

含冲击的车内道路噪声主动控制系统

张立军, 皮雄飞, 孟德建

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 针对道路噪声主动控制系统中, 冲击噪声引起的鲁棒性问题, 提出了一种对冲击噪声的主动控制方法。首先, 进行了道路噪声采集试验, 选取了 4 个最佳参考信号位置, 并采集了道路冲击噪声的数据。然后, 基于多通道自适应滤波算法, 提出了归一化多通道自适应滤波算法和符号算法相结合的冲击噪声主动控制算法。其次, 基于提出的冲击噪声主动控制算法, 搭建了道路噪声主动控制系统仿真模型, 使用采集到的冲击噪声信号和加速度信号进行了仿真分析。最后, 使用选取的 4 个加速度信号和 1 个扬声器, 控制驾驶员处的道路噪声, 进行了道路冲击噪声主动控制试验, 验证了方法的有效性。与原有算法相比, 该算法的稳定性和降噪效果得到了较大的提升。

关键词: 主动噪声控制; 冲击噪声; 归一化算法; 道路试验

中图分类号: TB535

文献标志码: A

Active Control System of Vehicle Interior Road Noise with Impulsive Noise

ZHANG Lijun, PI Xiongfei, MENG Dejian

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aimed at the robustness problem caused by the impulsive noise in the road noise active control system, an active control method for the impulsive noise was proposed. First, the road noise acquisition test was conducted, 4 optimal reference signal positions were selected, and the data of road impulsive noise were collected. Then, based on the multi-channel adaptive filtering algorithm, an impulse noise active control algorithm combining the normalized multi-channel adaptive filtering algorithm and the symbolic algorithm was proposed. After that, based on the proposed impact noise active control algorithm, a simulation model of the

road noise active control system was built, and the collected impact noise signal and acceleration signal were used for simulation analysis. Finally, using four selected acceleration signals and one loudspeaker to control the road noise at the driver's place, an active control test of road impact noise was performed to verify the effectiveness of the method proposed. Compared with the original algorithm, the stability and noise reduction effect of the algorithm have been greatly improved.

Key words: active noise control; impulsive noise; normalization algorithm; road test

随着汽车动力系统噪声控制技术的提升及汽车电动化进程的加快, 车内道路噪声日渐成为车内主导噪声。道路噪声的低频、宽带特性, 使得传统的噪声被动控制手段难以对其实现有效的抑制。噪声主动控制技术具有低频控制效果好的特点, 逐渐成为车内低频结构型道路噪声控制的主流方法^[1-3]。

道路噪声主动控制(active road noise control, ARNC)自 1989 年由 Costin 等^[4]提出以来, 国内外学者展开了一系列研究。自适应前馈控制是最适合应用于 ARNC 的系统类型。它以加速度计获取车辆底盘或车体的振动信号作为系统输入, 通过自适应算法构建与初级噪声等幅、反相的次级声实现道路噪声抑制或消除。现有的道路噪声自适应前馈控制的研究, 根据被控对象可以分为模拟道路噪声控制和实车道路噪声控制两种类型。

模拟道路噪声控制的研究起步较早, 在 1991 年普渡大学的 Ferren^[5-6]在半消声室内, 以激振器对车辆左后轮施加激振力, 模拟了 30~100 Hz 的车内道路噪声。应用单通道前馈控制系统, 试验结果表明

收稿日期: 2022-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(52072268)

第一作者: 张立军(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车振动与噪声控制。

E-mail: tjedu_zhanglijun@tongji.edu.cn

通信作者: 孟德建(1982—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车振动与噪声控制。

E-mail: mdj0218@163.com



论文
拓展
介绍

在驾驶员头部位置 35~45 Hz 的噪声最大可以降低 6.5 dB, 70~100 Hz 的噪音最大可以降低 2.5 dB。这是前馈 ARNC 系统的首次成功演示,但是只针对驾驶员头部实现了控制,而且控制频段较窄。之后 Wyckaert^[7]、Warner^[8]和 Heatwole^[9]也开展了一系列相关的研究,并将单通道系统扩展到多通道系统。2019年,吉林大学陈辉^[10]基于 FxLMS 算法使用小型激振器搭建了类似的车内路噪主动控制硬件在环系统,最大降噪量可达 15 dB。

