拟合
Fig.5　Secondary path fitting

4.1　控制策略结果对比

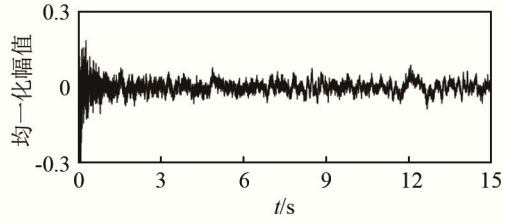
对式(15)中参数进行调试，使变步长 FxLMS 算法以及变步长 ANE 算法达到最优的收敛状态，得出各个参数值为：α=4，β=0.3，γ=0.5。

分别应用变步长 FxLMS 算法和变步长 ANE 算法对采集噪声进行主动控制的结果如图 6 所示，其中变步长 ANE 算法的声音保留因子 θ=0.1。

从图 6 中可以清晰地看出，车内噪声经过变步长 FxLMS 算法主动控制后，残余噪声波形成细窄



(a) 变步长 FxLMS 算法残余噪声



(b) 变步长 ANE 算法残余噪声

图 6　变步长 FxLMS 和变步长 ANE 算法主动控制结果对比
Fig.6　Comparison of active control results between variable step-size FxLMS and variable step-size ANE algorithm

的条状，已经失去初级噪声的声波特征。而经过变步长 ANE 算法主动控制后，其残余噪声依然保持着初级噪声的声波特征。经过噪声回放发现，变步长 ANE 算法的残余噪声依然保持着初级噪声的时变性，而变步长 FxLMS 算法的残余噪声却已失去了初级噪声的时变性，无法根据该残余噪声判断汽车的运行状态。

4.2 收敛性对比

分别使用固定步长 ANE 算法和依据文献[14]所提出变步长函数的变步长 ANE 对所采集车内噪声主动均衡，声音保留因子 θ 设置为 0.1。经过调试得出，固定步长 ANE 算法的 μ 值为 0.08，公式(13)中各参数值为：α=15，β=0.6。

采用固定步长 ANE 算法和变步长 ANE 算法得到的结果如图 7、8 所示。

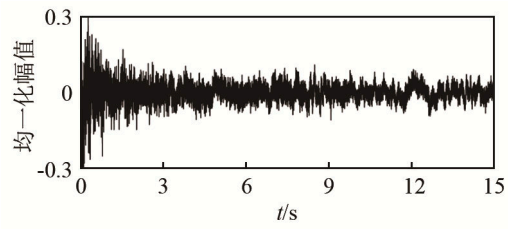


图 7 固定步长 ANE 算法残余噪声

Fig.7 Residual noise in fixed step ANE algorithm

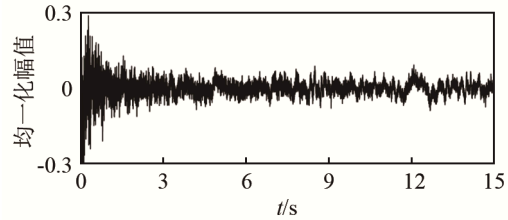


图 8 变步长 ANE 算法残余噪声[14]

Fig.8 Residual noise in Variable Step-Size ANE algorithm[14]

结合图 6(b)中本文所提出的变步长 ANE 算法主动噪声均衡控制结果，对三种主动噪声均衡算法收敛性进行对比，结果如图 9 所示，图 9 中横轴表示迭代次数，纵轴为均方误差 MSE(Mean Square Error)。从 3 条曲线的下降速度可以看出，文献[14]所提出变步长算法的收敛速度明显快于固定步长算法，但稳态误差噪声与固定步长算法相当。而本文所提出的变步长算法的收敛速度相对于文献[14]所提出的变步长算法又进一步提高，且其稳态误差值也低于其他两个算法。

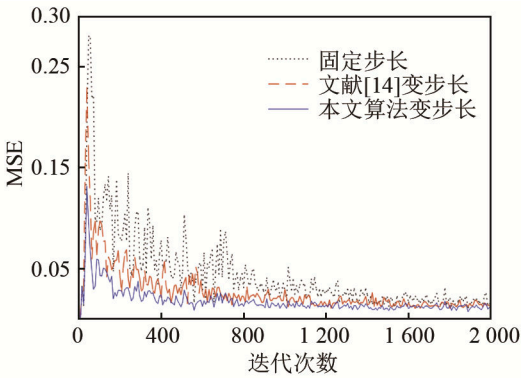


图 9 不同算法的收敛性对比

Fig.9 Comparison of convergence between different algorithms

依据国际标准 Loudness ISO 532A 分别计算采集车内噪声、固定步长 ANE 算法的残余噪声，依据文献[14]变步长 ANE 算法和本文所提出变步长 ANE 算法计算残余噪声响度，结果如表 1 所示。

