

引用格式: 刘志恩, 魏浩钦, 朱亚伟, 等. 组合声源管路信号失真的自适应修正方法研究[J]. 声学技术, 2022, 41(1): 82-87. [LIU Zhi'en, WEI Haoqin, ZHU Yawei, et al. Research on adaptive correction method of signal distortion of combined sound source pipeline[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(1): 82-87.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.01.012

组合声源管路信号失真的自适应修正方法研究

刘志恩^{1,2}, 魏浩钦¹, 朱亚伟¹, 杨星瑶¹

(1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北武汉 430070; 2. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北武汉 430070)

摘要: 针对使用外置声源模拟汽车进气、排气噪声进行空气声传递路径分析的试验中, 现有低频声源无法发出进排气时频率为 30 Hz 的低频噪声, 同时由于低频声源体积过大需要过渡管道才能将噪声信号传输至排气尾管。为了解决声源系统引入过渡管道带来的声阻抗变化, 提出了一种自适应预滤波的噪声修正方法。该方法采用最小均方误差自适应算法对系统逆传递函数进行拟合, 得到最佳滤波器系数, 通过构建有限脉冲响应滤波器实现对组合声源系统信号失真的修正。仿真结果表明, 与维纳滤波方法相比, 该方法实现了信号在 30~1 000 Hz 频段范围内 ± 5 dB 的幅值波动, 管口噪声信号输出稳定。基于 NI Compact RIO 搭建了滤波器并进行测试, 试验的噪声频谱曲线与仿真结果吻合度较高, 证明了该方法的有效性。

关键词: 组合声源; 过渡管道; 自适应预滤波; 传递损失; 逆传递函数

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-01-0082-06

Research on adaptive correction method of signal distortion of combined sound source pipeline

LIU Zhi'en^{1,2}, WEI Haoqin¹, ZHU Yawei¹, YANG Xingyao¹

(1. Wuhan University of Technology, Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070, Hubei, China;
2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: In the airborne sound transmission path analysis experiment, an external sound source is used to simulate car intake and exhaust noise. However, the existing low-frequency sound source cannot emit the 30 Hz low-frequency noise such as intake and exhaust, and the volume of the low-frequency sound source is too large, so that a transition pipe is needed to transmit the emitted noise signal to the exhaust tail pipe. In order to solve the problem of acoustic impedance changes caused by introducing transition pipe into the sound source system, an adaptive pre-filtering noise correction method is proposed. This method uses the minimum mean square error adaptive algorithm to fit the inverse transfer function of the system to obtain the best filter coefficients. The finite impulse response filter is constructed to correct the signal distortion of the combined sound source system. The simulation results show that, compared with the Wiener filter, this method realizes a signal amplitude fluctuation of ± 5 dB in the range of 30~1 000 Hz, and the signal output of the nozzle is stable. The filter is built and tested based on NI Compact RIO. The tested result of noise spectrum curve is in good agreement with the simulated one, which proves the effectiveness of the method.

Key words: combined sound source; transition pipeline; adaptive pre-filtering; transmission loss; inverse transfer function

0 引言

进气和排气噪声是传统能源车辆的主要噪声源之一, 通过进排气噪声的声音设计有利于改善车内的声品质进而提高汽车产品的市场竞争力^[1-2]。为了评估进排气噪声对车内总噪声的贡献量, 工程师

通常使用消声器或软管分别将进排气噪声引走^[3], 但这种试验方法无法获得进气和排气噪声的时域信号, 因而无法对车内噪声中的进气、排气成分进行有效的主观评价。

传递路径分析(Transfer Path Analysis, TPA)是研究汽车振动噪声传递问题的有效方法^[4], 通过识别激励源以及计算各传递路径对总响应的贡献量来改善整车的噪声、振动、舒适性(Noise、Vibration、Harshness, NVH)性能^[5]。传递函数测试需要拆除激励源, 工作量大且测试时间长, 导致试验可行性不高。传统 TPA 方法中可通过特殊的微型体积声源