基于实车试验的真实车内 ARNC 系统的研究始于南安普东大学的 Sutton 博士^[11-14],在他博士论文中开展了前馈 ARNC 系统的实车试验研究。以 60 km·h⁻¹在粗糙路面的测试结果表明,该系统可在 100~200 Hz 范围内实现最大 7 dB 的降噪量;以 80 km·h⁻¹的测试结果表明,该系统可实现最大 5 dB 降噪量。在 2002 年韩国研究者 SHI-HWAN 等^[15]以现代轿车为试验对象,搭建了多通道前馈 ARNC 系统,测试结果表明在 250 Hz 附近的 15 Hz 带宽内,系统可以实现最大 5~6 dB 的降噪量。在 2015 年由现代汽车研究者^[16]公布的道路噪声前馈主动控制系统中,汽车以 60 km·h⁻¹在粗糙路面上行驶时的测量结果显示,该系统在 100 Hz 以上获得了较好的控制效果,其最大降噪量可达 6 dB。2018 年现代汽车的研究者 OH 等^[17-18]在 Nexo 氢能驱动汽车上采用数字加速度传感器,搭建了四通车内 ARNC 系统,在均匀路面匀速工况下实现了平均 4.6 dB 的降噪量。2021 年,重庆大学的刘亚琪^[19]使用的泄露 NFxLMS 算法,基于 ADSP 21489 硬件系统,进行实车车内路噪主动控制道路试验验证,系统在匀速工况下的 50~500 Hz 频段总声压级降低了 3~5 dB。吉林大学的孟豪^[20]基于某电动汽车进行了道路噪声主动控制试验,结果表明,在匀速工况下系统对噪声信号 60~300 Hz 频段具有较好的控制效果,降噪量可达 2~7 dB。

综上所述可以看出,尽管在 ARNC 领域已经形成较多的基于加速度参考信号的前馈 ARNC 系统演示样机,并通过模拟道路试验和实车道路试验验证了其在不同程度上实现了道路噪声的有效抑制。但在道路实验中仅考虑了单一均匀路面上车辆匀速行驶工况下的降噪效果,忽略了车辆实际使用工况下的路面变化、车速变化等非稳态的道路噪声特性。当汽车在遇到减速带冲击、路面冲击等工况时,系统可能会出现发散等问题。

针对这一问题,本文提出了一种冲击噪声主动

控制的算法,并通过试验和仿真对其有效性进行了验证。首先,选取了 4 个最佳的参考信号位置,并采集了这些位置的振动信号和驾驶员处的冲击噪声信号。然后提出了道路冲击噪声主动控制算法,基于该算法建立了 MATLAB/Simulink 模型。最后,进行了实车道路试验,通过仿真和试验共同验证了该算法的有效性

1 参考信号位置选取与信号采集

车内道路噪声主动控制的首要任务是找到与初级噪声相干的振动或噪声源,以确保扬声器发出的次级声信号可以实现与初级噪声相抵消。因此,基于前馈控制器的车内道路噪声主动控制系统也需要找到与车内道路噪声高度相关的振动信号,即参考信号,以此作为系统的输入,实现车内道路噪声的主动控制。本节通过试验获取最佳的参考信号位置,并获取冲击噪声的数据,为后续的算法和仿真提供数据支撑。

1.1 基于 LMS 数采的试验

本文选取一款燃油车作为研究对象,搭建了基于 LMS 数据采集系统的数据采集平台,主要的实验仪器连接关系如图 1 所示。加速度传感器与声压传感器通过 ICP 接口同时接入 LMS (least mean square) 数据采集系统,由蓄电池通过逆变器为 LMS 数据采集系统供电。PC (个人电脑) 主控机通过数据传输网线与数据采集系统连接,通过 LMS Test. Lab 软件控制数据采集的开始和终止。本文在汽车悬架的主要部位上共布置了 12 个三向加速度和 1 个麦克风,布置位置如图 2、图 3 和表 1 所示。

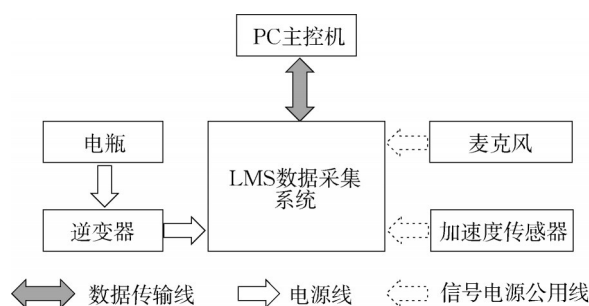


图1 主要设备连接关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of connection relationship of main equipment

