

组合声源测试消声器传递损失的噪声信号修正方法

谢丽萍¹, 卢焯华¹, 刘志恩^{1,2}, 付友明¹, 朱亚伟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: 针对某些传递损失较大的消声器, 现有白噪声测试设备的单一噪声源发生器无法满足消声量的测试需求。通过采用低频和中频两种声源发生器, 利用过渡管道与测试管道垂直连接的方式, 实现了两种声源组合发声对消声器声学性能的测试。为了解决过渡管道与组合声源系统连接处声阻抗变化, 导致输出的噪声信号频谱特性随机波动的问题, 提出了一种噪声信号的修正方法。该方法基于四传感器法测量过渡管道声阻抗, 根据过渡管道传递矩阵, 以随机白噪声为激励源输出的管口噪声作为输出声压信号, 得到组合声源系统的输入声压信号, 实现了对组合声源系统声音信号的补偿。实验结果表明, 与传统均衡器调节方法相比, 该方法能够在较宽的测试频率范围内输出平稳的声压信号; 其次, 利用修正前后的声学信号对扩张腔的传递损失进行测量, 修正后得到的测试曲线与理论值吻合度较高, 证明了该方法的可行性。

关键词: 噪声源; 传递损失; 声阻抗; 传递矩阵; 声音信号补偿

中图分类号: TB535⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-04-0440-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.04.014

A noise signal correction method for muffler transmission loss measurement with combined sound source

XIE Li-ping¹, LU Chi-hua¹, LIU Zhi-en^{1,2}, FU You-ming¹, ZHU Ya-wei¹

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

Abstract: For some mufflers with high transmission loss, the single noise source generator of existing white noise test equipment cannot meet the test requirements of the noise reduction amount. In this paper, the acoustic performance of muffler is tested by the combination of low frequency and medium frequency noise generators and the vertical connection between the transition pipe and the test pipe. In order to solve the problem of random fluctuation of the spectral characteristics of output noise signal, which is caused by the change of acoustic impedance at the junction of the transition pipeline and the combined sound source system, a correction method for combining noise signals is proposed. This method is based on the four-sensor method to measure the acoustic impedance of the transition pipeline. According to the transfer matrix of transition pipeline, the noise at the pipe orifice, which is the output of a random white noise excitation source, is used as the output sound pressure signal to obtain the input sound pressure signal of the combined sound source system and realize the sound signal compensation of the system. The experimental results show that compared with the traditional equalizer adjustment method, this method can achieve a stable sound pressure signal output in a wide range of test frequencies and the noise signal obtained meets the test requirements. Secondly, the acoustic signal before and after the correction is used to measure the transmission loss of the expansion cavity. The measured curve after correction is in good agreement with the theoretical one, which proves the feasibility of this method.

Key words: noise source; transmission loss; acoustic impedance; transfer matrix; sound signal compensation

0 引 言

声源系统作为消声器声学性能试验装置的主

要激励源, 是保证测试数据准确性的基础。在试验中, 声源系统除了要保证良好的密封性和较低的环境噪声外, 还应该具有良好的声学特性, 例如较好的频率响应、较高的信噪比、较宽的测试频段和保持线性时不变系统的能力等。因此, 设计满足声学性能要求并保证在较宽频带范围内都有稳定声压信号输出的声源系统对测试准确性至关重要。针对传递损失较大的消声器, 测量其声学性能时, 需选用功率较大的声源。为了解决传统消声器声学性能测试台架选用单一噪声源发生器, 输出的声学信号

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-03-29

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0700704B) 国家自然科学基金(51575410)

作者简介: 谢丽萍(1994—), 女, 福建龙岩人, 硕士, 研究方向为整车 NVH 噪声与振动控制。

通讯作者: 刘志恩, E-mail: lzen@whut.edu.cn

无法满足宽频带、高声压级要求的问题,可采用不同类型的扬声器组合声源系统进行测量的方式,但其体积较大,需采用过渡管道与测试管道连接。不同结构设计的过渡管道与声源系统组合,形成的声阻抗发生变化,对输出的声学信号造成干扰,使得最终输出的噪声信号频谱特性随机波动,无法保证测量数据的精准性。为了尽可能地让组合声源系统输出的声源信号在较宽频带内具有均匀的能量分布,必须对声源的输入信号进行修正。