收稿日期: 2021-01-09; 修回日期: 2021-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(51575410)基金资助项目。

作者简介: 刘志恩(1977—), 男, 浙江建德人, 博士, 副教授, 研究方向为整车 NVH 噪声与振动控制。

通信作者: 朱亚伟, E-mail: ywzhu@whut.edu.cn

进行车辆进气、排气噪声源载荷识别,然而微型体积声源的频率响应通常高于 50 Hz,而进气和排气噪声二阶频率低至 30 Hz,该方法对频率低于 50 Hz 时估计的目标响应不足,从而限制了经典 TPA 方法在车辆进气、排气噪声分离中的应用。

模拟运行工况传递路径分析(Simulated Operational Path Analysis, SOPA)方法,通过使用低频和中高频的外部声源模拟运行工况下的进气和排气噪声源来估计从参考点到目标响应点的传递率^[6]。由于声学特性中低频的辐射阻抗小^[7],需要增大低频声源面积来增加低频的辐射阻抗,这就导致了低频声源的体积较大,无法直接放置在汽车尾部的排气尾管中,需要在外置声源与排气尾管之间增设过渡管道,通过过渡管道将声源的输出噪声输送至排气尾管处。

图 1 为进排气噪声模拟试验装置图。低频声源通过锥形过渡管道将声音信号接入排气尾管内,噪声从排气尾管向外辐射,通过外部声源模拟运行工况下的进气和排气噪声,用来估计参考点 B 到目标点 C 之间的传递率。然而过渡管道与外置声源系统的组合会导致试验装置中声阻抗发生变化,造成输入的噪声信号在传递过程中产生损失,使得目标响应点测得的噪声信号产生偏差,影响 TPA 试验测量结果的精确度。为了减小过渡管道对输入信号的影响,使组合声源系统输出的管口信号在 30~1 000 Hz 频段具有稳定的频率分布,必须对声源的输入信号进行修正。

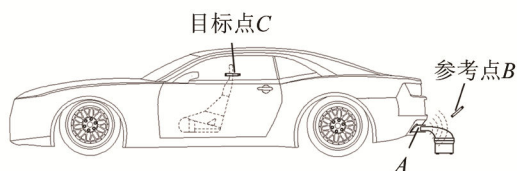


图 1 进排气噪声模拟试验装置
Fig.1 Simulated test device of intake and exhaust noise

目前国内外对于组合声源系统的噪声传递损失和修正并无详细文献研究。Ho 等^[8]采用反馈和前馈分布式控制的方法,对平面声源的 30~1 000 Hz 频段部分进行了矫正,在目标频率段实现了较好的均衡效果,但需要串联多个滤波器用于补偿和稳定系统,且过程繁琐。谢丽萍等^[9]通过测量过渡管道声阻抗,根据过渡管道传递矩阵对组合声源系统的输入信号进行补偿,在 400 Hz 以上较宽频率范围内实现了信号的稳定输出。乐意等^[10]通过对音箱衍射的计算得到箱体和观测距离组成系统的传递函数,将系统的逆传递函数作补偿音箱衍射的修正函数,频率在 60 Hz 以上时实现了较好的补偿,但频

率 50 Hz 以下存在较大波动。章康宁^[11]基于维纳滤波方法对扬声器的实测传递函数进行了修正,缩小了各个扬声器频率在 100 Hz 以上时的幅频响应差异。马登永等^[12]基于最小均方误差(Least Mean Square, LMS)自适应算法对扬声器系统频响进行了均衡处理,实现了在中高频段的修正效果,但缺乏对扬声器低频的补偿。

为解决过渡管道所引起的声阻抗变化对输入噪声信号的干扰,本文运用 LMS 自适应预滤波的方法,对低频声源与过渡管道组合的声音系统进行补偿和修正。以随机白噪声信号作为激励,并作为自适应算法的期望信号,以测得的实际管口噪声作为参考信号。该方法有效地消除了引入过渡管道对噪声信号的干扰,修正了噪声信号在 30 Hz 低频部分的信号失真,满足了进排气噪声模拟装置的试验要求。

