

基于流管试验的管道声传播预测

贾文强, 刘常春, 徐 珺

(中国航空发动机集团有限公司 商用航空发动机有限责任公司
外部与短舱系统部, 上海 200241)

摘 要: 通过平板声衬流管试验,测试了管道内无流动和有流动下不同入射声波频率的管道壁面复声压,并基于试验模型与数据分别开展了二维和三维管道声传播预测,将试验测量结果与预测结果进行了对比。结果表明:二维和三维的预测结果非常吻合,尤其是在无流动条件下;在不同流动条件和不同频率下,声传播预测给出了与试验数据较为吻合的结果,壁面声压级的趋势与试验结果一致,基本验证了管道声传播预测模型的准确性;对比不同流动条件和频率点,有流动下预测的壁面声压级的误差比无流动更大,低频下预测的壁面声压级的误差比高频更大。

关 键 词: 流管试验; 管道声传播; 预测验证; 声衬; 二维/三维

中图分类号: V224⁺.2; O422.2 **文献标志码:** A

Duct sound propagation prediction based on grazing flow duct test

JIA Wenqiang, LIU Changchun, XU Jun

(External and Nacelle System Department,
Commercial Aircraft Engine Company Limited,
Aero Engine Corporation of China, Shanghai 200241, China)

Abstract: Acoustic complex pressure distribution on the duct wall opposite to the acoustic liner sample was obtained from grazing flow duct test with and without flow. Based on the test model and data, sound prediction study was carried out to validate the 2D and 3D duct sound propagation models. Result showed that 2D and 3D prediction results were very consistent, especially in the absence of flow. Duct sound propagation predictions were well matched to the corresponding grazing flow test results with and without flow at different frequencies, which verified the sound propagation model accuracy. Considering the influence of flow and frequency, the error between prediction and test results with flow was bigger than the situation without flow, and error at low frequency was bigger than that at high frequency.

Key words: grazing flow duct test; duct sound propagation; prediction validation; acoustic liner; two-dimensional(2D)/three-dimensional(3D)

消声短舱是降低发动机噪声的主要途径,通过在短舱进气道和外涵道铺设声衬,可以极大的吸收风扇噪声的声能量,使风扇噪声得到快速衰

减和抑制。消声短舱技术的核心问题是研究声阻抗边界条件下噪声模态的传播规律,在此基础上开展单段或多段声衬的优化设计,这一方面需要

建立精确可靠的管道声传播预测模型,对噪声衰减进行预测;另一方面还需要针对短舱的流动和声学条件对声衬的声阻抗特性作出预测。

先进的声衬设计对有声衬吸声作用下的短舱管道声传播机理提出了更深入的研究需求,四十年来气动声学管道声传播的数值计算方法得到了长足的发展^[1-9],这些方法可以用于通过测量得到的复声压提取声衬的声阻抗^[9-13],或者反之,通过声衬声阻抗求解管道内的声场。管道声传播的计算方法包括有模态匹配方法^[14]、传递单元法^[15]、边界元法^[16]以及有限元法^[17-24]等,其中有限元法在发动机消声短舱的声场模拟中发挥了重要作用,不仅能考虑管道内的声传播,还可以将声传播进一步扩展到远场。Eversman 将有限元应用于短舱进气道的声场计算^[24],在假定平均流动为势流的前提下,考虑了非均匀流动对声传播的影响。经过多年的发展,有限元模型已成为迄今为止应用最广的声传播模型之一。在航空发动机消声短舱声学模拟中,制约有限元模型广泛应用的最大问题是全三维仿真计算量大,计算时间过长,尤其是解决高频并伴随非平行剪切流动的声学问题。本文通过平板声衬流管试验获得了不同流速和频率的三维流管管道声传播试验数据,基于试验模型分别开展了二维和三维管道声传播预测,给出了二维和三维预测的吻合度,最后将试验测量结果与预测结果进行了对比,验证了管道声传播预测模型的准确性。

1 试验系统

声衬流管试验台主要由供气系统、来流消声系统和声衬流管 3 部分组成,如图 1 所示。供气系统主要由风机和稳压腔组成,位于全消声室外面,主要作用是来为声衬流管内提供稳定的来流环境。来流消声系统内部的穿孔板和空腔可以吸收来流的湍流噪声以及风机噪声,从而降低流管内背景噪声。声衬流管位于全消声室内部,是声衬

