

Optimization and Analysis of Acoustic Impedance of Duct Wall Based on Virtual.Lab Acoustics

Weiguang Zheng, Peng Xu, Zeyu Lin, Rongjiang Tang

School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi
Email: 357793224@qq.com, weiguang.zheng@foxmail.com

Received: May 14th, 2018; accepted: May 29th, 2018; published: Jun. 5th, 2018

Abstract

For acoustic model of the finite length duct, in order to make the duct noise achieve the maximum attenuation in a wide frequency band, based on the acoustic finite element method, the acoustic software Virtual.Lab Acoustics is used to optimize the impedance parameters of the acoustic liner of duct. The optimal values of the acoustic impedance and the acoustic impedance of the acoustic liner under the rectangular cross-section duct are figured out. The influence of the grazing flow, the length of the acoustic liner and the laying way on the optimal acoustic impedance and the transmission loss of duct are discussed. The sensitivity analysis of the acoustic impedance parameters is also given, which provides a theoretical basis for the realization of hybrid active/passive sound absorption.

Keywords

Duct Noise, Finite Element Method, Optimal Acoustic Impedance, Transmission Loss, Sensitivity Analysis

基于Virtual.Lab Acoustics的管道壁面声阻抗优化分析

郑伟光, 许 鹏, 林泽宇, 唐荣江

桂林电子科技大学, 机电工程学院, 广西 桂林
Email: 357793224@qq.com, weiguang.zheng@foxmail.com

收稿日期: 2018年5月14日; 录用日期: 2018年5月29日; 发布日期: 2018年6月5日

摘要

针对有限长管道声学模型,为了使管道噪声在较宽的频带内达到最大的衰减,本文基于声学有限元理论,利用声学软件Virtual.Lab Acoustics对管道声衬阻抗参数进行优化。计算出矩形截面管道下,壁面声衬的声阻与声抗最优值,讨论了管内切向气流、声衬长度、声衬铺设方式对最优声阻抗值和管道传递损失的影响,并对声阻抗参数进行了灵敏度分析,为后续管道主被动复合吸声的实现提供了一定的理论依据。

关键词

管道噪声, 声学有限元, 最优声阻抗, 传递损失, 灵敏度分析

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前,管道内降噪一般是通过在内壁面铺设声衬来实现,但在低频时的吸声效果并不理想。近年来,LMFA 实验室 Galland 等人发展了通风管道主被动复合吸声理论[1] [2] [3] [4],建立了一套被称为“Matisse”的通风管道复合吸声测试系统,以多孔吸声材料作为被动吸声层,实现了 2500 Hz 以下宽频范围显著的消声效果。在最优阻抗方面, Betgen [5]基于矩形管道模型,以多孔吸声材料作为被动吸声层,采用模态展开法求解了管道壁面最优阻抗值,并对比 Cremer 和 Tester [6]等人研究所得经验公式,表明该方法能够准确预测矩形管道壁面最优声阻抗值。

本文基于声学有限元法,采用声学软件 Virtual.Lab Acoustics 对有限长管道声学模型进行壁面声阻抗优化,求解出特定频率下的壁面最优声阻抗值。讨论了在不同管道边界条件下,声阻阻抗值的变化规律。相比于模态展开法,有限元仿真法能够更快的计算出特定频率下壁面最优声阻抗,所得数值最优解与理论值基本一致,且能够适应多种不同的截面形状及边界条件,更适用于工程实际。

2. 有限元管道声模型

如图 1 所示矩形管道,在管道上壁面敷设一段声衬,其阻抗率为 Z 。本文假设在管道中传播的是沿管轴方向的一维平面波,且存在切向均匀气流,速度为 U_0 。

假设所有声学变量都与时间成 $e^{i\omega t}$ 的简谐关系,管内声传播满足对流 Helmholtz 方程[7]

$$\left(ik + M \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 p - \nabla^2 p = 0 \quad (1)$$

其中, $k = \omega/c_0$, $M = U_0/c_0$, c_0 为声速, $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ 为拉普拉斯算子。

在刚性壁面 $y = 0$ 与 Z 上,法向声质点速度为零。等价于

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0, \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

对于存在阻抗的壁面 $y = h$, Ingard-Myers [8] [9]阻抗壁面条件为

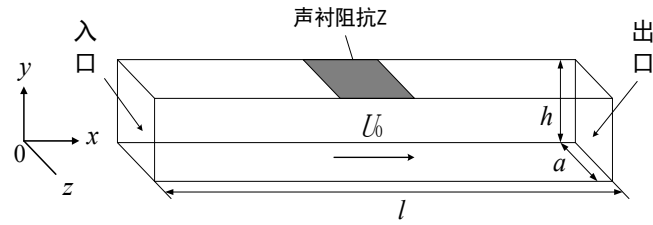


Figure 1. Schematic diagram of duct
图 1. 管道模型示意图

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -ik \left(1 + \frac{M}{ik} \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 \frac{p}{Z} \quad (3)$$