试验路面为干燥平直的粗沥青路面。试验时天气晴朗无风,路面无积水,车窗为关闭状态。驾驶试验车辆在试验路面上以 40 km·h⁻¹的初速度空挡滑

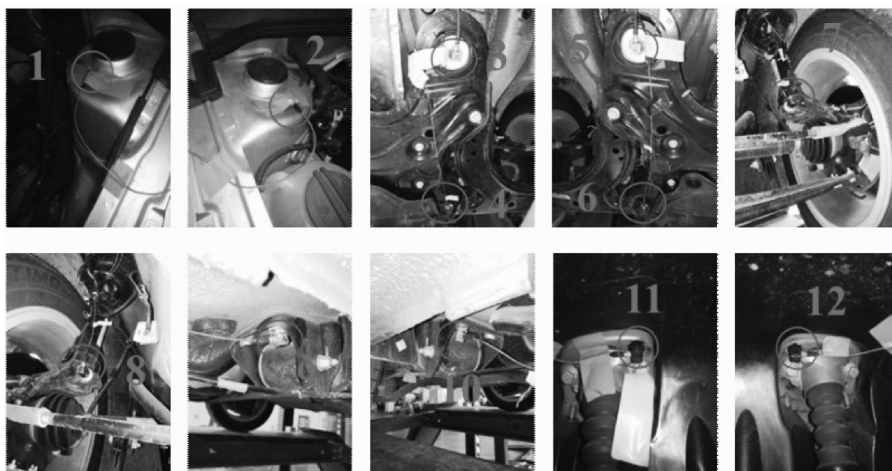


图2 加速度传感器布放位置

Fig. 2 Placement of accelerometer

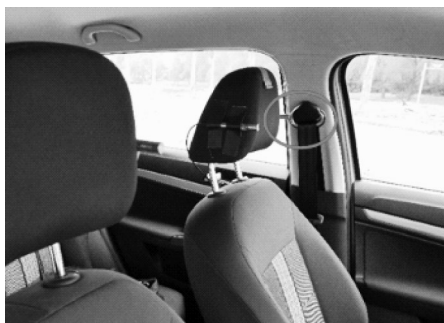


图3 麦克风传感器布放位置

Fig. 3 Placement of microphone

表1 传感器布置方案

Tab. 1 Layout of sensors

序号	位置	传感器类型	方向
1	前悬左侧减振器上端	三向加速度传感器	X,Y,Z
2	前悬右侧减振器上端		
3	副车架与车身左侧前连接点		
4	副车架与车身左侧后连接点		
5	副车架与车身右侧前连接点		
6	副车架与车身右侧后连接点		
7	左侧转向节		
8	右侧转向节		
9	扭力梁与车身左侧连接处		
10	扭力梁与车身右侧连接处		
11	后悬左侧减振器上端	声压传感器	
12	后悬右侧减振器上端		
13	驾驶员左耳旁		

行减速至 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 可以认为此时的车内噪声主要为路面激励引起的道路噪声。

1.2 参考信号位置选取

对采集到的麦克风信号进行频域分析, 得到车内噪声声压级信号如图4所示(A级计权下)。从图4可以看出, 车内道路噪声较为突出, 噪声频段主要集中于 $75 \sim 130 \text{ Hz}$ 的轰鸣声以及 $220 \sim 240 \text{ Hz}$ 的轮

胎空腔共鸣噪声。因此基于相干分析时, 应着重筛选此频段内相干性较大的信号。

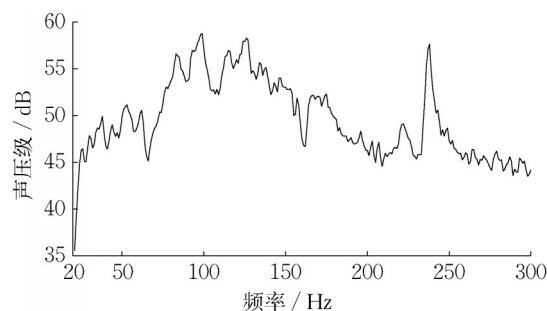


图4 车内道路噪声声压级

Fig. 4 Sound pressure of road noise inside car

本文利用多重相干性作为最佳加速度位置选取的评价指标, 选出与驾驶员位置相干性最高的加速度组合。先对所有加速度信号进行常相干分析, 预先选出常相干函数较大的部分信号。然后, 根据需求确定参考信号的数量, 再从常相干分析获得的信号中生成可能的参考信号组合, 并计算每组信号组合中加速度信号与驾驶员位置的麦克风信号的重相干函数, 将 $75 \sim 130 \text{ Hz}$ 和 $220 \sim 240 \text{ Hz}$ 频率范围内重相干函数的均方根值最大的组合确定为参考信号。

计算每个加速度信号和驾驶员处声压信号的常相干函数, 如图5所示。从该图可以发现, 具有高相干性的频带主要是 $50 \sim 150 \text{ Hz}$ 和 $220 \sim 240 \text{ Hz}$, 与噪声的频带较为一致。

考虑到计算量和实际应用问题, 本文选取4个加速度信号作为参考信号。首先预选出18个常相干函数较大的位置, 预选的位置为后悬左侧减振器上端的XYZ方向、扭力梁与车身左侧连接点的XYZ