流管试验的试验件安装段和试验测量段。

声衬流管可产生所需的切向流和声场环境,从而在不同切向流速和声压级下对声衬试验件进行测量。图 2 是声衬流管的实物照片,其主要包括声源、声衬测量段、流场测量段和消声端组成。

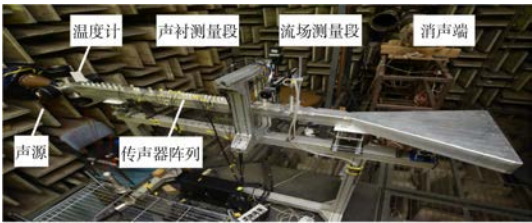


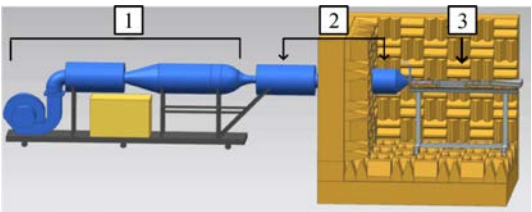
图 2 声衬流管实物照片

Fig. 2 Photograph of acoustic liner grazing flow duct

声衬流管进口接气源,使声衬试件表面产生一定速度的切向流。声源将 4 个大功率扬声器通过流管侧壁上的导声管连接至流管,将扬声器产生的声波导入流管,使其在流管中产生所需的声场环境。声衬测量段位于流管中部,下壁面齐平安安装声衬试验件,上壁面正对声衬的位置等间距布置了传声器,另外在声衬测试段前、后的上游段和下游段分别布置了传声器。传声器装于带密封圈的塑料座上,保证安装时头部与流管内壁面平齐,并满足绝缘和密封要求。流管可装入不同深度的声衬试件,通过底部升降刚性垫块调节机匣深度,使声衬表面与流管内壁齐平安安装。流场测试段位于声衬测试段之后,用于测量流管截面上的流速、压力和温度等气流参数。消声端装于流管末端,一方面消除流管出口端的声反射,减小流管内轴向驻波影响,另一方面可以隔离管外噪声,减小外来噪声的干扰。

2 试验件

声衬试验件为单自由度穿孔板声衬,结构示意图如图 3 所示,它由穿孔板、蜂窝芯以及刚性背板黏接而成。本次声衬试验件为矩形,长为 400



1 供气系统; 2 来流消声系统; 3 声衬流管。

图 1 声衬流管试验台

Fig. 1 Acoustic liner grazing flow duct test facility

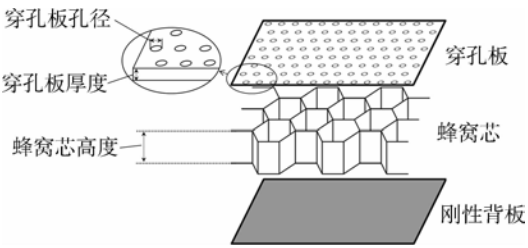


图 3 单自由度声衬结构示意图

Fig. 3 Sketch of single degree of freedom acoustic liner

mm,宽为 51 mm,高度为蜂窝芯高度加上穿孔板和刚性背板的厚度。

声衬的主要几何参数为穿孔板孔径、穿孔板厚度、穿孔率以及蜂窝芯高度,其中穿孔率为穿孔板上孔的面积与总面积的比率。本文中声衬试验件的结构参数见表 1。

表 1 声衬试验件的结构参数

Table 1 Geometry parameters of acoustic liner test sample

结构参数	数值
穿孔板孔径/mm	1.0
穿孔板厚度/mm	1.0
穿孔率/%	7
蜂窝芯高度/mm	23.0

3 计算模型

本文取声衬测量段及其上游段和下游段(即传声器所在的位置)作为声传播预测的计算域。图 4 显示的是管道声传播的计算模型,它是一个矩形截面管道,截面尺寸(宽×高)为 51 mm×51 mm,上游段为 225 mm,声衬测量段的长度为 468 mm(其中声衬长度为 400 mm),下游段为 425 mm。在声衬测量段的下壁面平齐安装有声衬试件,上壁面与声衬相对的位置及其上下游布置了 22 个传声器,组成传声器阵列。