对于式(1)所表示的对流 Helmholtz 方程，采用声学有限元法求解，在求解前需要把计算的声场离散成一定数量的小声场单元，单元之间通过节点连接，每个单元的声压由节点的声压来确定，节点的声压与任意点的声压由形函数来表达。

$$p = \sum_{i=1}^q N_i^e p_i = [N]^T [p_i] \quad (4)$$

式中 $[N]$ 为形函数， $[p_i]$ 为节点声压。

式(1)在三维声场 v 中权重积分表达式为

$$\int_v \tilde{p} \left[\left(ik + M \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 p - \nabla^2 p \right] dV = 0 \quad (5)$$

式中： \tilde{p} 为权重函数，根据高斯定理，上式可转化为

$$\int_v \tilde{p} \left[\left(ik + M \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 p - \nabla^2 p \right] dV = \int_{\Omega} \tilde{p} \left(\frac{\partial p}{\partial n} \right) d\Omega \quad (6)$$

其中 Ω 为计算域中的边界，一般分为三类边界条件：

刚性壁面边界条件 Ω_r

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

法向质点速度边界条件 Ω_v

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -j\rho_0 \omega u_n \quad (8)$$

法向阻抗边界条件 Ω_z

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -j\rho_0 \omega \frac{p}{Z_n} \quad (9)$$

则

$$\Omega = \Omega_r + \Omega_v + \Omega_z \quad (10)$$

假设 \tilde{p} 和 p 具有相同的形函数，将式(4)与式(7)至式(10)代入式(6)中，经整理可得

$$\int \left\{ [K] + j\rho_0 \omega \frac{1}{Z_n} [C] - k_0^2 [C] \right\} [p_i] = -j\rho_0 \omega u_n \quad (11)$$

式中

$$[K] = \int_r [N_g] \cdot [N_g]^T dV [M] = \int_r [N] \cdot [N]^T dV$$

$$[C] = \int_{\Omega_z} [N] \cdot [N]^T dV$$

$$[F] = \int_{\Omega_v} [N] d\Omega$$

其中 $[K]$ 为声学刚度矩阵, $[C]$ 为声学阻尼矩阵, $[F]$ 为声学激励。

在得到形函数的情况下, 求解式(11)就可以得到节点处的声压。

为验证本文方法的准确性, 采用文献[2]同样的模型。管道截面形状为正方形, 边长取 0.066 m, 管长度取 1.2 m。管道内壁边存在两种边界条件, 即刚性壁面条件与阻抗边界条件。在管道入口处施加单位速度边界条件, 出口施加无反射边界属性。管道壁面为刚性, 声衬处采用法向阻抗边界条件。管道采用六面体声学网格, 网格大小为 6 mm, 计算频率区间取 500 Hz 到 1500 Hz, 网格单元数量为 2.42 万(图 2)。

3. 壁面声衬最优声阻抗

管道的消声效果一般用传递损失或者插入损失来衡量, 由于本文主要以数值仿真计算为主, 故使用传递损失来衡量。当管道的传递损失达到最大的时候, 这时的壁面阻抗称之为最优阻抗。在 LMS Virtual.Lab Acoustic 优化模块中将管道传递损失设为目标优化对象, 声阻抗实部与虚部为变量参数, 结合声学有限元模块进行全局求解优化计算。

3.1. 声学仿真优化计算

模型的边界条件与优化参数的设置直接影响到声学仿真优化的准确性, 本文采用 Tester [6]研究所得的经验公式算出初始阻抗值, 并在此基础上进行优化。以下表 1 与表 2 分别对应管内无流与有稳定切向流两种情况下, 壁面最优声阻抗 $Z (Z = Z_0/\rho_0c_0, Z_0$ 为最优阻抗值, ρ_0c_0 为空气特性阻抗, 本文取 $416.5 \text{ kg/m}^2/\text{s}$) 和传递损失, 并将最优阻抗数值解与文献[5]的优化结果进行了对比(图 3)。

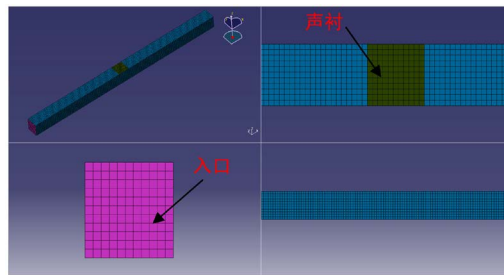


Figure 2. The finite element model of duct
图 2. 管道有限元模型

Table 1. Optimal acoustic impedance and transmission loss at specific frequency ($M = 0$)