1 声源损失理论修正模型

在图 1 所示的进排气噪声模拟试验装置中,实际组合结构的声源系统由于传递路径的存在,不可避免地导致了测得的管口信号与输入噪声信号存在差异。

如果已知输入噪声信号和实际管口信号分别为

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

$$\mathbf{s}(n)=\sum_{k=0}^{L-1} \mathbf{x}(n)\mathbf{h}(n-k) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}(n)$ 表示长度为 L 的输入噪声信号矢量; $\mathbf{h}(n)$ 为组合声源系统单位脉冲响应; $\mathbf{s}(n)$ 为管口信号矢量。则存在修正系数 $\mathbf{w}(n)$ 使得管口修正后的信号为

$$\mathbf{y}(n)=\sum_{k=0}^{L-1} \mathbf{s}(n)\mathbf{w}(n-k) \quad (3)$$

令 $\mathbf{y}(n)=\mathbf{x}(n)$, 得:

$$\mathbf{w}(n)=\mathbf{h}^{-1}(n) \quad (4)$$

在实际外置声源系统中,由于传递函数矩阵为非最小相位系统,无法对其直接求逆^[13],因而需要采用更多的修正方法来抵消传递函数对声学信号的影响。

1.1 维纳滤波修正算法

通过采用自适应滤波中的维纳滤波可对组合声源系统进行修正,如图 2 所示,其中 $\mathbf{x}(n)$ 既为输入白噪声信号,也为期望信号, $\mathbf{s}(n)$ 既为修正前管口输出信号,也为参考信号, $\mathbf{w}(n)$ 为滤波器系数。通过维纳-霍普夫(Wiener Hopf)方程^[14]可求解出最

优的滤波器系数,使其与管口信号进行线性卷积来达到对组合声源系统传递损失补偿的效果。

由式(3)可得,在组合声源补偿系统中,修正后的估计值为 $y(n)$ 。期望信号 $x(n)$ 与修正后的估计值 $y(n)$ 之间的误差 $e(n)$ 为

$$e(n) = x(n) - y(n) \quad (5)$$

采用最小均方误差的方法来获得误差 $e(n)$ 的最小值,令其导数等于 0 可得到 Wiener Hopf 方程的最优解为

$$w(n) = \frac{r_{xy}}{r_{xx}} \quad (6)$$

式中: r_{xx} 为参考信号的自相关函数, r_{xy} 为参考信号和期望信号的互相关函数。

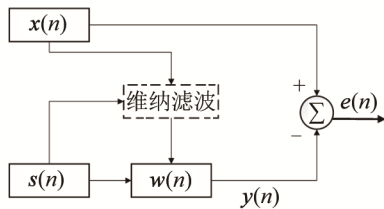


图2 维纳滤波修正组合声源系统原理图

Fig.2 Principle diagram of the combined sound source system with Wiener filter correction

1.2 LMS 自适应预滤波修正算法

自适应预滤波修正组合声源系统原理图如图 3 所示,基于最小均方误差(LMS)自适应预滤波修正组合声源系统的方法,利用声学数据采集软件采集输入信号 $x(n)$ 和修正前管口信号 $s(n)$,将 $x(n)$ 作为期望信号, $s(n)$ 作为参考信号,按照误差信号 $e(n)$ 最小原则采用最速下降法对滤波器系数 $w(n)$ 进行自动迭代,迭代到系统收敛后,将最后一次迭代的滤波器系数 $w_0(n)$ 作为最佳系数,并对输入信号进行预滤波处理,然后将处理后的信号送至组合声源系统进行重放,以使管口处的输出信号接近期望信号 $x(n)$ 的质量水平。