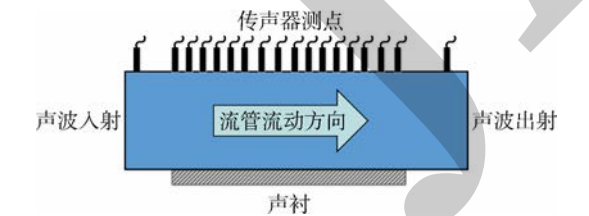


图 4 管道声传播计算模型

Fig. 4 Computational model of duct sound propagation

本文分别对二维和三维管道的声传播仿真开展数值研究,二维管道尺寸(长×宽)为 718 mm×51 mm,三维管道尺寸(长×宽×高)为 718 mm×51 mm×51 mm。由于管道声传播的计算模型相对简单,这里的二维和三维管道均采用结构化网格进行计算,网格划分情况如图 5 所示,网格密度保证声传播计算中一个波长内至少有 8 个网格单元。

3.1 控制方程与边界条件

在流动充分发展的直管道中,声压波动控制

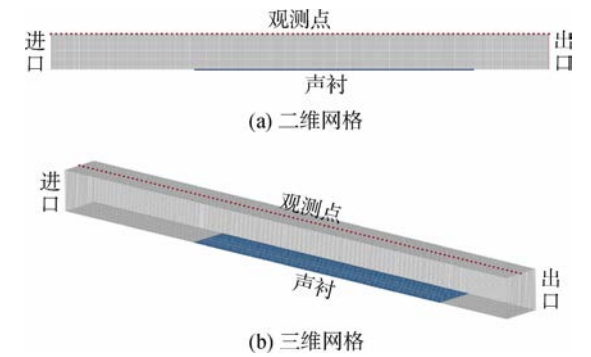


图 5 管道声传播计算网格

Fig. 5 Computational grid of duct sound propagation

方程由 Helmholtz 对流方程描述,其笛卡儿坐标系下的方程如下:

$$\nabla^2 p - Ma^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - 2ikMa \frac{\partial p}{\partial x} + k^2 p = 0 \quad (1)$$

其中 p 为声压, Ma 为马赫数, x 为流向横坐标, $i = \sqrt{-1}$, k 为自由空间波数, $k = 2\pi f/c$, f 为频率, c 为声速。

管道进口边界设定可传播的声模态,其声压级和相位为进口处传声器的试验测量值,如表 2 所示,管道出口为无反射边界。

表 2 管道进口声压的试验测量值

Table 2 Sound pressure measurement at the tube inlet			
切向流速/(m/s)	频率/Hz	声压级/dB	相位/rad
0	1000	129.7	-1.90
50	1000	130.7	-2.49
50	3000	130.8	-1.30

壁面边界条件由 Myers 边界条件^[25]给出,声衬铺设位置设定为均匀的无量纲声阻抗吸声边界,其余为硬壁边界条件

$$\frac{\partial p}{\partial y} = ik \left(\frac{p}{z} \right) + 2Ma \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{z} \right) + \frac{Ma^2}{ik} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{p}{z} \right) \quad (2)$$

其中 y 为垂直于管道壁面的纵坐标,当壁面为硬壁时,声阻抗 z 趋向于无穷大,此时 $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$ 。

管道内流动为充分发展的湍流,流速方向与声传播方向一致,速度、压力和温度沿截面的分布通过二维和三维 CFD 计算得到,CFD 边界条件由试验测量得到。

3.2 声衬声阻抗提取方法

声衬流管试验的主要目的之一是获得声衬的

声阻抗特性,本试验采用直接提取法^[26]对声衬进行声阻抗提取,也就是通过测量声衬上方的复声压推导出声衬的声阻抗。由于声衬的吸声作用,管道内模态波是呈指数衰减的,即管内模态波的波数为复数,模态波的传播特性包含了声衬的声阻抗信息。直接提取法采用电磁学研究中的 Prony 方法对空间声场的模态分解,得到空间域中的复波数。在得到单一模态波的轴向复波数后,通过不同方向波数的约束关系,得到法向波数,进而得到被测声衬的声阻抗。表 3 给出了采用直接提取法得到的声衬试验件声阻抗值,用于给定声衬位置的壁面声阻抗吸声边界。

表 3 声衬试验件的无量纲声阻抗

Table 3 Normalized impedance of acoustic liner test sample

切向流速/(m/s)	频率/Hz	声阻	声抗
0	1000	0.201	-2.113
50	1000	0.871	-2.307
50	3000	0.444	0.363

