

文章编号: 1000-8055(2008)01-0070-05

现场测量管道声衬声阻抗的双传声器法实验研究

王光发, 景晓东, 孙晓峰

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 对现场测量管道声衬声阻抗的双传声器法进行了研究. 为解决实用声衬蜂窝单元尺寸过小, 无法直接嵌入常用传声器的难题, 采用了探针传声器技术, 通过外径 1.5 mm 的细管引出不易直接测量的声衬表面和背腔内声压信号, 并设计了校准方法以确保测量精度. 进而, 在管内声场具有多重模态和声波斜入射的条件下, 应用双传声器法测量了实用蜂窝夹层声衬的声阻抗, 并与标准阻抗管的测量数据和一种理论预测模型进行了对比, 结果符合良好, 从而验证了本方法及测量装置的可靠性.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 声衬; 声阻抗测量; 双传声器法; 探针传声器

中图分类号: V211. 71

文献标识码: A

An experimental investigation of two-microphone method for in situ measurement of the acoustic impedance of a duct liner

WANG Guang-fa, JING Xiao-dong, SUN Xiao-feng

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The two-microphone method is investigated for the objective of in situ measuring the impedance of an acoustic liner in a duct. In order to avoid the influence caused by directly inserting the comparatively large microphones into a practical acoustic liner typically consisted of small honeycomb cells, the probe tubes as small as 1.5 mm in diameter are used to conduct the sound pressure at the liner surface and that at the back plate to the microphones. A calibration method is designed to ensure high measurement accuracy of the thus-formed probe microphones. By the use of the two-microphone method, the acoustic impedance of a honeycomb-structure acoustic liner is measured when exposed to the sound waves at oblique incidences inside a duct. The measurement result is compared with the data obtained on a standard impedance tube and the prediction of an existing impedance model. The reliability of the present two-microphone method is validated by the good agreement between the different results.

Key words: aerospace propulsion system; acoustic liner; acoustic impedance measurement; two-microphone method; probe microphone

声衬技术在包括航空发动机在内的各种流体机械的噪声控制工程中有着广泛的需求, 而其成功应用的关键环节之一在于准确地获取声衬的声

阻抗. 鉴于目前在复杂实际条件下声衬性能的预测理论尚不完善, 因此可靠的声阻抗测量方法在发展经验性声阻抗模型上, 进而在声衬设计中都

收稿日期: 2006-12-11; **修订日期:** 2007-03-15

基金项目: 全国优秀博士论文作者专项基金(200249); 国家自然科学基金(10302003)

作者简介: 王光发(1979-), 男, 陕西靖边人, 硕士, 主要从事振动、声学专业方向研究, 现工作于北京长城计量测试技术研究所;

E-mail: fage0@126.com.

占有十分重要的地位。

通常的声阻抗测量方法,如阻抗管法和混响室法,都针对于理想条件下的声衬试样,很难对管道内敷设的声衬进行实际条件下的现场测量。为了解决这个难题,Dean^[1]提出了一种双传声器法;由于其所具有的优点和重要应用价值,相关研究从上世纪 70 年代至今一直都在不断地开展和深入,国内如谷嘉锦和张强^[2]的工作,在国际上这种技术近年来受到“空中客车”等国际著名民用飞机制造公司和研究机构的重视^[3]。

双传声器法在原理上需要提取声衬面板和背板处的声压信号。然而,实用蜂窝夹层声衬的结构单元通常很小,只有几毫米的宽度;因此,如果把直径不小于 3.175 mm 的常用传声器直接嵌入声衬内部进行测量,同时又不明显破坏声衬本身结构和性能,所面临的困难是显而易见的。一种解决途径是利用探针传声器,通过细管引出不易直接测到的声压信号^[4]。对于这种方法来讲,由于加装探针后传声器响应已经大大改变,所以必需精心设计校准方法才能保证测量精度。

本文初步研究了双传声器法现场测量管道声衬的技术,设计了包括探针传声器在内的实验装置,发展了测试方法;进而在管道内存在多重模态和声波斜入射的条件下,对实用蜂窝夹层声衬进行了测量,并对获得的声阻抗结果进行了分析和讨论。