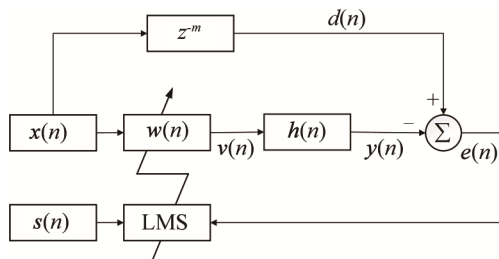


图3 自适应预滤波修正组合声源系统原理图

Fig.3 Principle diagram of the combined sound source system with adaptive pre-filtering correction

在该组合声源修正系统中,考虑到系统中因果性的存在,需要设置延时值,最优值存在于一个较大的范围内,本文选取滤波器长度的一半作为延迟

值 m 。

$$d(n) = [x(n+m) \ x(n+m-1) \ \cdots \ x(n+m-L+1)]^T \quad (7)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (8)$$

为使均方误差达到最小,利用梯度下降法进行迭代:

$$J(n) = E(e(n)^2) = E[(d(n) - y(n))^2] \quad (9)$$

均方误差性能梯度和梯度下降法迭代计算权矢量公式分别为

$$\nabla(n) = \frac{\partial J(n)}{\partial w(n)} \quad (10)$$

$$w(n+1) = w(n) + \mu(-\nabla(n)) \quad (11)$$

使用单个平方误差梯度来代替多个均方误差梯度,即:

$$\nabla(n) \approx \hat{\nabla}(n) = -2e(n)x(n) \quad (12)$$

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x(n) \quad (13)$$

其中: μ 为步长,通过迭代得到最佳逆滤波器系数 $w_0(n)$ 。

则修正后的输入信号 $v(n)$ 为

$$v(n) = w_0 * x(n) \quad (14)$$

式中: $*$ 表示线性卷积运算。

2 仿真分析与试验设计

2.1 仿真分析

2.1.1 过渡管道仿真分析

为了获取过渡管道的声学传递特性,可通过有限元法对其结构进行声学仿真分析。论文所设计的过渡管道形状如图 4 所示,采用弯曲锥管形式,其输入端口内径为 159 mm,输出外径为 42 mm,内径为 37 mm。在 Hypermesh 软件中建立其有限元模型,同时在入口端输入 1 Pa 声压,为了模拟管口的辐射阻抗,在出口端设置直径 300 mm、高度 250 mm 的空气腔,其表面均为无反射界面,有限元模型如图 5 所示。设置软件计算频率范围为 30~500 Hz,步长为 5 Hz,声学有限元计算完成后得到管口处声压值,如图 6 所示。

