

剪切流圆管物理参量对声衰减量的影响

中国科学院声学所 吕亚东*
北京航空航天大学 胡宗安 崔济亚

【摘要】 应用模态分析方法建立了均匀流和剪切流条件下, 发动机多段声衬圆形管道声传播工程计算模型, 围绕各种物理参量如平均流 Mach 数、附面层厚度和声衬腔深、声阻、面板特征频率、管长等对管内噪声衰减量的影响进行了算例计算, 并与有关文献实验测量结果进行了验证对比, 从而为发动机前短舱管内声传播研究提供了一种比较完整的模态分析工程预测方法。

主题词: 剪切流动 声传播 模态分析
分类号: V235.13 O422.4

1 前言

文献[1, 2]应用模态分析方法建立了多段声衬圆环形管道声传播预测模型, 该模型的建立为涡扇发动机风扇后短舱排气管道内声传播预测奠定了基础。而对于发动机风扇前短舱(进气道)理论上需要近似看作圆形管道。针对圆形管道声传播, 文献[3]应用模态分析方法建立了一种新的均匀流圆形管道内声传播的工程预测模型。本文在此基础上, 结合文献[3]的模态分析工程简化方法, 建立多段声衬平均流(包括均匀流、剪切流)圆形管道内声传播的工程预测模型, 并对剪切流圆管物理参量对声衰减量的影响进行算例计算。

2 多段声衬平均流圆形管道声传播工程预测模型

应用模态分析方法^[1~3]建立多段声衬圆形管道声传播工程预测模型基于如下简化条件: (1) 管内流动为轴向平均流, 无周向剪切流, 只考虑径向剪切流; (2) 不考虑粘性、温度、密度梯度影响, 也不考虑涡流影响; (3) 声衬为轴向分段。均匀流条件下, 多段声衬圆形管道声传播工程预测模型的建立过程, 详细推导参见文献[1, 3], 这里重点介绍剪切流条件下, 圆形管道管内声传播工程预测模型的建立。

2.1 平均流圆形管道声传播的工程预测模型

(1) 均匀流圆形管道声传播 从均匀流声波动方程^[1]出发, 经推导变换, 得到如下形式解:

$$p_{\theta}(\theta) = C_{\theta} e^{im\theta} \quad (1)$$
$$p_r(r) = J_m(k_r r) + C_m Y_m(k_r r) \quad (2)$$

令径向模态本征值 $v = k_r r_0$, 将式(2)代入声导纳边界条件(文献[3]中式(3)和式(4)), 消去复数联立方程组中 C_m , 得到形如 $F(v) = 0$ 本征值方程。应用 Newton-Raphson 迭代公式求解 $F(v) = 0$ 本征值方程; 或应用 Runge-Kutta 积分方法求解 $dF(v)/dx = 0$ 微分形式本征值方

1997 年 10 月收稿; 1998 年 1 月收到修改稿。

* * 男 33 岁 博士 副研究员 中国科学院声学研究所 100080

程,并辅之以 Newton-Raphson 迭代求解,得到均匀流圆形管道径向模态本征值。

(2) 剪切流圆形管道声传播 剪切流存在条件下,圆形管道管内声传播的控制方程为:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{D_0^2 p}{Dt^2} + 2\rho_0 c \frac{dM}{dr} \frac{\partial u_r}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

将声压按圆柱坐标系表示,经推导变换,上式可表示为如下两个常微分方程:

$$\begin{cases} \frac{d^2 p_\theta}{d\theta^2} = -m^2 p_\theta \\ \frac{d^2 p_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp_r}{dr} + \frac{2K}{1-M(r)K} = \frac{dM(r)}{dr} \frac{dp_r}{dr} + \left(k_r^2 - \frac{m^2}{r^2}\right) p_r = 0 \end{cases} \quad (4)$$

假定附面层较薄,声能量通量主要出现在均匀流区域,在求解考虑剪切流影响的微分方程中,首先选择与均匀流形式相同的本征函数,即:

$$p_r(r) = J_m(kr) + C_m Y_m(kr) \quad (5)$$

将控制声压径向变化的式(4)中第二个方程改写成两个联立的一阶常微分方程,即:

$$\begin{cases} \frac{dq}{dr} = -\left[\frac{1}{r} + \frac{2K}{1-M(r)K} \frac{dM(r)}{dr}\right] q - \left[k^2 - \frac{m^2}{r^2}\right] p_r \\ \frac{dp_r}{dr} = q \end{cases} \quad (6)$$