4 结果分析

4.1 流场结果

流管中的气流压力、温度和速度等是声场计算的输入条件,尤其是流场中的切向速度分布,其一方面对声衬声阻抗特性产生影响,另一方面对声传播的影响也很大。在流动充分发展的情况下,流管中压力和温度随流管中的位置变化不大,但切向速度分布随截面位置的变化较大。

本试验所测得的速度为截面的平均速度,还需要依据试验数据对流管中的速度分布进行 CFD 计算。在二维和三维的流场 CFD 计算中,入口速度均给定试验的实测平均速度为 50 m/s (静压为 102690 Pa,静温为 291 K),得到的流管内的截面速度分布如图 6 所示,其中左侧是通过将二维计算结果中的纵向速度剖面沿横向拉伸得到的截面速度分布,右侧为三维计算结果的截面速度分布。由图可见,两者的速度分布有明显不同,三维管道的速度分布存在角区,显然这更接近实际情况。

由于两者给定了相同的平均速度,因此三维流场中心线的速度比二维略高,这一点从图 7 的速度剖面对比可以看出,其中横轴为流管截面纵向方向的坐标。

虽然三维计算与实际情况更相符,但二维计

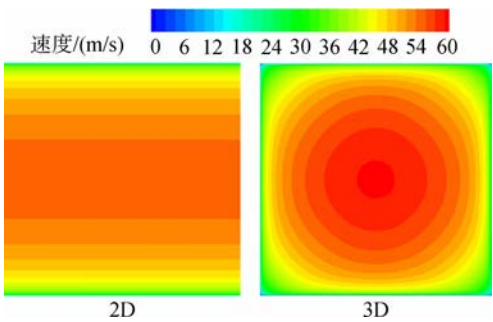


图 6 二维与三维流管速度云图

Fig. 6 Grazing flow duct velocity contour of 2D and 3D calculation

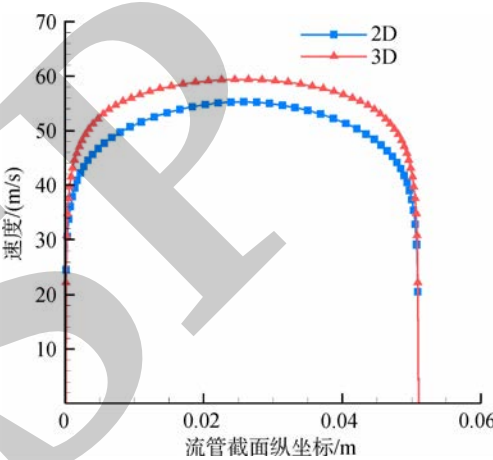


图 7 二维与三维流管速度剖面对比

Fig. 7 Grazing flow duct velocity profile of 2D and 3D calculation

算有着更好的经济性。下面将讨论二维与三维计算对声场结果的影响。

4.2 声场结果

流管内的声场测量通过壁面上的传声器测量得到,包括上壁面正对声衬位置的 16 支传声器和声衬上、下游段的 6 支传声器,共 22 个测点,其中声衬上方 16 个测点的复声压是声阻抗提取的输入数据。传声器测量得到的复声压包括声压幅值和相位沿流管的分布。通过控制扬声器功率使得声衬上游段第 1 个传声器的声压幅值为即定流管入口声压级。相位以该传声器为基准相位,其他传声器相位均与其进行相位校准而得出。

通过对声传播预测结果中流管上方的 100 个监测点的声压数据进行了提取,并与试验结果进行了对比。首先比较了无流动条件下的计算结果,二维和三维声传播计算的壁面复声压在 1000 Hz 的对比如图 8 所示,其中横轴为流管在轴向的横坐标。从图中可见,二维与三维计算两者的差

异几乎没有,无论是声压级还是相位均高度重合,可见在无流动(或相同流速)条件下声传播特性与管道的宽度无关,这主要是由于在测量频率范围内管道内可传播模态为平面波,在无流动的条件下声传播不存在三维效应。从计算与试验的对比来看,相位的吻合程度较高,计算与试验结果基本是重合的,声压级的计算与试验结果虽有一定的误差但也基本吻合,相差不超过 0.5 dB,产生误差的主要原因一方面是声衬声阻抗提取存在一定的误差,另外一方面可能是由于流管内的阻抗间断引起的声反射。