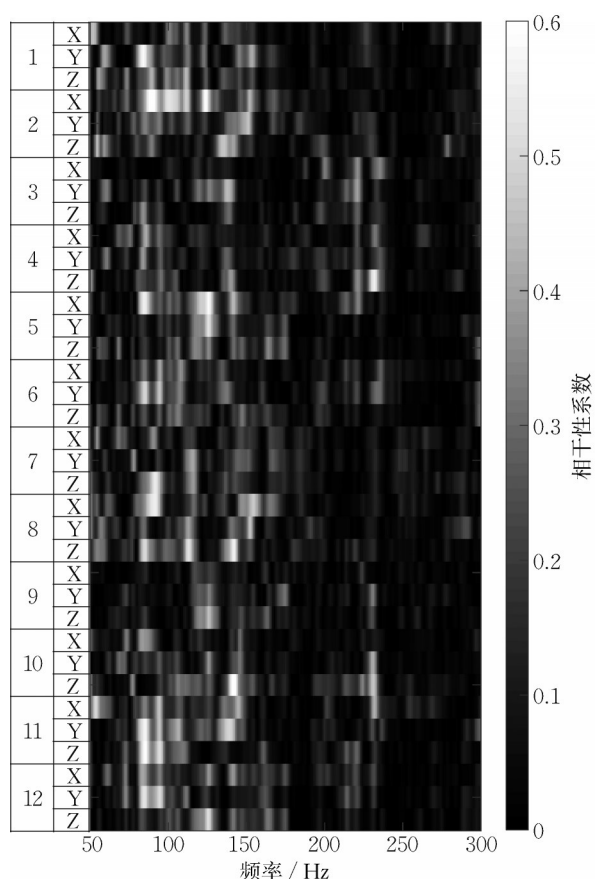


图5 加速度信号与声压信号的常相干函数

Fig. 5 Constant coherence function of acceleration signal and sound pressure signal

方向、后悬右侧减振器上端的XYZ方向、扭力梁与车身右侧连接点的XYZ方向、副车架与车身右侧后连接点XYZ方向、副车架与车身右侧前连接点的XYZ方向。对这18个位置进行排列组合,共3 060种组合,分别计算每种组合的重相干函数。最终得

到的4个位置为扭力梁与车身左侧连接点Z向、扭力梁与车身右侧连接处Z向、副车架与车身右侧后连接点Z向、副车架与车身右侧前连接点Z向。

1.3 冲击噪声数据采集

本文的数据来源于校园的减速带路面(图6)冲击,采集设备与1.1节相同,只采集4个已选出位置的加速度信号和驾驶员头枕左侧的声压信号。试验路面为干燥平直的粗沥青路面,并且匀速通过减速带。试验时天气晴朗无风,路面无积水,车窗为关闭状态。驾驶试验车辆在试验路面上以 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度匀速行驶。



图6 数据采集路面

Fig. 6 Road pavement for data collection

1.4 次级通路获取

次级通路指从次级声源到麦克风之间的声通路,对于搭载于实车的主动控制系统来说,完整的次级通路包括控制器外围电路、功放/扬声器(次级声源)、乘员舱声腔、麦克风(误差传感器)几个环节,如图7所示。图中,RANC控制器表示道路噪声主动控制系统控制器, y 表示控制器计算得到的次级声信号, e 表示误差麦克风采集得到的误差信号。

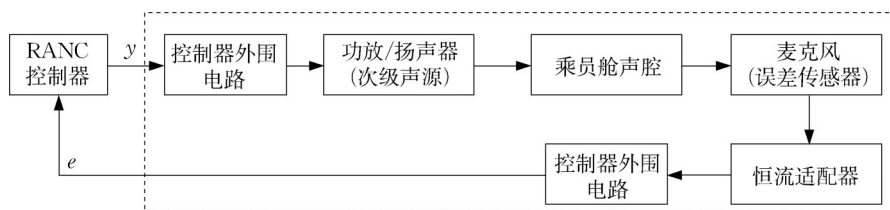


图7 次级通路构成

Fig. 7 Composition of secondary path

本文采用的传函离线辨识方法为附加随机噪声法。扬声器(采用原车扬声器)和麦克风的布放位置如图8所示。次级通路传递函数在半消声室内测得,均为512阶FIR(finite impulse response)滤波器,其单位脉冲响应如图9所示。

2 多通道自适应滤波算法改进

2.1 FXLMS算法

图10为基于多通道FXLMS(filtered-x least mean square,)算法的ARNC系统框图,图中A/D表示数模转换,LMS表示控制算法。假设参考信号