1 双传声器法基本原理

图 1 所示是穿孔板声衬的一个结构单元,当波长远大于空腔的横截面尺寸时,共振腔内声传播是一维的。若已知面板和背板两处的声压 p_A 和 p_B ,以及它们的相位差 ϕ ,则由一维波导管理论容易推导出声衬表面的无量纲特性声阻抗为

$$Z = \frac{p_A (\sin \phi - j \cos \phi)}{p_B \sin ky} \quad (1)$$

或者声阻和声抗分别为

$$R = \operatorname{Re}(Z) = \frac{p_A \sin \phi}{p_B \sin ky} \quad (2)$$

$$X = \operatorname{Im}(Z) = \frac{p_A \cos \phi}{p_B \sin ky} \quad (3)$$

其中 y 为腔深, $k = 2\pi f/c$ 是由频率 f 和声速 c 确定的波数。

2 测量装置和测试方法

2.1 测量装置

从原理来看,该方法需要测量出声衬面板和

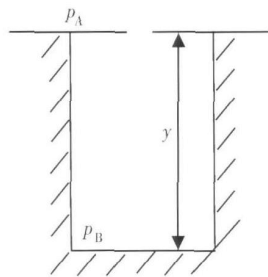


图 1 穿孔板声衬结构单元示意图

Fig. 1 A cell structure of an acoustic liner

背板两处的声压信号。为了尽可能小地破坏声衬本身结构,从而保证测量精度,如图 2 所示,本实验装置通过外径只有 1.5 mm 的细探针把面板和背板处的声压引出后,再用传声器进行测量。本测量装置的一个特点是,具有一个把两个探针连接在一起的整体传声器安装座,其中较短的、与背板传声器连接的探针实际上是在安装座内部加工出来的细管,较长的探针穿过蜂窝单元内部和面板,并探出声衬表面一小段距离。应用双传声器法时,声衬表面声压的测点必须接近于面板,距离要远小于波长,否则测量会受到不相关管道壁面的影响;但同时,距离又不能太近,以避免声衬小孔的近场效应。为了便于调节合适的距离,面板传声器及探针与安装座内的螺杆连接,这样通过改变螺纹旋入深度就可以调节探针测点在声衬面板上方距离。这种移动探针的方式还适合于测量不同腔深的声衬。这样设计的实验装置不仅能够完全满足双传声器法的测量需要,而且具有结构紧凑小巧,方便安装和使用的优点。

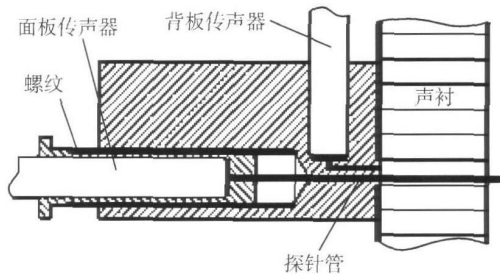


图 2 双探针传声器安装座

Fig. 2 Port for installing the two probe microphones

2.2 探针传声器的校准

加探针后,传声器感受的声压并不是探针管口即测点处的值,因此必需进行严格的校准,才能保证高的测量精度。根据波导管理论,在圆管中声波在高阶模态截止频率以下以平面波形式传播,

因而在同一管道横截面上具有相同的幅值和相位. 根据这样的原理,如图 3 所示,将一个基准传声器和探针传声器同时置于一圆管的顶端面上,比较两者的测量值即可达到校准目的. 本文校准装置中管直径 32 mm,高阶模态截止频率为 6 280 Hz,这也是校准频率的上限. 图 4 为实验得到的校准曲线,两个传声器的幅值校准曲线在一些频率处会出现尖峰,这是由于探针内驻波引起的,总得来看校准曲线比较光滑. 这组校准曲线的可靠性将在后面的验证实验中得到检验.