再考虑管壁附面层影响,结合管壁上的声导纳边界条件(文献[3]中的式(3)和式(4)),通过对式(6)的 Runge-Kutta 积分和 Newton-Raphson 迭代,对本征值进行修正,从而得到考虑圆形管道剪切流影响的径向本征值。

均匀流与剪切流径向本征值确定后,按文献[1]方法计算轴向波数 k_z 、无量纲传播常数 K 、模态截止频率 f^* 、模态截止率 ξ 、径向模态本征函数 $p_r(r)$,并构造声压一般广义解。

$$p(r, \theta, z, t) = \sum_m \sum_n [A_{mn} p_{\theta n} p_{rn}(k_{r,mn} r) e^{ik_{z,mn} z}] e^{-i\omega t} \quad (7)$$

2.2 多段声衬圆形管道声传播的工程预测

对于多段声衬有限长管道声传播,利用文献[1]传递矩阵方法将各管段声学模态解向量以及管道两端模态解向量联系起来。根据分段界面上声压和轴向速度连续条件建立分段界面传输和反射矩阵、均匀段传输矩阵、端口和声源界面反射、传输矩阵以及系统矩阵方程。通过对系统矩阵方程数值求解,得到各管段界面前传、后传模态系数、声能量通量以及净声能量通量,最后利用多段管道中首末界面上声能量来计算由声衬引起的总声功率衰减量^[1]($E_{mn}(0)$ 和 $E_{mn}(L)$ 分别为管道首末界面的声能量, Δ 表示管道平均声能量的总噪声声功率级衰减量(dB))。

$$\Delta = 10 \lg \left(\frac{\sum_m \sum_n E_{mn}(0)}{\sum_m \sum_n E_{mn}(L)} \right) \quad (8)$$

3 计算结果与分析

本文利用上述工程预测模型,针对圆形管道各物理参量如平均流 Mach 数、附面层厚度和声衬腔深、声阻、面板特征频率、管道长度对管内声衰减量的影响进行算例计算。算例输入数据为:圆管内径 $r = 0.211$ m, 管长 $L = 0.813$ m, 声源模态向量为:

$$Q_s = (-19.226, -7.173), (7.551, -0.380), (-5.611, 0.3186), (1.373, -0.273)$$

本文采用单层声衬软壁边界条件,管壁声衬声阻抗按文献[4]给出的模型计算。

$$z^* = R^* \left[1 + \frac{if^*}{f_0^*} \right] - icot(2\pi f^* d^*) \quad (9)$$

其中: $z^* = Z/\rho c$ 为声阻抗率, $L^* = L/D$ 为无量纲管道长度, $R^* = R/\rho c$ 为声阻率, $d^* = d/D$ 为无量纲声衬腔深, $f^* = fD/c$ 为无量纲声波频率, D 为管道直径, $f_0^* = f_0 D/c$ 为无量纲面板特征频率, ρc 为空气特征频率。

本文物理参量研究旨在探索各种物理参量对平均流敷设声衬圆形管道声衰减量的影响。理论计算结果图 1~图 6 中横坐标为无量纲声波频率 $f^* = fD/c$, 纵坐标为周向模态阶数 $m=1$, 径向模态阶数 $n=4$ 时, 由式(8)得到的管内噪声声功率级衰减量。