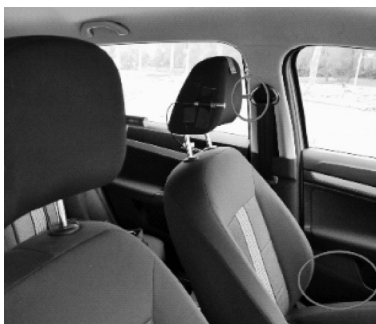


图8 扬声器和麦克风的位置

Fig. 8 Location of Speaker and microphone

(由加速度计在车辆底盘/车身等位置获取的振动加速度信号)的数量为 J 个,次级声输入信号(由自适应

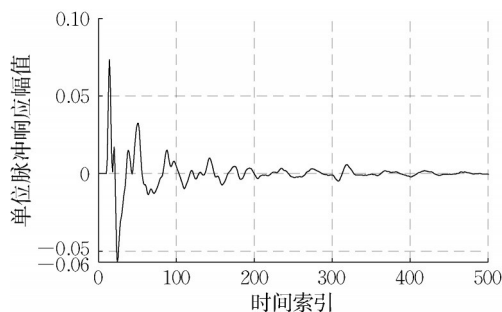


图9 次级通路单位脉冲响应

Fig. 9 Unity impulse response of secondary path

控制器输出到次级源扬声器输入端的电信号)的数量为 M 个,误差信号(车内误差麦克风在目标降噪点位置获取的声压信号)的数量为 K 个。

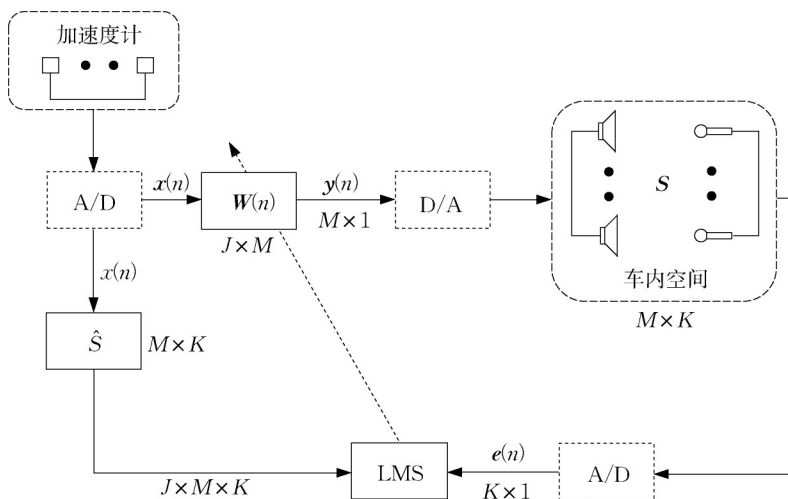


图10 FXLMS算法框图

Fig. 10 Block diagram of FXLMS algorithm

$x(n)=[x_1(n) \ x_2(n) \ \cdots \ x_J(n)]^T$ 表示 J 个参考信号构成的列矢量; $y(n)=[y_1(n) \ y_2(n) \ \cdots \ y_M(n)]^T$ 表示 M 个次级声输入信号构成的列矢量; $e(n)=[e_1(n) \ e_2(n) \ \cdots \ e_K(n)]^T$ 表示 K 个误差信号构成的列矢量。由 M 个次级源扬声器到 K 个误差麦克风总共构成 $M \times K$ 条次级通路 $S(z)$,记为

$$S(z)=\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & \cdots & \cdots & s_{1K} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & \cdots & \cdots & s_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & s_{mk} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ s_{M1} & s_{M2} & \cdots & \cdots & \cdots & s_{MK} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: s_{mk} 表示第 m 个扬声器到第 k 个麦克风的次级通路传递函数单位脉冲响应列式量。

自适应滤波器是由 $J \times M$ 个滤波器构成的滤波器组

$W(n)=$

$$\begin{bmatrix} w_{11}(n) & w_{12}(n) & \cdots & \cdots & \cdots & w_{1M}(n) \\ w_{21}(n) & w_{22}(n) & \cdots & \cdots & \cdots & w_{2M}(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & w_{jm}(n) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ w_{J1}(n) & w_{J2}(n) & \cdots & \cdots & \cdots & w_{JM}(n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $w_{jm}(n)=[w_{jm,1}(n) \ w_{jm,2}(n) \ \cdots \ w_{jm,L}(n)]^T$ 表示第 n 时刻与第 j 个参考信号和第 m 个次级声输入信号对应的 L 阶自适应滤波器权系数列矢量。

第 m 个次级声输入信号可以表示为

$$y_m(n) = \sum_{j=1}^J \mathbf{w}_{jm}^T(n) \cdot \mathbf{x}_j(n) \quad (3)$$

式中 $\mathbf{x}_j(n) = [x_j(n) \ x_j(n-1) \ \cdots \ x_j(n-L+1)]^T$ 表示第 j 个参考信号矢量。

第 k 个误差麦克风信号可以表示为

$$e_k(n) = d_k(n) - y'_k(n) \quad (4)$$

式中: $d_k(n)$ 表示第 n 时刻在第 k 个误差麦克风位置处的初级信号; $y'_k(n)$ 表示第 n 时刻在第 k 个误差麦克风位置处的次级声压响应信号, 可以表示为

$$y'_k(n) = \sum_{m=1}^M s_{mk} * y_m(n) \quad (5)$$

式中: 符号“*”表示线性卷积运算; $x'_{jmk}(n)$ 表示第 j 个参考信号经过次级通路估计 \hat{s}_{mk} 滤波后得到的参考信号。其矢量元素的表达式为

$$x'_{jmk}(n) = \hat{s}_{mk} * x_j(n) \quad (6)$$

权系数矢量迭代方程为

$$\mathbf{w}_{jm}(n+1) = \mathbf{w}_{jm}(n) + 2\mu \cdot \sum_{k=1}^K x'_{jmk}(n) \cdot e_k(n) \quad (7)$$