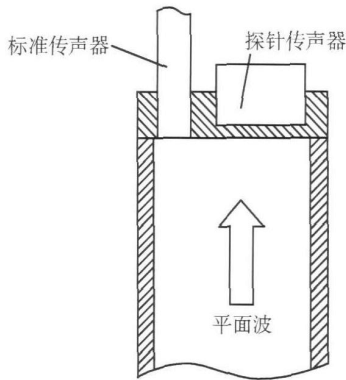


图 3 探针传声器校准装置

Fig. 3 Calibration device for the probe microphone

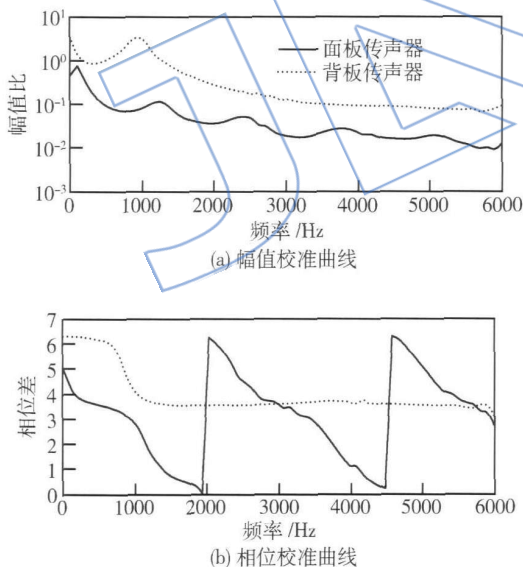


图 4 探针传声器校准曲线

Fig. 4 Calibration curves of the probe microphones,

2.3 测量系统

如图 5 所示,本文实验测量装置和仪器包括被测声衬、自行设计的探针传声器(含国产 CH-33 传声器)、中科院声学所生产的高声强扬声器、SONEG SS-2600 型功率放大器、NF-PCI-6251 数

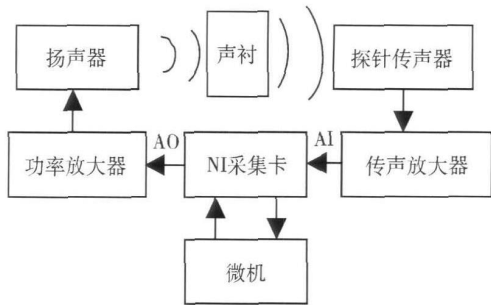


图 5 测量系统组成图

Fig. 5 Components of the testing system

据采集卡和用于数据采集和处理的微机. 软件程序是在 Labview 环境下自行编制的,集校准和测量于一体,包括信号发生模块、数据采集模块和数据处理模块等几个组成部分.

声源信号采用多谐波叠加的周期信号,起始频率为 100 Hz,最高频率为 10 kHz,频率间隔为 100 Hz. 由于探针对于高频信号的衰减比较严重,为了克服这个缺点,提高高频信噪比,每个谐波组分的幅值随频率以指数关系增大,从 100 Hz 到 10 kHz 信号幅值增加 40 dB. 实验中的数据采样率为 100 kHz,采集时长 500 ms.

将测量得到的面板和背板声压代入公式(1)中即可得到声衬声阻抗,这一环节也由程序自动完成,并将计算结果直接显示在图形窗口中.

3 声衬测量实验与结果分析

3.1 共振腔测量的验证实验

本文首先以图 6 所示的刚性壁共振腔作为标准试样进行验证实验. 设腔深为 L ,那么共振腔的声阻抗 Z_c 由下面的解析解给出

$$Z_c = -j \cot(kL) \tag{4}$$

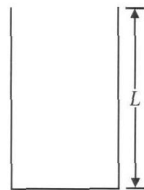


图 6 刚性壁共振腔

Fig. 6 Illustration of a hard-wall cavity

实验中共振腔取自于校准装置,这时把基准传声器拿走,而只在端面处安装双探针传声器装置,且将面板探针伸入校准管内一定距离,这个距离也就是腔深. 图 7 是腔深 67 mm 的共振腔声阻抗测

量值与理论值的对比曲线。根据公式(4),共振腔声抗随频率变化关系具有周期性,且周期为 $f_T = c/(2L) = 2\,559.7\text{ Hz}$ 。图 7 的结果显示声抗的理论值和实验值符合得相当好,即使在共振频率,即 $f = nf_T (n = 0, 1, 2, \cdots)$ 附近,理论上声抗趋于无限大的地方,测量值和理论值仍能较好地符合。另外,公式(4)表明共振腔声阻为零,而图 7 的结果也表明实测声阻很小,基本接近于零,但是由于数据处理时声阻和声抗的计算是相关联的,在共振频率附近,受到大声抗值的影响,相应地声阻实验点也出现较大的值,这种结果是合理的。所以,验证实验充分表明本实验装置和校准方法的合理性和可靠性。