目前国内外对消声器声学性能测试台架的声源系统多采用单一噪声源发生器,对于不同工况下,噪声干扰和修正的研究并无详细文献研究。HOLLANDD 等^[1-2]在传递函数法的基础上采用了“正弦扫频激励”,克服了使用随机白噪声因管道突变所造成信噪比较差的问题和声波在传播过程中出现非线性的影响,但需分频段激励,过程繁琐。LUNG 等^[3]设计了“Y”形结构的单旁边支声源系统并以快速正弦扫频信号作为激励,实现了在有流条件下,以时间平均瞬时测试技术计算消声器的传递矩阵,但因其单一类型声源的特性,其测试频率局限于 1 000 Hz。JOHNSTON 等^[4]将测试管道与高保真扬声器直接相连作为声源系统,以离散频率信号作为激励源研究穿孔消声器的声学性能,达到降低激励信号的失真程度的目的。但因管壁的穿孔结构,在高速气流工况下,产生较大的气流噪声,导致较差的信噪比。重庆大学李政^[5]在对消声器综合性能试验台架设计时,利用低、中频扬声器组合的方式,并通过高阶参数均衡算法,对输出的声信号进行均衡处理,基本满足了台架对声音信号的要求,但需进行分频段滤波。东北大学范文博^[6]为研究插入管抗性消声器在有流、高温工况下的消声性能,搭建了消声器综合性能试验台架,利用噪声发生器激发相应频率的噪声,再经过功率放大器驱动扬声器产生模拟噪声源。为保证信号尽可能无衰减地传输到测试管道,设计两个扬声器对称固定在主管道的两侧,可产生均匀声场,减小气流再生噪声的影响,降低测量误差。

本文在设计高温、有流工况下的消声器试验台架过程中,为避免在有流工况下,风机所引起的宽频带阶次噪声对管道声学信号的影响和保证声源信号声压级满足测试要求,根据扬声器的声学性能,采用低、中频扬声器组合声源的形式。低频扬声器体积较大,需采用过渡锥管与中频扬声器相连,再利用过渡直管与测试管道垂直连接。为解决过渡管道所引起的声阻抗变化导致最终输入到测试管道的声学信号受到干扰的问题,运用四传感器法测量

管道声阻抗,根据管道的传递矩阵,以随机白噪声为激励源输出的管口噪声作为输出声压信号,提取组合声源系统的输入声压信号,对声源组合系统进行声音信号补偿。该方法有效地消除了过渡管道布置方式对声信号的衰减和信号之间的相互干扰,最终得到了理想的噪声信号。

1 消声器声学性能测试台架结构

图1为本文设计的消声器声学性能测试台架示意图,试验台架由风机1、加热器2、前消声器3、传声器6、阻抗管7、待测消声器8、吸声末端9等组成。为满足高精度声学测试试验的要求,在经过合理的过渡管道设计后^[5],根据低频扬声器4和中频扬声器5不同的声学特性,将其组合作为台架的声源系统。

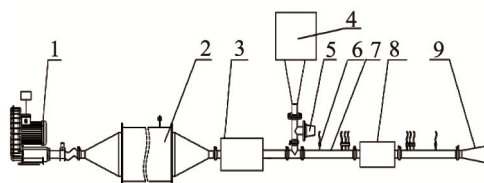


图1 消声器声学性能测试台架
Fig.1 Acoustic performance test bench of muffler

不同管道设计的声源系统的声学特性差别很大,直通式和旁支式声源是消声器性能测试台架常用的声源布置形式^[7]。本文设计的组合声源系统采用过渡锥管将体积较大的低频扬声器和中频扬声器相连。旁支式声源结构简单,传声损失曲线变化平稳,传声效果优于直通式声源,故选用旁支式声源的布置形式,将组合声源系统通过直管垂直布置在测试管道。为保证组合声源系统在指定频率范围内提供频谱特性稳定的声学信号,通过阻抗管,利用四传感器法测量组合声源系统中过渡管道的声阻抗。阻抗是系统的固有属性,在给定理想输出声压信号的情况下,利用过渡管道传递矩阵提取声源系统对应的输入声压信号,再利用 MATLAB 软件编写的程序,将得到声压通过快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)转化为相应的音频信号,以此作为声源组合系统的噪声信号,达到声音信号补偿修正的目的,最终实现噪声信号在全频段内平稳波动。