2.2 改进的FXNLMS算法

为了克服收敛系数对输入信号功率的依赖性问题, Farhang^[21]提出了参考信号归一化最小均方误差(normalized least mean square, NLMS)算法。将这一思想应用到噪声主动控制系统中, 可以导出多通道 FXNLMS (filtered-x normalized least mean square) 算法的自适应滤波器权系数迭代方程如下:

$$\mathbf{w}_{jm}(n+1) = \mathbf{w}_{jm}(n) + 2 \cdot \frac{\mu_0}{\sum_{k=1}^K \mathbf{x}_{jmk}^T(n) \mathbf{x}_{jmk}(n)} \cdot \mathbf{x}'_{jmk}(n) \cdot e_k(n) \quad (8)$$

与 FXLMS 算法相比, 在一个多通道系统中所有自适应滤波器权系数的更新计算量增量为 $J \times M \times K$ 倍的能量归一化计算量。但通过对整个控制系统的分析不难发现, 导致系统不稳定的直接因素是参考信号能量的时变特性。因此, 本文提出只对参考信号能量进行归一化的参考信号归一化滤波最小均方误差算法 (filter normalized-x least mean square, FNXLMS), 权系数矢量迭代方程可以表示为

$$\mathbf{w}_{jm}(n+1) = \mathbf{w}_{jm}(n) + \frac{2\mu_0}{\mathbf{x}_j^T(n) \mathbf{x}_j(n)} \cdot \sum_{k=1}^K \mathbf{x}'_{jmk}(n) \cdot e_k(n) \quad (9)$$

在实际应用中, 由于测得参考信号的幅值有可

能小于1, 因此对迭代方程进行改进

$$\mathbf{w}_{jm}(n+1) = \mathbf{w}_{jm}(n) + \frac{2\mu_0}{\alpha + \beta \cdot \mathbf{x}_j^T(n) \mathbf{x}_j(n)} \cdot \sum_{k=1}^K \mathbf{x}'_{jmk}(n) \cdot e_k(n) \quad (10)$$

α 和 β 根据实际情况进行设置, 以保证迭代方程的分母始终处于合适的范围。

为了进一步加强算法的稳定性, 本文将符号算法引入到 μ_0 控制中, 当权系数更新过大(即次级声输入信号过大)时, 会将收敛系数重置为0, 此时权系数也将重新更新。即:

$$\mu_0 = \begin{cases} 0, & y_m(n) > y_{\max} \\ \mu_0, & y_m(n) \leq y_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

3 仿真分析

本节使用第1节中采集的4个加速度信号和1个麦克风信号进行仿真分析, 次级通路使用测得的真实次级通路。

3.1 模型搭建与参数设置

根据 FNXLMS 算法和符号算法的原理, 使用4个参考信号, 1个次级声源和1个误差信号, 搭建了基于 Matlab/Simulink 的车内噪声主动控制仿真模型。算法仿真参数通过多次仿真结果选择了最优值, 仿真参数如表2所示。

表2 仿真参数表

Tab. 2 Simulation parameters

参数	FXLMS算法	FNXLMS算法
收敛系数	0.000 01	0.001
滤波器阶次	512	512
α		1
β		10
y_{\max}		1

3.2 仿真结果

降噪后的时域声压级如图11所示。由图11可以看出, 当在稳定的路面上(0~8 s)行驶时, 两种算法都有一定的降噪效果, 且效果基本相同。但是当遇到较大冲击(8~11 s)时, 传统 FXLMS 算法会出现发散现象, 使得降噪后的信号会远远大于初级噪声信号, 并且后续不会收敛。而 FNXLMS 算法则不会出现发散现象, 且会很快收敛, 冲击过后仍有较好的降噪效果, 最大降噪量为3.58 dB。说明了该算法比传统算法具有更好的鲁棒性能, 更适用于实际道路行驶工况。