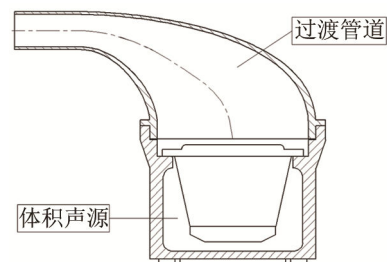


图4 弯曲锥管示意图

Fig.4 Schematic diagram of curved cone

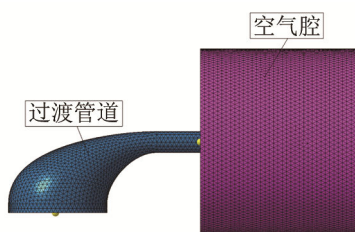


图5 结构的有限元仿真模型
Fig.5 Finite element simulation model of the structure

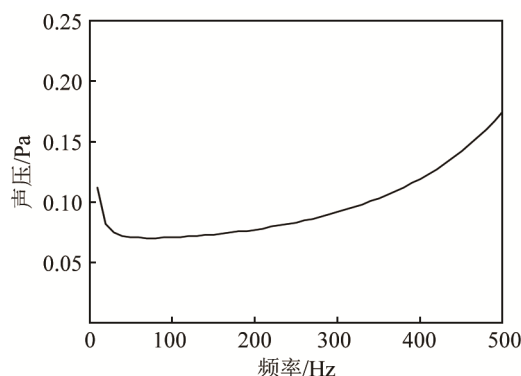


图6 管口处声压谱仿真结果
Fig.6 Simulation results of sound pressure spectrum at the nozzle

图6中管口处声压值的仿真结果表明,过渡管道的存在使得外置声源发出的低频信号在传递过程中发生不同程度的衰减,导致管口的低频噪声能量降低。从图6中可以看出,频率越低则管道的声压幅值衰减越明显。因此,为了保证车内测得的排气噪声信号具有较高的信噪比,需要对组合声源系统的传递损失进行补偿以减小其失真。

2.1.2 修正仿真分析

根据1.2节所述的理论分析设计试验方案,以随机白噪声信号作为激励驱动组合声源发声,使用LMS Test.lab分别在声源输入端口和管口处同步采集电信号和修正前的噪声信号,随后将两者分别作为期望信号与参考信号给入自适应算法,经过迭代得到最优逆滤波器系数,即滤波器的脉冲响应,如图7所示。本文使用256阶有限元单位冲击响应(Finite Impulse Response, FIR)滤波器系数对系统进行修正。

将得到的滤波器系数与修正前管口信号进行线性卷积计算得到仿真修正后的管口信号,将其与修正前管口信号频谱对比,结果如图8所示。从图8中可以看出未经修正的管口信号频谱特性不均匀,其声压级随频率的波动较大,而修正后的管口信号在30~1 000 Hz频段内传递损失较小,幅值波动平稳,可以满足进排气噪声试验的基本要求。由于仿真修正过程缺少功率放大器对信号的放大作用,因而仿真得到的修正信号声压级整体较低,但

并不影响修正的效果。

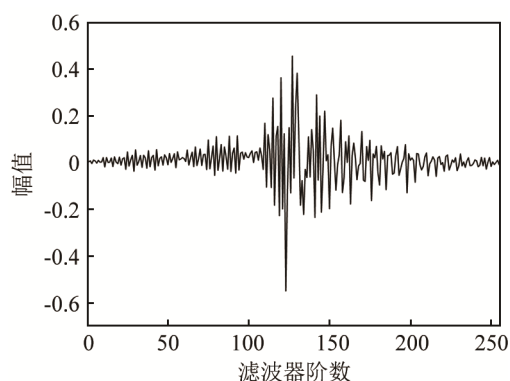


图7 滤波器脉冲响应
Fig.7 Filter impulse response

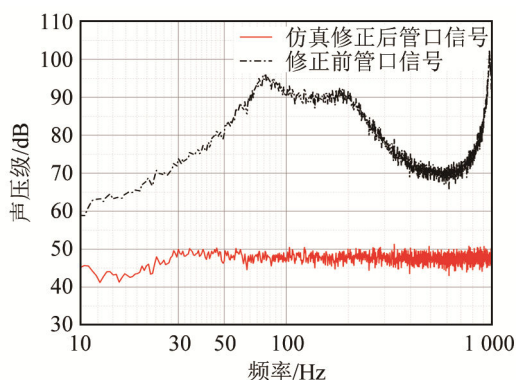


图8 修正前与仿真修正后管口信号频谱
Fig.8 Nozzle signal spectrum before and after simulation correction

为对比本文所提出的修正方法的效果,本文采用维纳滤波方法对管口噪声信号进行仿真修正,并将两者修正后的管口信号频谱进行对比,如图9所示。使用维纳滤波修正后的噪声信号虽然在30~1 000 Hz频率内整体接近水平,与修正前的管口噪声信号相比有所改善,但信号幅值存在 ± 13 dB的波动,无法满足进排气试验的测试需求,而本文所提出的LMS自适应修正方法在30~1 000 Hz频段幅值波动范围为 ± 5 dB,在随机白噪声的幅值允许的