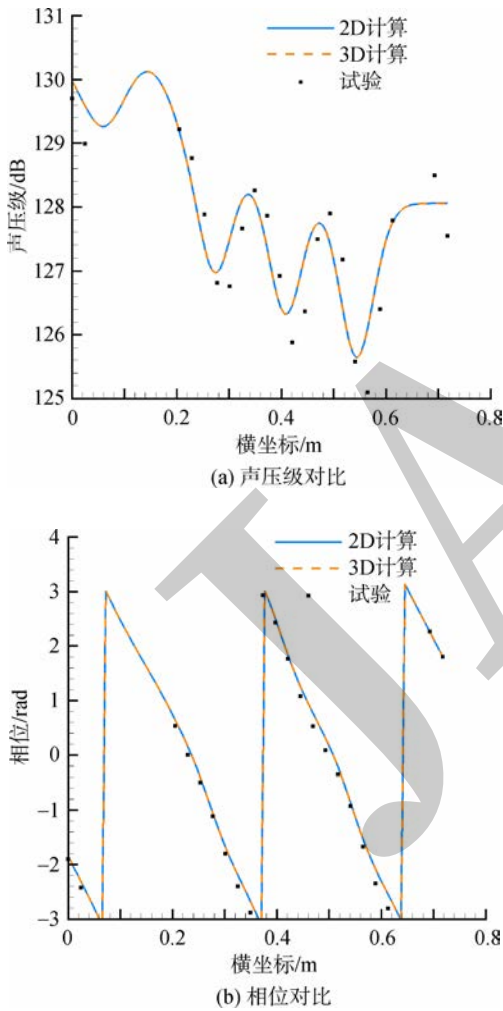


图 8 无流动、1000 Hz 频率下壁面复声压的计算与试验结果对比

Fig. 8 Acoustic complex pressure distribution of calculation and test on the duct wall without flow and frequency of 1000 Hz

有流动条件下的壁面复声压计算结果与试验结果在 1000 Hz 的对比如图 9 所示。相比无流动条件,二维和三维的声压级结果存在一些差异,三

维结果更接近于试验数据,主要原因是两者的速度剖面有所不同,流场分布一定程度上影响了声场。对比两者结果,壁面声压级相差仅 0.2 dB,从工程应用的角度来说,可以将此类三维问题近似简化为二维问题,减少计算成本的同时又不失准确性。此外,有流动条件下的计算与试验结果误差比无流动条件下更大一些,局部误差约为 1 dB,分析其原因主要有两点:一是切向流动对声衬声阻抗产生了影响,尤其是声阻部分,进一步加大了声阻抗提取的误差;二是有流动情况下存在来流噪声和边界层噪声等背景噪声,导致信噪比下降,这也对试验测量结果产生了影响。

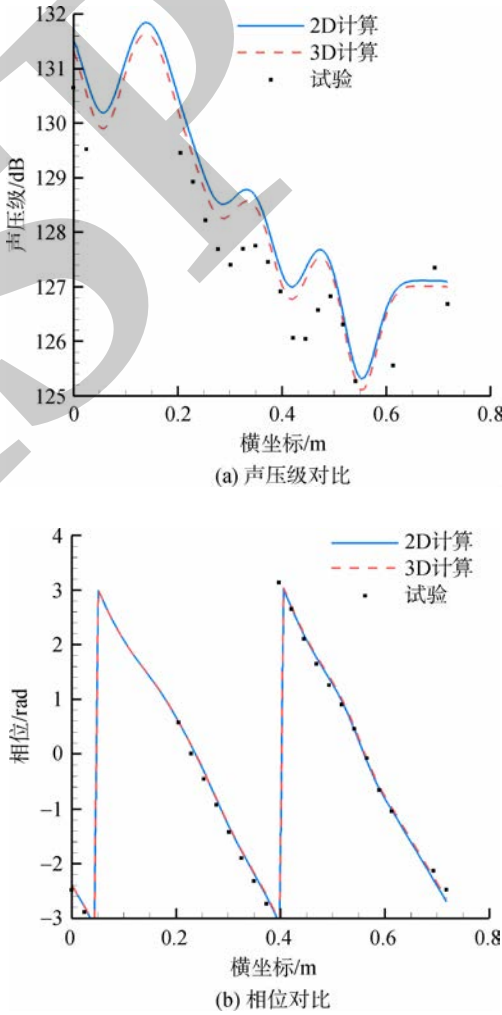


图 9 有流动、1000 Hz 频率下壁面复声压的计算与试验结果对比

Fig. 9 Acoustic complex pressure distribution of calculation and test on the duct wall with flow and frequency of 1000 Hz