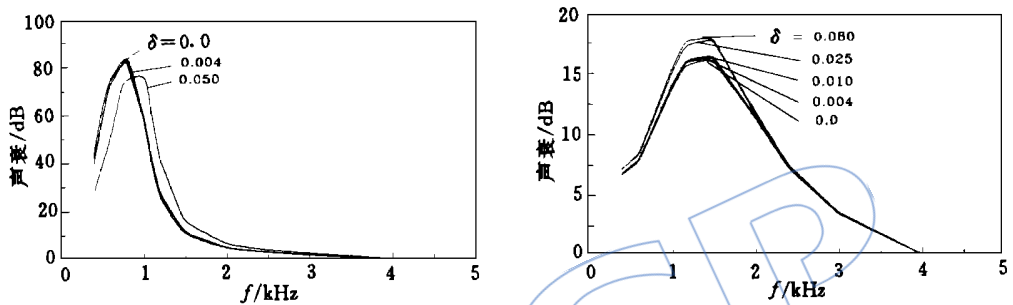


图 1 附面层厚度对声衰减量的影响 (a) $Ma_0 = -0.4$; (b) $Ma_0 = 0.4$)

图 1(a) 和(b) 分别表示附面层折射对逆流 ($Ma_0 < 0$) 和顺流 ($Ma_0 > 0$) 传播管内声衰减量的影响 ($R^* = 1.5, f_0^* = 11.16, d^* = 0.1, L^* = 0.2$)。从图 1(a) 可知, 对于逆流声传播, 声衬管道附面层存在不仅会降低最大可以实现的消声量, 而且会促使调谐频率向高频方向移动; 而对于顺流声传播来说, 附面层折射对消声量的影响较小 (使消声量略有增加, 如图 1(b))。

由图 2 可以看出 (R^*, f_0^*, d^*, L^* 同图 1), 随着 Mach 数的增大, 对于排气管道 (顺流声传播, $Ma_0 > 0$), 调谐频率向高频方向移动, 同时峰值消声量减小; 而对于进气管道 (逆流声传播, $Ma_0 < 0$), 调谐频率向低频方向移动, 同时可得到的峰值消声量增加。

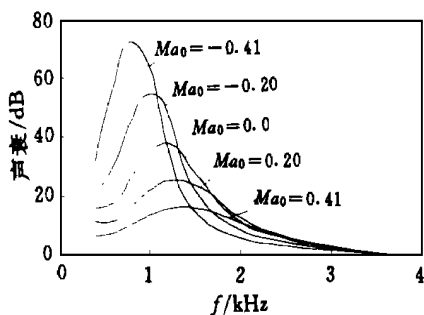


图 2 平均流 Mach 数对声衰减量的影响
($\delta^* = 0.01$)

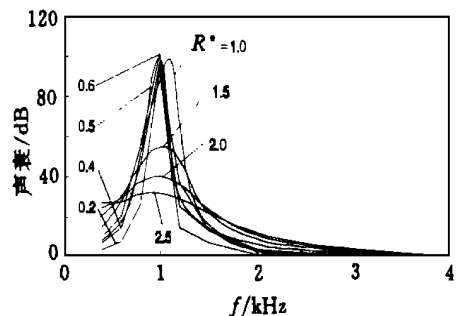


图 3 声衬声阻对声衰减量的影响
($Ma_0 = -0.2; \delta^* = 0.01$)

由图3可以看出(f_0^*, d^*, L^* 同图1),随着声衬声阻率 R^* 逐步降低到某一特定值时,消声频带宽度逐渐变窄,噪声峰值衰减量逐渐增加;进一步降低 R^* 值又会使噪声衰减量减小,同时消声频宽进一步变窄。这种趋势本身就说明了在给定条件下,存在声阻的优化值。文献[5]的试验结果和文献[6]的优化结果也从趋势性上证实了该结论。

图4结果表明(R^*, d^*, L^* 同图1):随着声衬面板特征频率 f_0^* ($f_0^* > 0.75$)的增大,调谐频率逐渐向高频方向移动,同时噪声峰值衰减量亦有所增加(面板特征频率会影响声衬面板的声抗^[4], $11.16 < f_0^* < \infty$ 时,管内噪声衰减谱没有明显的变化)。

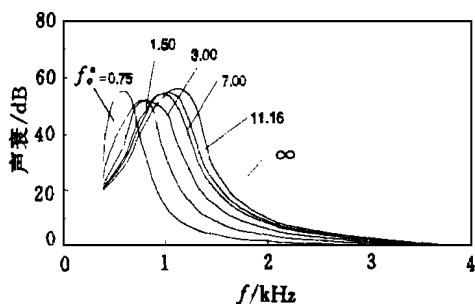


图4 面板特征率对声衰减量的影响
($Ma_0 = -0.2$; $\delta^* = 0.01$)