2 噪声信号修正理论模型

2.1 高阶参数均衡器算法

组合声源系统对声音信号造成的非线性影响

可通过设计高阶参数均衡器来修改信号中的特定频率成分占比。巴特沃斯滤波器在其通带和阻带都有平坦的幅度响应,因此在对声学信号进行修正时,常以其为首选原型设计高阶参数均衡器。其原型滤波器可由式(1)的幅度平方函数来描述:

$$|H_d(e^{j\Omega})|^2 = \frac{1}{1 + (\frac{\Omega}{\Omega_c})^{2N}} \quad (1)$$

其中, Ω 为模拟角频率, Ω_c 为衰减量 3 dB 时的截止频率, 单位为 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; N 为滤波器的阶数。

根据待修正的声学信号频谱的陡峭程度, 合理设计高阶均衡器参数。利用双线性变换法^[8], 实现模拟滤波器到数字滤波器的转换, 最终达到声源信号在全频段内平稳波动的效果。

2.2 传递函数法提取声阻抗理论

四传感器声波分解法测量管道声学特性提高了测量数据的频带范围内的频率响应和准确性^[8]。图 2 为试验装置示意图。

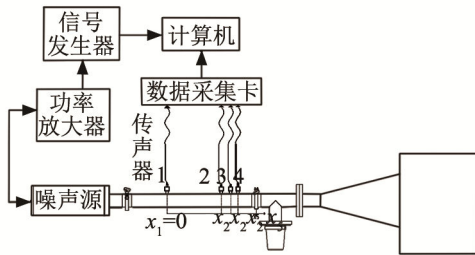


图 2 试验装置示意图
Fig.2 Diagram of the test device

传递函数能够降低记录信号中的随机流噪声, 因此本文基于传递函数测量声源组合系统的声阻抗, 给定截面的声阻抗定义为

$$\frac{Z(x, f)}{Z_0(x, f)} = \frac{1 + R_0(x, f)}{1 - R_0(x, f)} \quad (2)$$

式中, $Z_0(x, f)$ 为管道内的特性阻抗, $R_0(x, f)$ 为给定截面处的反射系数, 可由传递函数法^[9]求得。

2.3 基于管道传递矩阵补偿声源信号

由 2.2 节所述, 利用四传感器法可求得图 2 中参考截面传感器 1 处的声阻抗 $Z(x, f)$, 再利用阻抗转移公式^[10]求得负载端的声阻抗 $Z_l(x, f)$ 。根据所求得的声阻抗, 在利用管道传递矩阵反推出声源输入声压信号, 前提要求出整个管道系统传递矩阵的四级参数。

本文中, 所使用的是等截面管道, 在不考虑由于气体和刚性壁面间摩擦引起的声能损耗的情况下, 等截面直管道的四级参数可表示为

$$T = \begin{bmatrix} \cos(kl) & j(c/S)\sin(kl) \\ j(S/c)\sin(kl) & \cos(kl) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, k 为波数, l 为参考点和负载截面处的距离, c 为声速, S 为管道截面面积。

本文声源补偿试验装置是利用等截面过渡管道将测试管道和组合声源系统连接起来, 忽略直管长度对测量阻抗精度的影响, 以声源组合系统作为输入端, 管口噪声作为输出端, 整个连接结构可当作等截面管道系统, 可直接利用式(3)进行声源补偿, 其表达式为

$$\begin{bmatrix} P_l \\ P_l \\ Z_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_r \\ P_r \\ Z_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, P_r 为管口经过傅里叶变换后的理想输出声压, 可以以随机白噪声输出的管口噪声为参考。 Z_r 为直管管口辐射声阻抗, 可由经验公式求得^[11]。 P_l 可由此传递矩阵求得, 作为声源组合系统的输入声压。 Z_l 为利用传递函数法求得的声源组合系统的声阻抗。其中 A 、 B 、 C 、 D 是等截面管道的四级参数。