图 10 所示为有流动条件下壁面复声压计算结果与试验结果在 3000 Hz 的对比,可见高频下

三维结果同样更接近于试验数据。在同样流速的情况下,相比 1000 Hz 来说,高频下壁面声压级与试验结果吻合程度更高一些,局部误差小于 0.5 dB,究其原因可能是背景噪声的影响,由于背景噪声主要分布在低频附近,高频处的背景噪声相对较小,试验数据的信噪比更高。

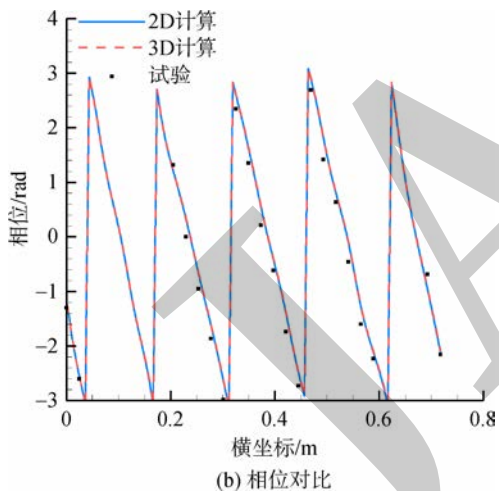
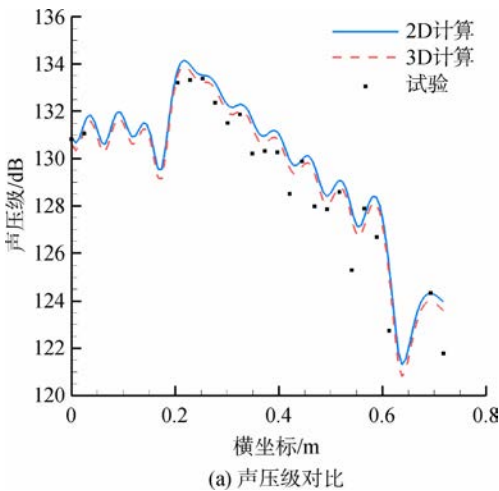


图 10 有流动、3000 Hz 频率下壁面复声压的计算与试验结果对比

Fig. 10 Acoustic complex pressure distribution of calculation and test on the duct wall with flow and frequency of 3000 Hz

5 结 论

通过平板声衬流管试验获得了不同流速及频率的三维流管管道声传播试验数据,基于试验模型开展了二维和三维管道声传播预测,给出了二维和三维预测的吻合度,最后将试验测量结果与预测结果进行了对比,主要结论有以下几点:

1) 声传播预测结果基本可靠,尤其是各流速和频率下壁面声压的相位与试验结果吻合程度非

常高,壁面声压级的趋势与试验结果一致,对比的结果基本验证了管道声传播预测模型的准确性;

2) 对比二维和三维声传播计算,在无流动条件下两者结果完全一致,表明管道内声波以平面波形式传播。在有流动条件下,两者差别不大,三维结果更接近试验结果,表明管道流场分布对声传播产生了影响。从工程角度来说,可以将此类三维问题近似转化为二维计算,能够在大幅减少计算时间和内存消耗的同时,得到较为可靠的预测结果;

3) 对比无流动和有流动条件,有流动的壁面声压级与试验结果的局部误差相对更大,原因主要来自于切向流动引起了更大的声阻抗误差以及流动条件下背景噪声的影响;

4) 对比低频和高频,高频下的壁面声压级误差更小,主要原因是流动的背景噪声分布在低频段,使得高频条件下信噪比更高。

参考文献:

[1] ARMSTRONG D L, BECKEMEYER R J, OLSEN R F. Impedance measurements of acoustic duct liners with grazing flow[R]. New York: the 87th Meeting of the Acoustical Society of America, 1974.

[2] WATSON W R, TANNER S E, PARROTT T L. Optimization method for educing variable-impedance liner properties[J]. AIAA Journal, 1998, 36(1): 18-23.

[3] MALMARY C, CARBONNE S, AUREGAN Y, et al. Acoustic impedance measurement with grazing flow[R]. Maastricht: the 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, 2001.