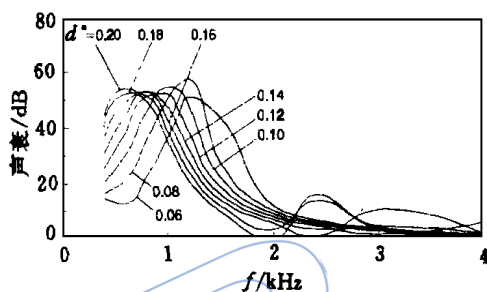


图5 声衬腔深对声衰减量的影响
($Ma_0 = -0.2$; $\delta^* = 0.01$)

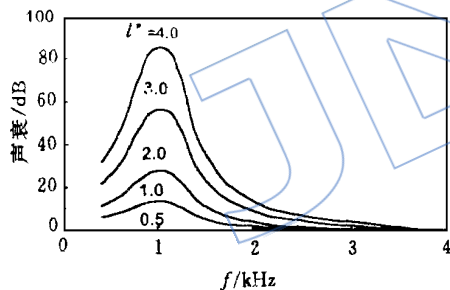


图6 管长 L^* 对声衰减量的影响
($Ma_0 = -0.2$; $\delta^* = 0.01$)

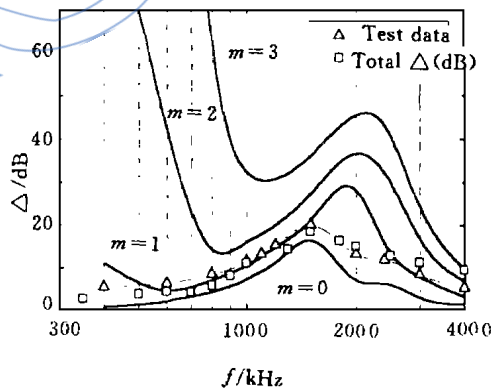


图7 各周向模态噪声衰减和总噪声衰减谱
 $Ma_0 = -0.2$ $R^* = 1.42$
 $f_0 = 15000$ Hz, $\delta^* = 0.015$

由图5可以看出(R^*, f_0^*, L^* 同图1),随着声衬空腔深度的减小,调谐频率向高频方向移动,并且噪声峰值或增或减出现了适度的波动,由此可知,对于给定条件存在声衬腔深的优化值。文献^[6]的优化结果也从趋势上证实了该结论。图6表明(R^*, f_0^*, d^* 同图1):管长越长,噪声峰值衰减量也就越大。

此外,在周向模态 $m = 0, 1, 2, 3$,径向模态 $n = 1, 2, \dots, 12$ 情况下,对有流圆形管道各周向模态噪声衰减和总噪声衰减谱进行了数值计算,并将总噪声衰减谱计算结果与相同条件下文献[7, 4]试验测得的总噪声衰减数据进行了对比,如图7所示($d = 25.4$ mm, $D = 0.4222$ m, L

$= 0.8128 \text{ m}$, $c = 347.02 \text{ m/s}$)。从中可以看出: 管内总噪声衰减谱预测值与实测值是基本吻合的, 只是在频率高于 3 kHz 时预测值与实测值偏差略大一些。

4 结 论

在文献[3]基础上, 建立了多段声衬平均流圆形管道声传播工程计算模型, 并进行了算例计算。通过均匀流和剪切流情况下, 各物理参量对管内噪声衰减影响研究表明: 管内噪声峰值衰减量和调谐频率由圆管声衬声阻、面板特征频率(影响面板声抗)和腔深、平均流 Mach 数以及附面层厚度和管长等参数决定。在给定管道几何尺寸、声衬声阻抗和附面层厚度条件下, 噪声峰值衰减量和调谐频率, 无论是对于进气管道, 抑或是对于排气管道都在很大程度上取决于气流 Mach 数。从理论上讲, 随着气流 Mach 数的增大, 对于排气管道管内峰值消声量减小, 调谐频率向高频方向移动; 而对于进气管道峰值消声量增大, 同时调谐频率向低频方向移动。随着管壁附面层厚度增加, 对于进气管道, 管内噪声的衰减量趋于减小, 而且调谐频率向高频方向移动; 而对于排气管道, 附面层折射对噪声衰减量的影响几乎可以忽略(剪切流存在使进气管道消声量降低, 而使排气管道消声量略有增加)。因此不妨将管内声传播理论应用于飞机发动机管道内噪声衰减预测中, 对于进气管道采用剪切流预测模型, 而对于排气管道采用均匀流预测模型。这对于简化飞机发动机管道内噪声工程预测模型十分有益。最后通过对有流圆管管内总噪声衰减谱计算值和文献[7, 4]实测值的相互对比, 也进一步验证了考虑剪切流影响圆管管内声传播工程预测模型的可行性。