表 1 不同算法的噪声响度

Table 1 Noise loudness levels of different algorithms

	响度/sone
采集噪声	4.44
固定步长 ANE 算法残余噪声	2.95
文献[14]变步长 ANE 算法残余噪声	2.86
本文变步长 ANE 算法残余噪声	2.72

从表 1 中各个噪声响度值可以看出，采样噪声经过固定步长 ANE 算法主动均衡控制后响度值下降了 1.49 sone。采用依据文献[14]的变步长 ANE 算法的主动噪声均衡控制后噪声响度与固定步长算法相比几乎无变化。而经过本文所提出变步长 ANE 算法主动均衡控制后响度值下降了 1.72 sone，与固定步长算法相比又下降了 0.23 sone，取得了较好的效果。

5 结 论

经过变步长 FxLMS 算法主动控制后，车内噪声已经失去初级噪声的声波特征，无法辨别初级噪声的时变性，而变步长 ANE 算法的残余噪声保留了一定的初级噪声幅值，依然可以辨别出初级噪声的时变性。这说明与主动噪声抵消方法相比，主动噪声均衡方法具有更好的实用性。仿真试验的对比结果表明，本文所提出的变步长 ANE 算法不仅提高了固定步长 ANE 算法的收敛速度，同时降低了稳态误差，且与已有变步长方法相比，具有更快的收敛速度和更小的稳态误差。同时本文所提出变步长 ANE 算法可进一步降低汽车的车内噪声响度，改善了车内声品质。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] AIRAKSINEN T, TOIVANEN J. An optimal local active noise control method based on stochastic finite element models[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, **26**(332): 6924-6933.

[3] 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.

[4] BELGACEM W, BERRY A, MASSON P. Active vibration control on a quarter-car for cancellation of road noise disturbance[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, **331**(14): 3240-3254.

[5] de OLIVEIRA L P R, da SILVA M M, SAS P, et al. Concurrent mechatronic design approach for active control of cavity noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, **314**(3-5): 507-525.

[6] LI D S, CHENG L. The design of synthesized structural acoustic sensors for active control of interior noise with experimental validation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, **329**(2): 123-139.

[7] 张帅，王岩松，张心光，等. VS-MFxLMS 算法及其在汽车车内噪声有源控制中的应用功能[J]. 噪声与振动控制, 2019, **39**(2): 64-69.
ZHANG Shuai, WANG Yansong, ZHANG Xinguang, et al. Application of variable step-size modified FxLMS algorithm to active interior noise control for vehicles[J]. Noise and Vibration Control, 2019, **39**(2): 64-69.

[8] JAIME A. Mosquera-Sánchez, WIM Desmet, et al. A multichannel amplitude and relative-phase controller for active sound quality control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, **88**(1): 145-165.

[9] 贺岩松，涂梨娥，徐中明，等. 汽车声品质研究综述[J]. 汽车工程学报, 2014, **4**(6): 391-401.
HE Yansong, TU Li'e, XU Zhongming, et al. Review of vehicle sound quality[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2014, **4**(6): 391-401.

[10] 王登峰，刘宗巍，梁杰，等. 车内噪声品质的主观评价试验与客观量化描述[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, **36**(S2): 41-45.
WANG Dengfeng, LIU Zongwei, LIANG Jie, et al. Subjective evaluation test and objective quantificational description of vehicle interior noise quality[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, **36**(S2): 41-45.

[11] 姜顺明，陈南. 采用响度控制改进算法的封闭车厢主动消声[J]. 振动与冲击, 2013, **32**(5): 167-170.
JIANG Shunming, CHEN Nan. Active loudness control of enclosed cabin noise by using improved algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, **32**(5): 167-170.

[12] 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.

[13] MARCOS V M, SEARA R. On the stochastic modeling of FxLMS-based narrowband active noise equalization systems[J]. Signal Processing, 2015, **115**: 214-226.

[14] 余荣平，张心光，王岩松，等. 车内噪声主动控制变步长 LMS 算法[J]. 噪声与振动控制, 2015, **35**(1): 123-126.
YU Rongping, ZHANG Xinguang, WANG Yansong, et al. Active noise control for vehicle interior noise using variable incremental step LMS algorithm [J]. Noise and Vibration Control, 2015, **35**(1): 123-126.

[15] SUN G H, FENG T, LI M F, et al. Convergence analysis of FxLMS-based active noise control for repetitive impulses[J]. Applied Acoustics, 2015, **89**: 178-187.

[16] 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：中国标准出版物社, 2002.