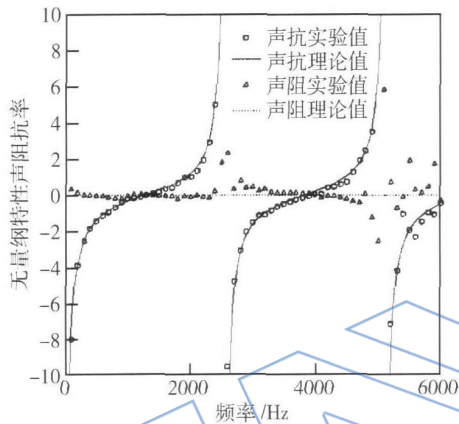


图 7 腔深 67 mm 的共振腔声阻抗测量值与理论值的比较
Fig. 7 Comparison between the measured acoustic impedance and Eq. (4) for a hard-wall cavity of 67 mm depth

3.2 管道声衬的现场测量实验

管道声衬的现场测量是在北航流体与声学工程实验室的流管实验台上完成的,如图 8 所示,该流管实验台的实验段是截面为 120 mm × 50 mm 的矩形管道,上游周向对称布置 4 个高声强扬声器,声衬固定在实验段,其穿孔板表面与流管内壁齐平。所设计的双传声器测量装置固定在声衬背板上。

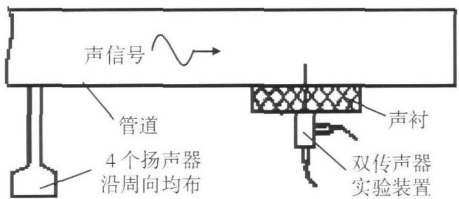


图 8 管道声衬测量装置示意图
Fig. 8 Schematic of the experimental setup for the in-situ measurement of the duct liner

本文所测量的铝制蜂窝夹层声衬结构如图 9 所示,其几何参数为:穿孔板厚度 0.5 mm,孔直径 2 mm,穿孔率 7%,背腔深度 34 mm;蜂窝单元截面为边长 4 mm 的正六边形,可以看出尺寸是非常小的。实验在没有流动的情况下进行。测量过程中发现面板传声器测点与声衬表面的距离对测量值有一些影响,但并不是很大,最佳距离约为 12.5 mm。

该声衬声阻抗的测量结果如图 10 所示。出于对比较验的目的,图中还给出了标准阻抗管的测量结果,以及根据 Guess^[5]模型计算的理论值。值得说明的是,在高达 6 000 Hz 的测量频率下,管道内声场具有多种模式成分,即可能有平面波,也含有高阶模式,所以声波是斜入射到声衬表面上的,且入射角因模式不同而在 0~90° 的范围内变化。所以,本文现场测量的条件要比标准阻抗管内单纯法向入射的条件复杂,并且更为接近于实际情况。

由于小孔孔径较大,该声衬主要是抗性的,声阻很小。这里我们先来分析起主导作用的声抗的情况。从图 10(a)来看,双传声器法得到的声抗实验值和 Guess 模型理论值具有良好的符合,二者一致地给出了声衬共振频率在 2 200 Hz 附近的结果,而我们知道共振点的确定往往是声衬成功设计的关键所在。值得注意的是,Guess 模型也基于声波法向入射的假设;尽管这样,上面的对比仍能取得一致,这实际上表明该蜂窝夹层声衬具有良好的局域反应特性,其声阻抗与声波入射角度无关或关系很小。

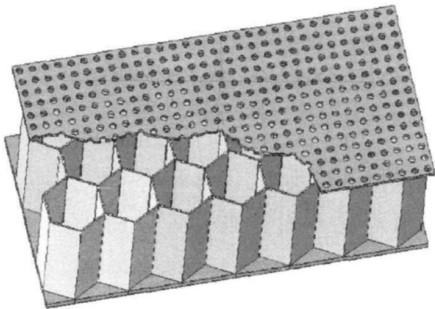


图 9 实用蜂窝夹层声衬示意图
Fig. 9 Schematic of a practical honeycomb structure acoustic liner

相比较而言,阻抗管法得到的声抗值与双传声器法测量值,以及 Guess 模型理论值都有一定的偏差。分析原因在于,为了测量频率达到 6 000 Hz,所用阻抗管的直径只有 29 mm,那么声衬试

样也必需被切割成相应尺寸的小块.在这一过程中不可避免地破坏了试样边缘处的蜂窝结构,并导致面板穿孔率改变.所以,小块试样的测量值有时不能准确地反映原有声衬的性能,这是在预料之中的.能够避免这种不利影响和测量误差,也是双传声器法的一个优势所在.