表 1. 标管道内无切向汽流下($M = 0$), 壁面最优声阻抗 Z 和传递损失 TL

频率(Hz)	Z	文献[5]中 Z	TL (dB)	文献[5]中 TL (dB)
500	$0.059 - 0.120i$	$0.06 - 0.12i$	40.7	39.8
700	$0.089 - 0.168i$	$0.09 - 0.17i$	44.3	41.9
900	$0.113 - 0.225i$	$0.11 - 0.23i$	41.8	40
1100	$0.140 - 0.280i$	$0.14 - 0.28i$	50.9	49.2
1300	$0.165 - 0.337i$	$0.16 - 0.33i$	39.9	39.2
1500	$0.190 - 0.412i$	$0.19 - 0.42i$	58.8	59.1

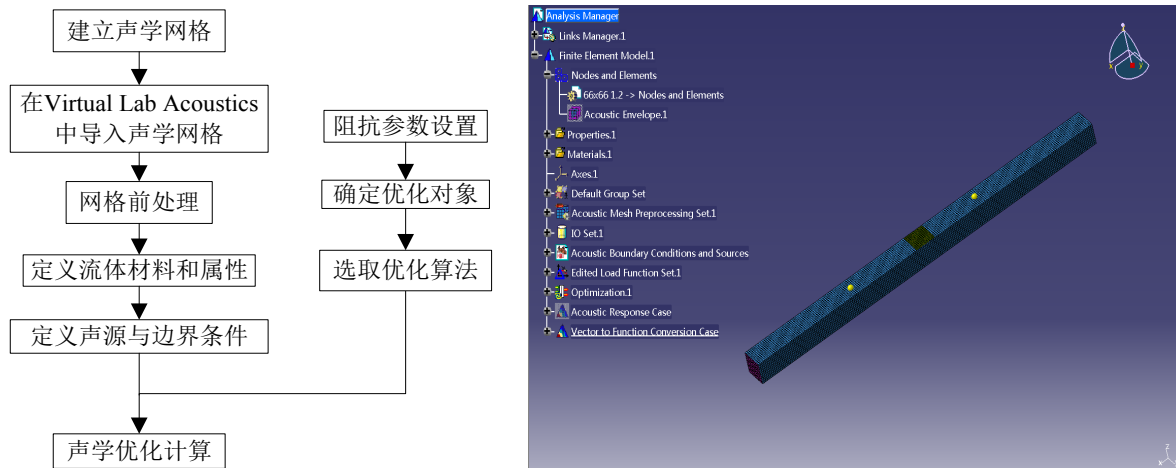


Figure 3. The process and calculation of duct sound field simulation

图 3. 管道声场仿真流程与计算

Table 2. Optimal acoustic impedance and transmission loss at specific frequency (M = 0.1)

表 2. 管道内存在切向汽流下(M = 0.1), 壁面最优声阻抗 Z 和传递损失 TL

频率(Hz)	Z	文献[5]中 Z	TL (dB)	文献[5]中 TL (dB)
500	0.030 - 0.036i	0.03 - 0.035i	29.4	31.1
700	0.051 - 0.067i	0.05 - 0.065i	45.1	42.5
900	0.079 - 0.117i	0.08 - 0.12i	50.1	48.8
1100	0.096 - 0.171i	0.09 - 0.17i	34.9	35.6
1300	0.132 - 0.232i	0.12 - 0.23i	48.2	49
1500	0.152 - 0.320i	0.15 - 0.31i	41.3	42.7

由以上表 1 和表 2 可知, 本文采用声学有限元法求解出的壁面最优阻抗值与文献[5]中利用模态展开法优化所得的最优阻抗值及最优传递损失基本保持一致。图 4 对应管道内无切向气流条件下, 管道在最优阻抗值下的声压云图, 图 5 对应管道内存在切向气流下管道在最优阻抗值下的声压云图。

3.2. 最优阻抗值

图 6 中呈现的是特定频率下, 管道壁面的最优阻抗。不论管道内是否存在气流, 最优阻抗的实部随着频率的增大而增大, 虚部随着频率的增大而减小, 且一直为负数。当管道内存在稳定切向流时, 最优阻抗的实部小于无流时的实部, 虚部大于无流时的虚部。

3.3. 不同边界条件下最优阻抗值

从图 7 和图 8 中可以看出, 随着声衬长度的增加, 最优阻抗的实部减小, 而虚部无显著的增大。当在管道的上下壁面对称铺设相同尺寸的声衬时, 最优阻抗的实部与虚部值都有所增大。