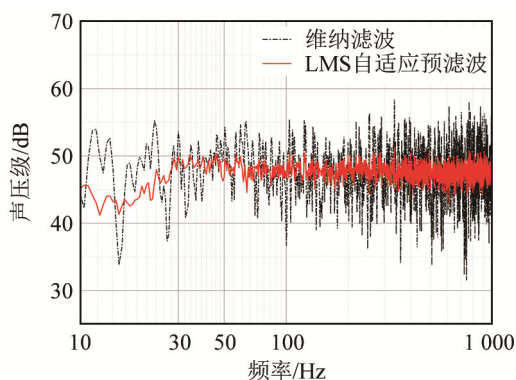


图9 维纳滤波修正和LMS自适应修正后的管口信号频谱对比
Fig.9 Comparison of nozzle signal spectrums with Wiener filter correction and adaptive pre-filtering correction

波动范围之内,达到了传递损失修正的目的,因而 LMS 自适应预滤波方法的修正效果更佳。

2.2 试验验证

为了验证所得到的预滤波器在实际使用情况下的有效性,设计了基于 NI Compact RIO 的组合声源系统修正试验。试验所需设备如表 1 所示。

表 1 测试所需设备
Table 1 Equipment required for testing

设备名称	型号	指标
数据采集系统	SC-XS 12-A	12 通道
传声器	GRAS 46AE	灵敏度 50 mV·Pa ⁻¹
传声器标定器	GRAS 42AG	250/1 000 Hz、94/114 dB
数据采集软件	LMS Test.Lab.17A	采集保存数据
外置声源	丹麦 Scan-speak	5.5 in, 阻抗 8 Ω
功率放大器	SP100 型	输出功率 100 W
NI Compact RIONI9269	Crio9040	4 通道

注: 1 in=2.54 cm。

传递损失补偿装置如图 10 所示,使用 Matlab 软件计算得到的最佳滤波器系数在 LabVIEW 中构建了 FIR 滤波器,用来模拟实际过程中的逆传递路径。输入噪声信号经 FIR 滤波器修正后,将其传输给功率放大器由外置声源发出,再经过过渡管道,实现两个传递路径系统的抵消,达到传递损失补偿的目的。

为防止外界背景噪声和声反射对声音信号造成干扰,本试验在截止频率≤100 Hz、本底噪声≤25 dB、自由声场尺寸为 5.1 m×3.1 m×2.8 m(长×宽×高)的半消声室中进行。对补偿后的管口输出信号频谱特征进行测量,以管口的输出声压级作为组合声源系统频率曲线的评价指标。

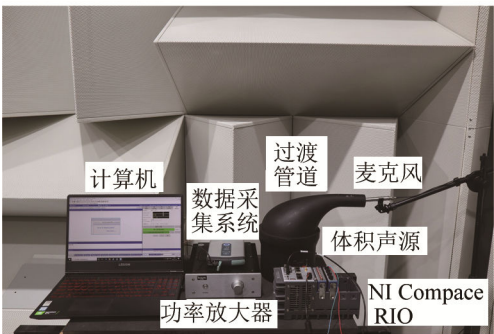


图 10 传递损失补偿的试验装置
Fig.10 Experimental device for transmission loss compensation

3 试验结果与分析

利用随机白噪声作为外置声源激励源,基于

NI Compact RIO 设计了传递损失补偿系统。在试验过程中,修正后的噪声信号经过功率放大器以及过渡管道这些传递路径后到达管口。修正后的输入噪声信号与修正前的管口信号频谱如图 11 所示。由图 11 可以看出,通过硬件系统修正后的噪声信号对原本存在损失的频率段进行补偿,对幅值增强的频率段进行衰减,以保证信号在整个目标频率段内稳定输出。