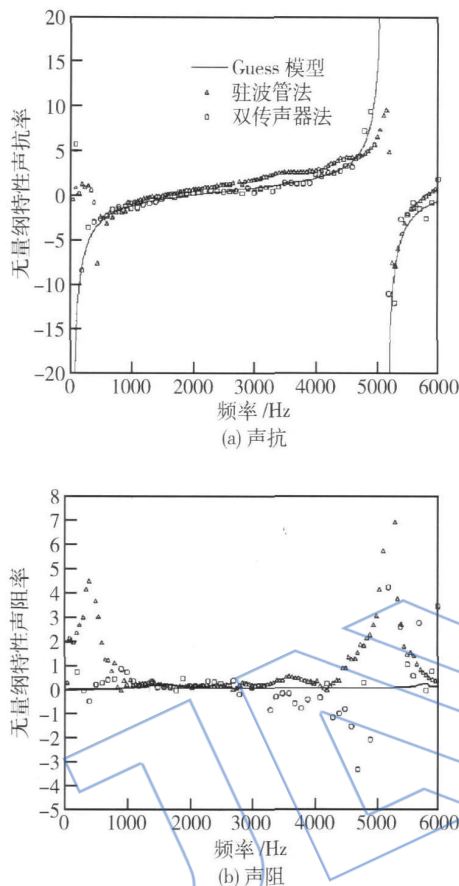


图10 管道内蜂窝夹层声衬阻抗测量值与Guess模型计算值的比较

Fig. 10 Comparison between the measured acoustic impedance of the duct liner and the prediction of Guess' model, (a) resistance, (b) reactance

从理论分析来看,该声衬的声阻值基本为零,这给准确测定声阻带来了一定的难度.从图10(b)来看,在2500 Hz以下,双传声器法和阻抗管法测量值与理论值之间是接近的,实验值略偏高一些.但是在2500 Hz以上,两种实验方法的结果都与理论值有较大偏差.阻抗管法测得的声阻

在共振频率6000 Hz附近明显偏大,其原因与前面的分析相同,是受到了声抗值骤然增大的连带影响所致.然而,当频率较高时,双传声器法测量值出现了不合理的负数,这可能是由于高频声压沿细探针管衰减增大,因而信噪比下降所造成的.如何提高高频段的测量精度,是探针传声器技术所面临的一个难题.对于本文所关注的研究来讲,在不会明显损坏声衬结构的前提下,使用管径稍大的探针可能是一种解决途径.

4 结论

本文研究了用双传声器法现场测量管道声衬声阻抗的技术.为解决实用蜂窝夹层声衬单元尺寸过小,无法直接嵌入传声器的问题,设计了探针传声器和一种严格的校准方法,通过外径1.5 mm的探针将声衬表面和背腔内的声压信号引出后准确地测量.在经过标准实验检验后,本实验装置和测试技术用于测量敷设在管道内的一种实用声衬的声阻抗,取得了令人满意的结果.本文现场测量是在管内声场具有多重模态和声波斜入射的条件下进行的,这比标准阻抗管法单纯法向入射的实验条件更复杂,也更为接近于实际情况.不足之处在于,本文实验没有考虑气流的影响,尚需要通过进一步的研究来改进和提高.

参考文献:

- [1] Dean P D. An in situ method of wall acoustic impedance measurement in flow ducts [J]. J. Sound & Vib., 1974, 34(1):97-130.
- [2] 谷嘉锦,张强.进气道降噪的实验研究[J].噪声与振动控制,1995,1:14-18.
GU Jiajin, ZHANG Qiang. Experimental of reducing inlet noise [J]. Noise and Vibration Control, 1995, 1:14-18.
- [3] Malmay C, Carbone S. Acoustic impedance measurement with grazing flow [R]. AIAA-2001-2193, 2001.
- [4] Copeland A B, Hill D. Design of a probe-tube for use with a 1-inch condenser microphone [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1970, 48:1036.
- [5] Guess A W. Calculation of perforated plate liner parameters from specified acoustic resistance and reactance [J]. J. Sound & Vib., 1975, 40(1):119-137.