利用声学软件 LMS Virtual.lab 进行模拟仿真, 获取管口噪声, 以随机白噪声作为激励信号, 由传声器拾取管口声压信号, 作为理想输出声压信号, 根据式(4)的传递矩阵求得待补偿声源系统的输入声压信号 P_l , 最后通过 MATLAB 软件编写的程序将获得的声压信号进行逆傅里叶变换变成时域信号, 最终存储为噪声音频文件, 以此作为声源组合系统的噪声源, 消除组合声源系统的阻抗发生变化对声信号造成的影响。

3 试验设计

3.1 声阻抗提取试验

根据 2.3 节理论分析设计试验方案, 运用四传感器法在阻抗管试验台架上提取声源组合系统的阻抗, 图 3 为管道阻抗提取试验装置示意图, 试验所需设备如表 1 所示。

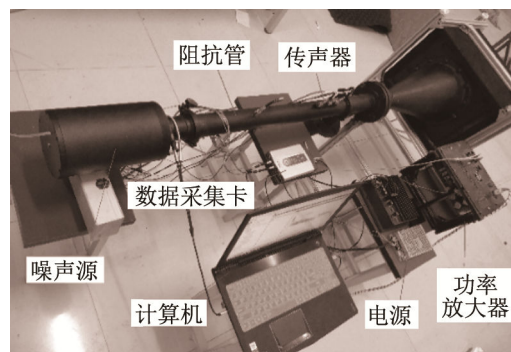


图 3 管道声阻抗提取试验装置
Fig.3 Pipe impedance test device

表 1 试验所需设备
Table 1 Equipment required for testing

序号	仪器名称	规格型号	主要参数
1	传声器	PCB130A23	灵敏度 10.5~13.4mV·Pa ⁻¹
2	扬声器	MarkAudio 声源	4 寸 8 Ω, 20~30 W
3	功率放大器	SA-36A pro	输出功率: 20 W
4	噪声测试仪	LMS SCADAS Mobile	12 通道数据 采集卡
5	传声器标定器	红声电子 HS6020A	声压级: 94~114 dB
6	数据采集软件	LMS.TEST.LAB	14.0 版本

为避免背景噪声对试验数据的干扰，噪声信号至少比背景噪声大 10 dB 以上。扬声器与阻抗管相连，可能引起管中空气柱共振，导致声压振幅出现波动。为避免此类情况发生，在扬声器壁面添加吸音棉，以保证试验数据的准确性。传声器间的相位失配和间距所引起的微小相位误差会导致测量的结果不准确。因此，必须对传声器进行校准，可利用“互换传声器法”进行校准^[12]。经过一系列试验准备后，由传声器测量得到各测点处的声压，然后基于 2.1 节中所述的传递函数法，利用 MATLAB 软件处理得到声源组合系统的声阻抗 Z_l ，最后即可基于 2.2 节中所述的传递矩阵法计算得到待补偿声源系统的输入声压信号 P_i ，并将其存储为噪声信号音频文件。

3.2 声源组合系统直管输出性能测试

在对组合声源系统进行声补偿之后，还需要对其输出信号的频谱特性进行检测。以管口的输出声压级作为声源组合系统频响曲线的评价指标，将修正前后的噪声信号输入组合声源系统，采集管口噪声并进行频谱分析。最后，为了检验修正前后的声学信号对消声器测量精度的影响，分别用均衡器算法和本文设计的声阻抗修正声学信号的方法得到噪声源来作为激励源对扩张腔进行传递损失测试，管口噪声测试和消声器传递损失测量装置如图 4 和图 5 所示。