[4] JONES M G, PARROTT T L, WATSON W R. Comparison of acoustic impedance eduction techniques for locally-reacting liners[R]. Hilton Head: the 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, 2003.

[5] JONES M G, WATSON W R, TRACY M B, et al. Comparison of two waveguide methods for educing liner impedance in grazing flow[J]. AIAA Journal, 2004, 42(2): 232-240.

[6] AUREGAN Y, LEROUX M, and PAGNEUX V. Measurement of liner impedance with flow by an inverse method [R]. Manchester: the 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2004.

[7] LI Xiaodong, THIELE F. Numerical computation of sound propagation in lined ducts by time-domain impedance boundary conditions[R]. Manchester: the 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2004.

[8] ELNADY T, BODEN H. An inverse analytical method for extracting liner impedance from pressure measurements [R]. Manchester: the 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2004.

- [9] WATSON W R, TRACY M B, JONES M G, et al. Impedance eduction in the presence of shear flow[R]. Maas-tricht; the 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, 2001.
- [10] WATSON W R. A new method for determining acoustic-liner admittance in a rectangular duct with grazing flow from experimental data[R]. NASA-TP-2310, 1984.
- [11] WATSON W R. A method for determining acoustic-liner admittance in ducts with sheared flow in two cross-sectional directions[R]. NASA-TP-2518, 1985.
- [12] WATSON W R, JONES M G, PARROTT T L. Validation of an impedance eduction method in flow[R]. Toulouse; the 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 1998.
- [13] WATSON W R, JONES M G, TANNER S E, et al. A finite element propagation model for extracting normal incidence impedance in nonprogressive acoustic wave fields[R]. NASA-TM-110160, 1995.
- [14] 管莹, 王同庆, 王利. 提取流管实验装置中声衬声阻抗的模式方法[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 79-84.
GUAN Ying, WANG Tongqing, WANG Li. A mode match method for extracting impedance of liners in flow duct facility[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 79-84. (in Chinese)
- [15] 王晓宇, 杜林, 孙晓峰. 考虑变截面影响的航空发动机短舱声学模型及数值结果[J]. 航空学报, 2006, 27(6): 1073-1079.
WANG Xiaoyu, DU Lin, SUN Xiaofeng. A new approach for the acoustic design of aeroengine nacelle with the effect of varying cross-section area[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1073-1079. (in Chinese)
- [16] DUNN M H, TWEED J, FARASSAT F. The application of a boundary integral equation method to the prediction of ducted fan engine noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 227(5): 1019-1048.
- [17] ASTLEY R J, EVERSMAN W. A finite element method for transmission in non-uniform ducts without flow; comparison with the method of weighted residuals[J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 57(3): 367-388.
- [18] ASTLEY R J, EVERSMAN W. Finite element formulations for acoustical radiation[J]. Journal of Sound and Vibration, 1983, 88(1): 47-64.
- [19] DANDA R I, EVERSMAN W. Improved finite element modeling of the turbofan engine inlet radiation problem[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1995, 117(1): 109-115.
- [20] EVERSMAN W. The boundary condition at an impedance wall in a nonuniform duct with potential flow[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 246(1): 63-69.
- [21] RIENSTRA S W, EVERSMAN W. A numerical comparison between the multiple-scales and finite-element solution for sound propagation in lined flow ducts[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 437(1): 367-384.
- [22] 卢镇波, 景晓东, 孙晓峰. 一种可用于声衬优化设计的管道声传播有限元模型[J]. 航空动力学报, 2007, 22(8): 1303-1308.
LU Zhenbo, JING Xiaodong, SUN Xiaofeng. A finite element model of sound propagation in flow duct with its application to linear optimization[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8): 1303-1308. (in Chinese)
- [23] PARRETT A V, EVERSMAN W. Applications of finite element and wave envelope element approximations to turbofan engine noise radiation including flight effects[R]. AIAA 84-2333, 1984.
- [24] EVERSMAN W. Theoretical models for duct acoustics propagation and radiation[R]. NASA-RP-1258, 1991.
- [25] MYERS M K. On the acoustic boundary condition in the presence of flow[J]. Journal of Sound and Vibration, 1980, 71(3): 429-434.
- [26] JING Xiaodong, PENG Sen, SUN Xiaofeng. A straightforward method for wall impedance eduction in a flow duct[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 124(2): 227-234.

(编辑: 王碧珺)