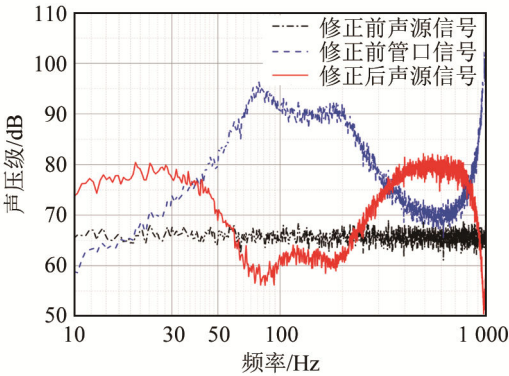


图 11 实测的修正前后声源信号谱与修正前管口信号谱对比
Fig.11 Comparison between the measured sound source signal spectrums before and after correction and the measured nozzle signal spectrum before correction

通过采集修正后的管口噪声信号得到相应噪声频谱,并与修正前管口噪声信号频谱进行对比,结果如图 12 所示,修正后的管口信号在 30~1 000 Hz 频段内输出平稳且幅值在±5 dB 范围内波动,且在 30~50 Hz 频段信号波动在±3 dB 范围内,信号更加稳定,满足进排气噪声试验的要求。

通过将修正后管口信号的频谱与 MATLAB 仿真得到的频谱进行对比,结果如图 13 所示。由图 13 可知在 30~1 000 Hz 目标频段内试验效果与仿真效果相似度较高,证明了本文提出的修正方法的可行性和有效性。

本文中的试验结果和仿真结果相比仍有差异,主要原因在于,本文所使用的声源信号为随机白噪

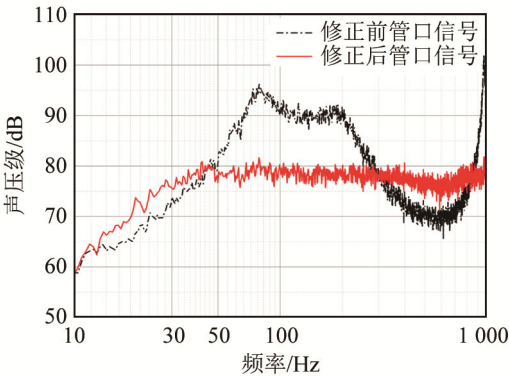


图 12 实测的修正前后管口信号谱对比
Fig.12 Comparison of the measured nozzle signal spectrums before and after correction

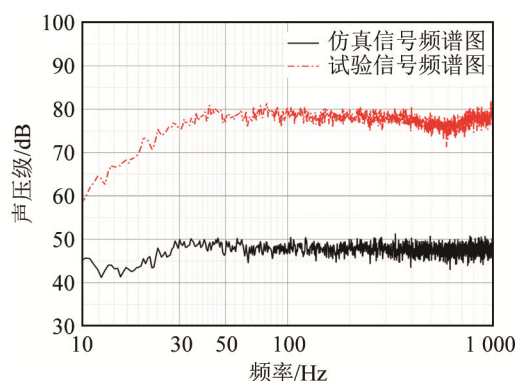


图13 管口噪声信号谱的仿真与试验结果对比
Fig.13 Comparison of simulated and tested nozzle signal spectra

声,同时将采集到声源信号作为目标信号进行拟合得到滤波器系数,仿真使用的是该时刻采集的管口信号,而在试验过程中由于白噪声存在随机性,导致经过滤波器的声源信号无法与之前采集到的声源信号完全一致,因而试验管口结果与仿真结果相比会存在一定差异,但在使用过程中将声源信号替换为稳定的进气、排气噪声信号后,管口信号将处于稳定状态。

4 结论

本文利用模拟进气、排气噪声试验台架对组合声源系统的声学特性进行了研究。由于外置声源引入过渡管道导致系统声阻抗发生变化,组合声源系统的传递过程存在损失。通过使用 LMS 自适应预滤波的修正方法及使用 NI Compact RIO 设计 FIR 数字滤波器对组合声源系统进行声学补偿。得到以下结论:

(1) 原始噪声源通过外置声源系统输出并到达管口的信号无法满足进气、排气噪声的低频要求,且管口噪声信号声压级在不同频段波动较大,而经本文提出的 LMS 自适应补偿方案修正后能够消除过渡管道引起的信号失真,实现了在 30~1 000 Hz 目标频段内稳定输出且满足试验的低频需求。

(2) 与利用维纳滤波对噪声信号进行修正的方法相比,本文中的 LMS 自适应预滤波的修正方法对噪声信号的修正效果更佳,30~1 000 Hz 频段范围内声压级波动为 ± 5 dB,且在 30~50 Hz 频段范围内声压级波动稳定在 ± 3 dB 内,提高了组合声源

系统整体的声学性能和稳定性,得到了满足试验要求的声学信号。

(3) 本文提出的修正方法可消除引入过渡管道所引起的误差损失,基于 NI Compact RIO 设计试验的结果与仿真结果的频率曲线基本吻合,有力证明了本文提出的修正方案的可行性。

参考文献

- [1] 庞剑, 湛刚, 何华. 汽车噪声与振动: 理论与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 385.
- [2] YANG L, CHU Z G, ZHAO D, et al. Analysis and control for the intake noise of a vehicle[J]. *Acoustics Australia*, 2018, **46**(2): 259-267.
- [3] 刘志恩, 黄涛, 邵炯炀, 等. 汽车急加速进气噪声的试验测试与分析[J]. *汽车工程*, 2019, **41**(5): 564-570.
LIU Zhien, HUANG Tao, SHAO Jiongyang, et al. Test and analysis of rapid acceleration intake noise in automobiles[J]. *Automotive Engineering*, 2019, **41**(5): 564-570.
- [4] ZHU P, WANG Z W, QIN Z W, et al. The transfer path analysis method on the use of artificial excitation: numerical and experimental studies[J]. *Applied Acoustics*, 2018, **136**: 102-112.
- [5] PLUNT J. Finding and fixing vehicle NVH problems with transfer path analysis[J]. *Sound & Vibration*, 2005, **39**(11): 12-17.
- [6] ZHU Y W, LU C H, LIU Z E, et al. Simulated operational path analysis method for the separation of intake and exhaust noises[J]. *Acoustics Australia*, 2020, **48**(2): 261-270.
- [7] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 3 版. 南京: 南京大学出版社, 2012: 205-207.
- [8] HO J H, BERKHOFF A P. Flat acoustic sources with frequency response correction based on feedback and feed-forward distributed control[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2015, **137**(4): 2080-2088.
- [9] 谢丽萍, 卢焱华, 刘志恩, 等. 组合声源测试消声器传递损失的噪声信号修正方法[J]. *声学技术*, 2019, **38**(4): 440-445.
XIE Liping, LU Chihua, LIU Zhien, et al. A noise signal correction method for muffler transmission loss measurement with combined sound source[J]. *Technical Acoustics*, 2019, **38**(4): 440-445.
- [10] LE Y, SHEN Y, XIA J. Calculation of loudspeaker cabinet diffraction and correction[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, **28**(10): 104303.
- [11] 章康宁. 非理想条件下扬声器阵列声聚焦鲁棒性研究[D]. 南京: 南京大学, 2019: 1-52.
- [12] 马登永, 柴国强, 周建明, 等. 基于自适应预滤波的扬声器系统频响均衡方法[J]. *电声技术*, 2014, **38**(10): 16-18, 29.
MA Dengyong, CHAI Guoqiang, ZHOU Jianming, et al. Equalization method and implementation of loudspeaker system based on adaptive pre-filtering algorithm[J]. *Audio Engineering*, 2014, **38**(10): 16-18, 29.
- [13] NELSON P A, HAMADA H, ELLIOTT S J. Adaptive inverse filters for stereophonic sound reproduction[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992, **40**(7): 1621-1632.
- [14] 崔晓杰. 维纳滤波的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2006: 1-48.