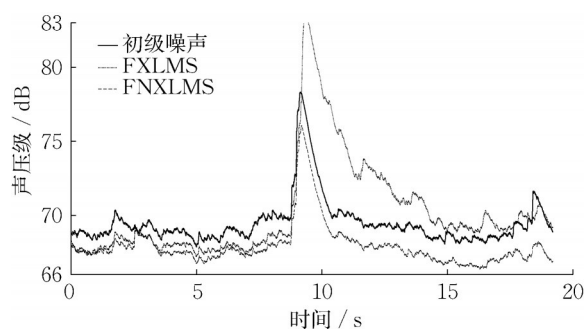


图11 仿真结果

Fig. 11 Simulation result

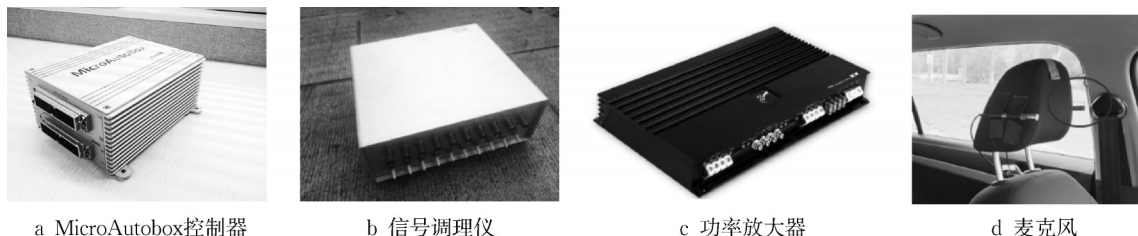


图12 试验仪器与设备

Fig. 12 Test instruments and equipment

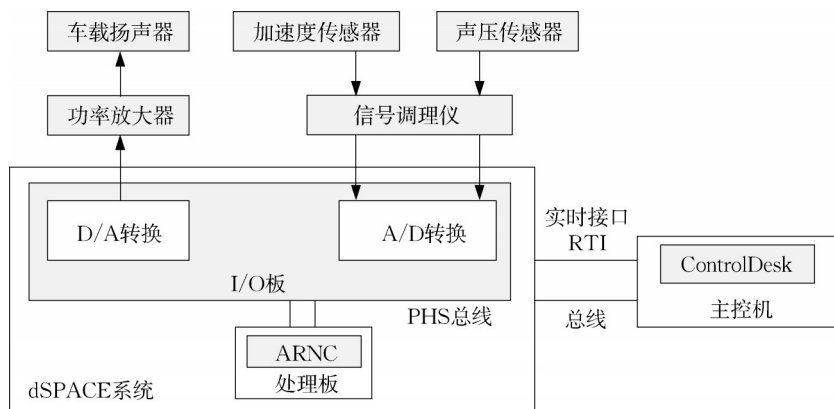


图13 硬件在环试验平台

Fig. 13 Hardware-in-the-loop test platform

试验中,声压传感器布置于驾驶员座位左头枕处,加速度计布置于选取的4个位置,扬声器使用左前排1个车载扬声器。试验中MicroAutobox、信号调理仪、功率放大器以及供电装置均布置在汽车行李舱中,如图14所示。

4.2 试验工况

本节的试验工况与1.3节冲击噪声数据采集的工况保持一致,均为粗沥青路面(含减速带),车速为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 匀速,车内乘坐两个乘员。控制参数与仿真时保持一致。分别测量噪声主动控制系统开关时,驾驶员位置头枕左侧的噪声。

4.3 试验结果

控制系统降噪效果的时域声压级如图15所示。

4 基于dSPACE的实车道路试验验证

4.1 硬件在环平台

为了进一步验证算法的有效性,本文使用选取的4个加速度信号,1个车载扬声器和1个麦克风,搭建了基于dSPACE的硬件在环实验平台,进行实车试验。试验仪器与设备、试验设备之间的连接关系分别如图12和图13所示。



图14 仪器布置图

Fig. 14 Layout of instrument

由图15可以看出,车辆在经过减速带冲击(8~11 s)时,该算法具有较强的鲁棒性,在整个控制时间内都

没有出现发散情况,最大降噪量为2.19 dB。

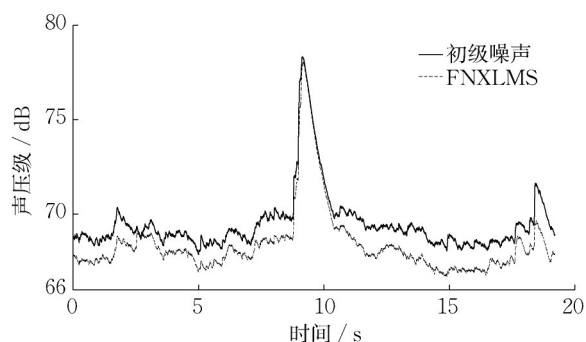


图15 试验时域声压级

Fig. 15 Time-domain sound pressure of experiment

控制效果的幅频图如图16所示。由图16可以看出,系统在50~150 Hz和240 Hz附近均有较大的降噪量,最大降噪量为4.39 dB,并且降噪频带与1.2节参考信号相关性较高的频段保持一致。道路试验的控制效果证明了该算法在遇到冲击时,具有较强的稳定性和降噪效果,该算法比较适用于真实的道路场景中。

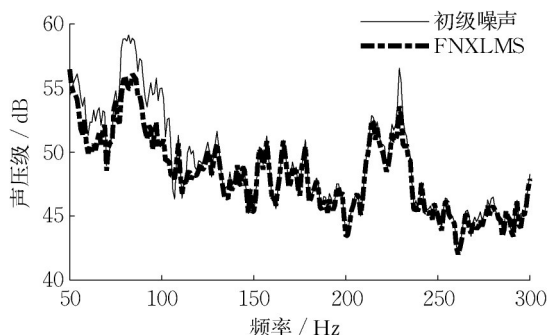


图16 试验幅频图

Fig. 16 Amplitude-frequency diagram of test

虽然实车试验取得了良好的降噪效果,但是与仿真结果(图11)相比,试验结果降噪后的整体声压级有一定的偏高,少数频段会出现声压级变高的现象,其主要原因是实车内声场较为复杂,实时性控制要求较高,还有一些车外噪声(风噪等)的干扰,使得降噪量没有仿真的那么高。