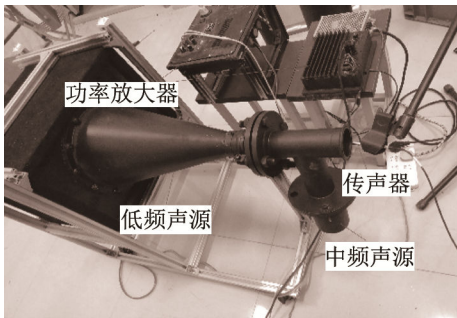


图 4 管口噪声测试装置
Fig.4 Noise measurement device at the pipe orifice

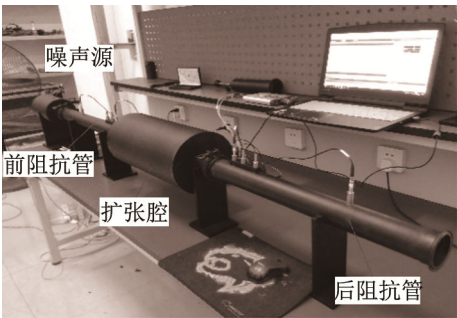


图 5 消声器传递损失测试台架
Fig.5 Muffler transmission loss test bench

4 试验结果及分析

4.1 声源输出信号修正效果

利用随机白噪声作为测试台架的激励源，输入未经修正的组合声源系统，采集管口的噪声信号，所得的噪声频谱特性如图 6 所示。由图 6 可知，未经修正的组合声源系统因过渡管道的阻抗变化，反射波对组合信号产生了干扰，导致输出的声信号的频谱特性不均匀，其声压级随频率的波动较大，频响曲线的起伏较大，对于消声量较大的消声元件，将无法基本满足试验要求，必须对声源组合系统进行修正，得到满足试验要求的理想噪声信号。

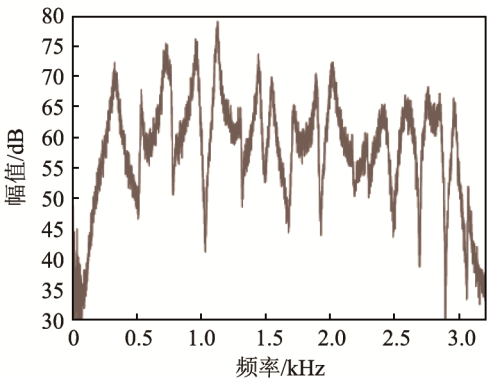


图 6 未经修正的管口噪声信号
Fig.6 Uncorrected pipe noise signal

为突出本文提出基于声阻抗修正声学信号方法的高效性，本文利用 MATLAB 中的 FDATool 工具箱设计高阶参数均衡器^[13]对声源信号进行修正，与利用四传感器提取声源阻抗和管道传递矩阵对声信号修正进行对比，两者修正后得出的管口噪声频谱图和频谱图分别如图 7 和图 8 所示。

由以上分析结果可知，利用高阶参数均衡器对组合声源信号进行调节后，在测试频段范围内管口整体声压级波动较为平坦。低、中频信号同时输出时，管口的声压级曲线在 50~2 500 Hz 频率范围内存在着±10 dB 的波动，在 2 500~3 200 Hz 频率范

围内, 声压级浮动较大, 但基本能满足测试试验要求, 调节过程中需分段调节, 操作繁琐。相比传统高阶参数均衡器调节, 利用四传感器提取声源系统的表面阻抗, 根据式(4)传递矩阵求得噪声源, 对最终声学信号补偿的效果明显更优, 修正后得到的管口噪声在整个测试频率范围内波动平稳, 功率分布均匀, 达到了声源修正的目的, 输出的声信号符合试验要求。