参 考 文 献

- 1 吕亚东, 胡宗安, 孙晓峰, 周盛. 均匀流等截面圆环形排气管道中声传播的数值模拟. 航空学报, 1993, 14(8): 337– 343
- 2 Syed A A, Motsinger R E, et al. Turbofan Aft Duct Suppressor Study. NASA CR- 175067, July 1983
- 3 吕亚东, 胡宗安, 孙晓峰, 周盛. 多段声衬均匀流圆形管道中声传播的工程计算. 航空学报, 1994, 15(2): 253– 256
- 4 Ko S H. Sound Attenuation in Acoustically Circular Ducts in the Presence of Uniform Flow and Shear Flow. Journal of Sound and Vibration, 1972, 22: 193– 210
- 5 吕亚东. 航空发动机短舱管道气动声学研究: [博士学位论文]. 北京航空航天大学, 1993
- 6 Lu Yadong, Wang Qinghuan, Hu Zongan, Cui Jiya. Optimization of Acoustic Impedance, Geometric Structure and Operating Condition of Liners Mounted in Engine Duct. Chinese Journal of Aeronautics, 1996, 9(3): 193– 263
- 7 Mohring. Energy flux in duct flow. Journal of Sound and Vibration, 1971, 18: 101– 109

(责任编辑 杨再荣)

the effects of fuel types on its performance were investigated. In the investigation, gasoline, kerosene, ethyne and hydrogen were taken as the fuel and the oxidizer is air. The PDE model was designed by authors. The performance of PDE, such as averaged thrust, specific impulse and specific fuel consumption, were calculated and analysed respectively with each type of fuel. The gasoline/air mixture was tested in PDE model to verify the calculating method. The experimental results were consistent with the calculated ones on the whole, so that the conclusion drawn from the calculated results can serve as theoretical foundation for reasonable selection of the fuel.

Key Words Fuels Performance analysis Pulsed Detonation engine
Aircraft engines

EFFECTS OF PHYSICAL PARAMETERS OF CIRCULAR DUCT IN SHEAR FLOW ON SOUND ATTENUATION

Lu Yadong

(*Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Hu Zongan and Cui Jiya

(*4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083*)

ABSTRACT

Engineering prediction models of sound propagation in a circular duct with segmented liners in uniform flow and shear flow are established by means of the modal analysis method. The effects of the physical parameters, such as boundary layer thickness, mean flow Mach number, acoustic resistance, characteristic frequency of the facing sheet, cavity depth, and duct length on the in-duct sound attenuation have been determined for a numerical example. In addition, the test data of total sound attenuation in a duct with flow, published by other authors, have been used to verify the feasibility of the engineering prediction method provided.

Key Words Shear flow Sound propagation Modal analysis

RANGE EXTENSION OF ENGINE FLIGHT TEST BED WITH THROTTLE SCREEN

Wang Rugen (*1st Dept. Air Force Engineering College, Xi'an 710038*)

Shi Tingmo (*Flying Test Research Institute, Xi'an 710089*)

ABSTRACT

An approach to extending test range of the engine flight test bed by mounting a throttle screen before the tested engine is proposed. The relevant design principles of the throttle screen are given. The extended test limits by mounting a given throttle screen have been calculated. The rationality and feasibility of the approach have been proved by comparison of the calculated results with pressure loss data of an aircraft air-inlet screen.

Key Words Flight test instrumentation Throttling devices Total pressure