5 结论

本文针对道路噪声主动控制系统中,冲击噪声引起的鲁棒性问题,提出了一种鲁棒性控制方法,主要结论如下:

(1)进行了车内道路噪声采集试验与分析,选取

了扭力梁与车身左侧连接点Z向、扭力梁与车身右侧连接处Z向、副车架与车身右侧后连接点Z向、副车架与车身右侧前连接点Z向这4个位置的加速度信号作为参考信号。

(2)基于符号算法和FNLXMS算法,提出了道路噪声主动控制系统抗冲击算法。

(3)基于提出的算法,搭建了MATLAB/Simulink模型,通过仿真,与原始FxLMS算法进行了对比。结果发现FxLMS算法在遇到冲击噪声时,系统会发散,而提出的算法则有较好的稳定性,最大降噪量可达3.58 dB。

(4)使用4个加速度信号,1个扬声器和1个麦克风,搭建了基于dSPACE的车内道路噪声主动控制系统硬件在环试验平台,进行了道路实验。结果表明在遇到冲击时,系统具有较强的稳定性和降噪效果,最大降噪量为2.19 dB,进一步验证了该算法的有效性。

作者贡献声明:

张立军:项目监督与管理。

皮雄飞:论文初稿,方法提出,试验采集,数据处理与分析。

孟德建:方法验证,论文修改。

参考文献:

- [1] JUNG W, ELLIOTT S J, CHEER J. Local active control of road noise inside a vehicle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 121(15):144.
- [2] 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: 753.
- [3] CHEER J. Active control of the acoustic environment in an automobile cabin [D]. Southampton: University of Southampton, 2012.
- [4] COSTIN M H, ELZINGA D R. Active reduction of low-frequency tire impact noise using digital feedback control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1989, 9(5): 3.
- [5] FERREN W B, BERNHARD R J. Active control of simulated road noise[J]. SAE Transactions, 1991, 1: 1411.
- [6] FERREN W B. An investigation of the active control of structure-borne road noise in automobile cabins [D]. West Lafayette: Purdue University, 1991.
- [7] WYCKAERT K, DEHANDSCHUTTER W, BANFO G L. Active vibration control of rolling noise in a passenger car: Performance evaluation of actuator and feedback sensor configuration [C/CD]//Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings. Washington: Institute of Noise Control Engineering, 1995 : 755.

- [8] WARNER J. Active noise control in an off-road vehicle cab[J]. *Noise and Vibration Worldwide*, 1995, 26(7): 9.
- [9] HEATWOLE C M, Bernhard R J. Prediction of multiple-input active control of road noise in automobile interiors[C]//*Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings*. Washington: Institute of Noise Control Engineering, 1994: 367-372.
- [10] 陈辉. 车内路噪自适应主动控制技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
CHEN Hui. Research on adaptive active control of road noise inside vehicles [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [11] SUTTON T J, ELLIOTT S J. Active control of interior road noise[J]. *Noise and Vibration Worldwide*, 1994, 25(2): 14.
- [12] SUTTON T J, ELLIOTT S J, MCDONALD A M. Active control of road noise inside vehicles [J]. *Noise Control Engineering Journal*, 1994, 42(4): 137.
- [13] SUTTON T J. The active control of random noise in automotive interiors [D]. Southampton: University of Southampton, 1992.
- [14] SUTTON T J, ELLIOTT S J, NELSON P A. The active control of road noise inside vehicles [C]//*Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference*. Gothenburg, Sweden: Institute of Noise Control Engineering, 1990: 1-6.
- [15] SHI-HWAN O, HYOUN-SUK K, YOUNGJIN P. Active control of road booming noise in automotive interiors [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 111(1): 180.
- [16] CHI S O, KANG D I, LEE H M. Development of an active road noise control system [J]. *Atz Worldwide*, 2015, 117(1): 36.
- [17] OH C, IH K, LEE J. Development of a mass-producible ANC system for road noise[J]. *ATZ Worldwide*, 2018, 120(7): 58.
- [18] OH C, IH K, LEE J. Entwicklung eines serienreifen ANC-systems für fahrbahngeräusche[J]. *ATZ — Automobil Technische Zeitschrift*, 2018, 120(7): 60.
- [19] 刘亚琪. 电动汽车车内路噪主动控制技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
LIU Yaqi. Active control of road noise inside electric vehicle [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [20] 孟豪. 纯电动汽车路噪主动控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
MENG Hao. Research on active of control method of road noise for pure electric vehicles [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [21] FARHANG-BOROUJENY B. Adaptive filters: Theory and applications[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2013.