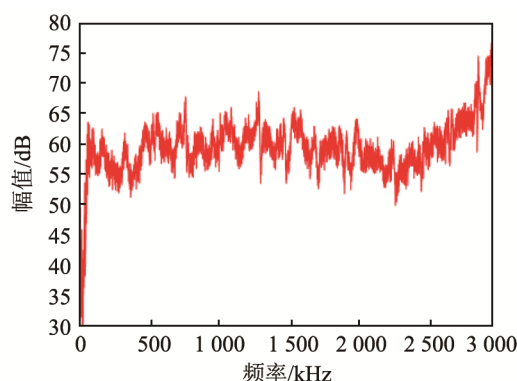


图7 参数均衡器修正后的管口噪声信号
Fig.7 Pipe signal corrected by parameter equalizer

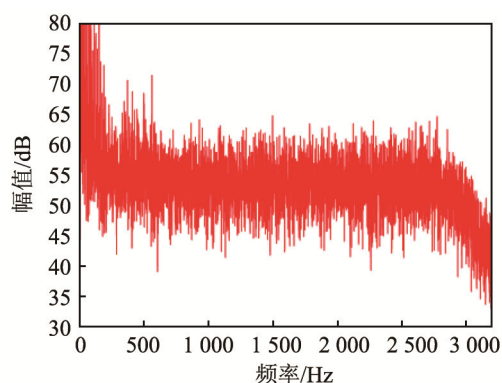


图8 利用声阻抗修正后的管口信号
Fig.8 Pipe signal corrected by using acoustic impedance

4.2 消声器传递损失测量结果

在消声器试验台架上分别用修正前后的声信号作为激励源对扩张腔进行传递损失测试^[14], 试验结果如图9、10所示。

从图9、10中可知, 以未经修正的声学信号作为消声器声学性能测试的激励源, 最终得到的传递损失曲线出现非周期性震荡, 与理论值相差较大, 无法准确预测扩张腔的消声量, 对后期消声器设计无法提供相应的数据指导。利用高阶参数均衡器和管道声阻抗对组合声源系统的声学信号进行修正, 得到的传递损失曲线与理论值吻合, 消除了由阻抗变化所引起的误差。对比传递损失误差曲线如图11所示。

与传统的高阶参数均衡调节相比, 当未对组合

声源系统进行修正时, 传递损失误差出现大幅度波动, 利用高阶均衡器算法和本文提出的修正方法补偿声源, 误差减小、波动平稳, 且本文提出的修正方法效果更优, 全频段误差较小, 可忽略不计, 证明了该修正方法的可行性。

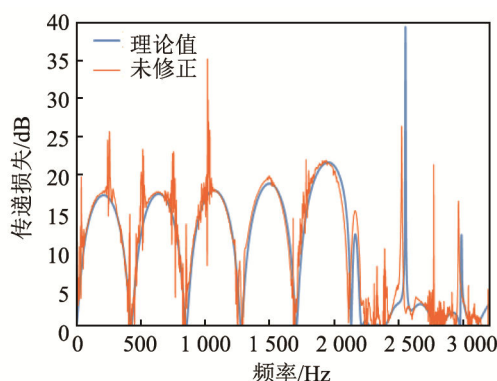


图9 未修正信号测量的扩张腔传递损失
Fig.9 The transmission loss of expansion muffler measured by uncorrected signal

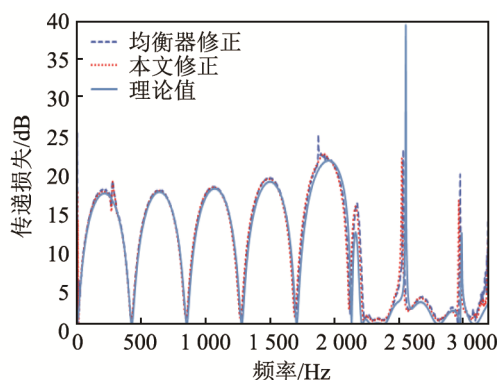


图10 信号修正后测量的扩张腔传递损失
Fig.10 The transmission loss of expansion muffler measured by corrected signal

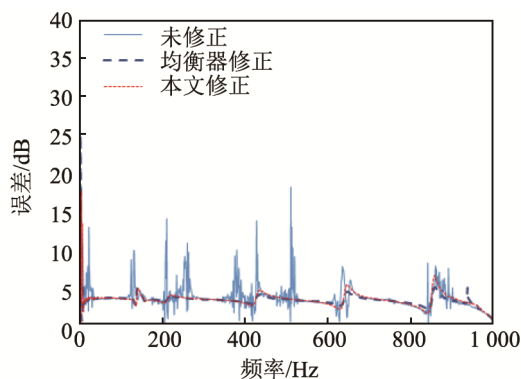


图11 不同信号测量传递损失的误差曲线
Fig.11 Error curves of measuring transmission loss by different signals

5 结 论

本文利用消声器声学性能试验台架对声源系

统的声学特性进行了研究。根据各类扬声器声学特性,按照测试试验台架的需求,选定了低频扬声器和中频扬声器组合而成的声源系统,利用过渡管道与测试管道垂直连接的方式,导致组合后的声源系统的声学特性发生了变化。运用四传感器法测量管道声阻抗,再根据管道传递矩阵对声源组合系统进行声学补偿。得到以下结论:

(1) 单一噪声源发生器,输出的声学信号无法满足宽频带、高声压级要求,本文设计的组合声源系统能实现较宽的测试的频率范围,满足基本的试验测试需求。

(2) 与利用高阶参数均衡器算法对声源信号进行均衡处理相比,本文中利用四传感器提取声源系统的声阻抗,根据管道传递矩阵对声源信号进行补偿的效果更优,使得最终输出的噪声信号在全频段波动平稳,消除了因过渡管道阻抗突变引起的管道声学特性改变的影响,得到满足试验要求的声学信号。

(3) 本文提出的修正算法可消除因过渡管道所引起的误差,以修正后的声源信号作为消声器试验台架的激励源,进行扩张腔的消声性能试验,得出的传递损失曲线与理论值吻合,误差值较小,证明了本文提出的修正方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] HOLLAND K R, DAVIES P O A L. The measurement of sound power flux in flow ducts[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, **230**(4): 915-932.
- [2] HOLLAND K R, DAVIES P O A L, DANIE C W. Sound power flux measurements in strongly exited ducts with flow[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2002, **112**(6): 2863-2871.
- [3] LUNG T Y. A time-averaging transient testing method for acoustic properties of piping systems and mufflers with flow[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1983, **73**(3): 867.
- [4] JOHNSTON J P, SCHMIDT W E. Measurement of acoustic reflection from an obstruction in a pipe with flow[J]. *Acoustical Society of America*, 1977.
- [5] 李政. 消声器综合性能实验台声学设计研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
LI Zheng. Acoustic design and research of muffler comprehensive performance test bench[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [6] 范文博. 考虑气流与温度影响的插入管型抗性消声器消声性能及试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
FAN Wenbo. Silencer performance and experimental study of inserted tubular resistant muffler considering the influence of airflow and temperature[D]. Shenyang: Northeast University, 2012.
- [7] 杨成. 高温高速下的消声器性能模拟试验台关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
YANG Cheng. Research on key technology of muffler performance simulation test bed under high temperature and high speed[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [8] 张登奇, 彭鑫, 陈海兰. 双线性变换法在 IIR 滤波器设计中的应用[J]. *湖南理工学院学报(自然科学版)*, 2016, **29**(3): 21-25.
ZHANG Dengqi, PENG Xin, CHEN Hailan. Application of bilinear transformation method in IIR filter design[J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, **29**(3): 21-25.
- [9] JANG S H, IH J G. On the multiple microphone method for measuring in-duct acoustic properties in the presence of mean flow[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, **103**(3): 1520-1526.
- [10] TIIOKA H, LAVRENTJEVM J, RÄMMAL H, et al. Experimental investigations of sound reflection from hot and subsonic flow duct termination[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, **333**(3): 788-800.
- [11] DAVIES P O A L, BENTO C J L, BHATTACHAYA M. Reflection coefficients for an unflanged pipe with flow[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1980, **72**(4): 543-546.
- [12] CHUNG J Y, BLASER D A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II: Experiment[J]. *J. Soc. Acoust. Am.*, 1980, **68**(3): 914-921.
- [13] 吴礼仲. 音频均衡器算法研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
WU Lizhong. Research and implementation of audio equalizer algorithm[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2010.
- [14] 王荀. 管道消声器声学性能仿真与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
WANG Xun. Simulation and experimental research on acoustic performance of pipe muffler[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.