4. 声阻抗参数灵敏度分析

为了分析声阻抗对管道传递损失的影响程度, 需对声衬的阻抗参数作灵敏度分析。本文取在特定频率下, 令声阻或声抗其中一项单独变化时, 观察管道传递损失的变化情况。

图 9 中(a)与(b)呈现的是管道在 500 Hz 下, 管道传递损失随声阻与声抗变化情况; (c)与(d)呈现的是

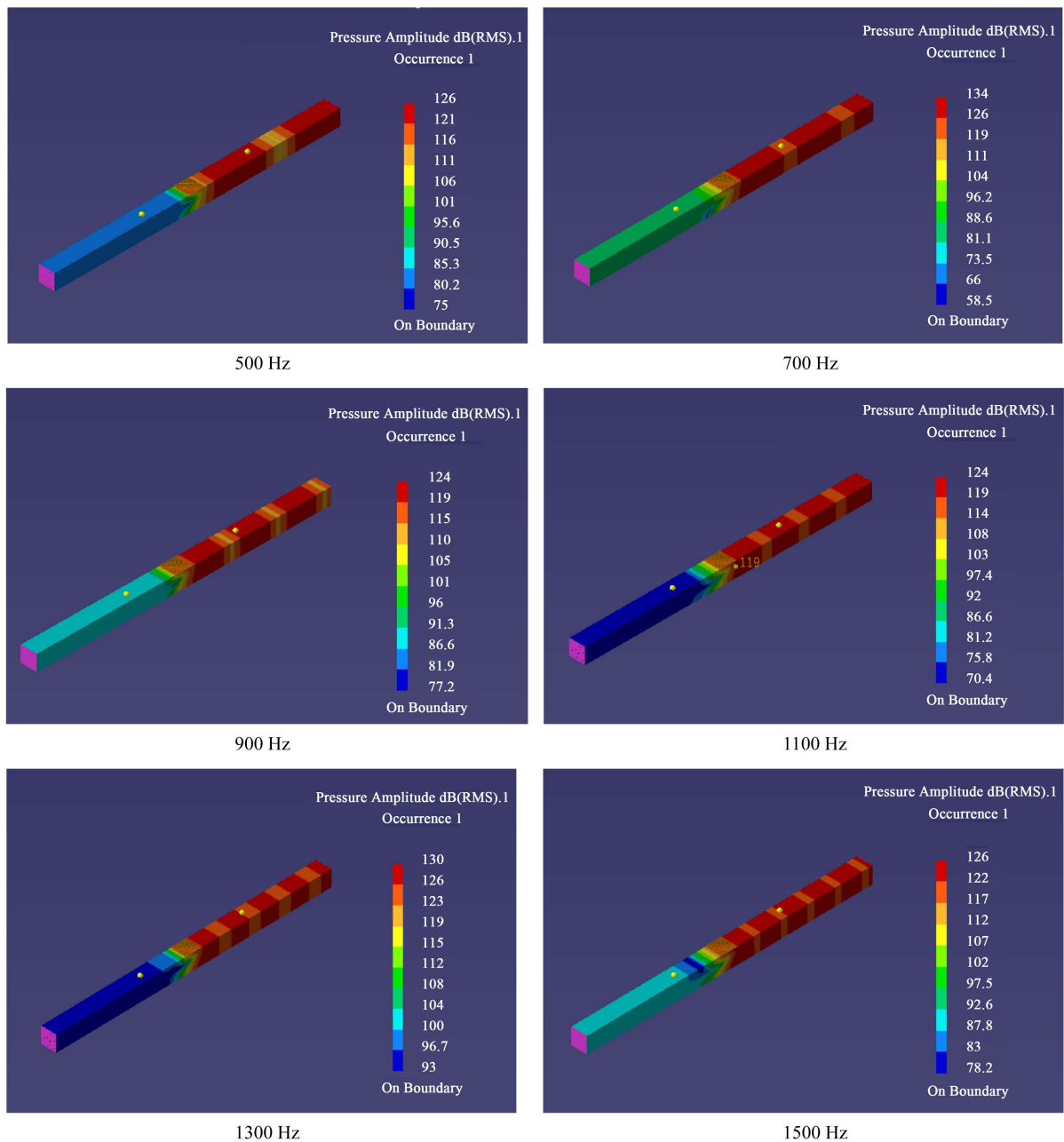


Figure 4. The sound pressure diagram of duct at each frequency ($M = 0$)

图 4. 各频率下管道声压云图($M = 0$)

管道在 1100 Hz 下，管道传递损失随声阻与声抗变化情况；从图中可以看出，声阻与声抗在最优值附近变化时，管道的传递损失有着显著的变化。

图 10 呈现的是 900 Hz 下管道内存在定常切向流，管道传递损失随声阻与声抗变化情况。从图中的曲线的陡峭程度可以看出，当管道内存在气流，声阻与声抗在最优值附近变化时，传递损失值的变化更加明显。

综上，声阻抗值的较小变化会引起管道的传递损失有着显著的变化，而且当管道内存在气流时，这种变化将加剧。

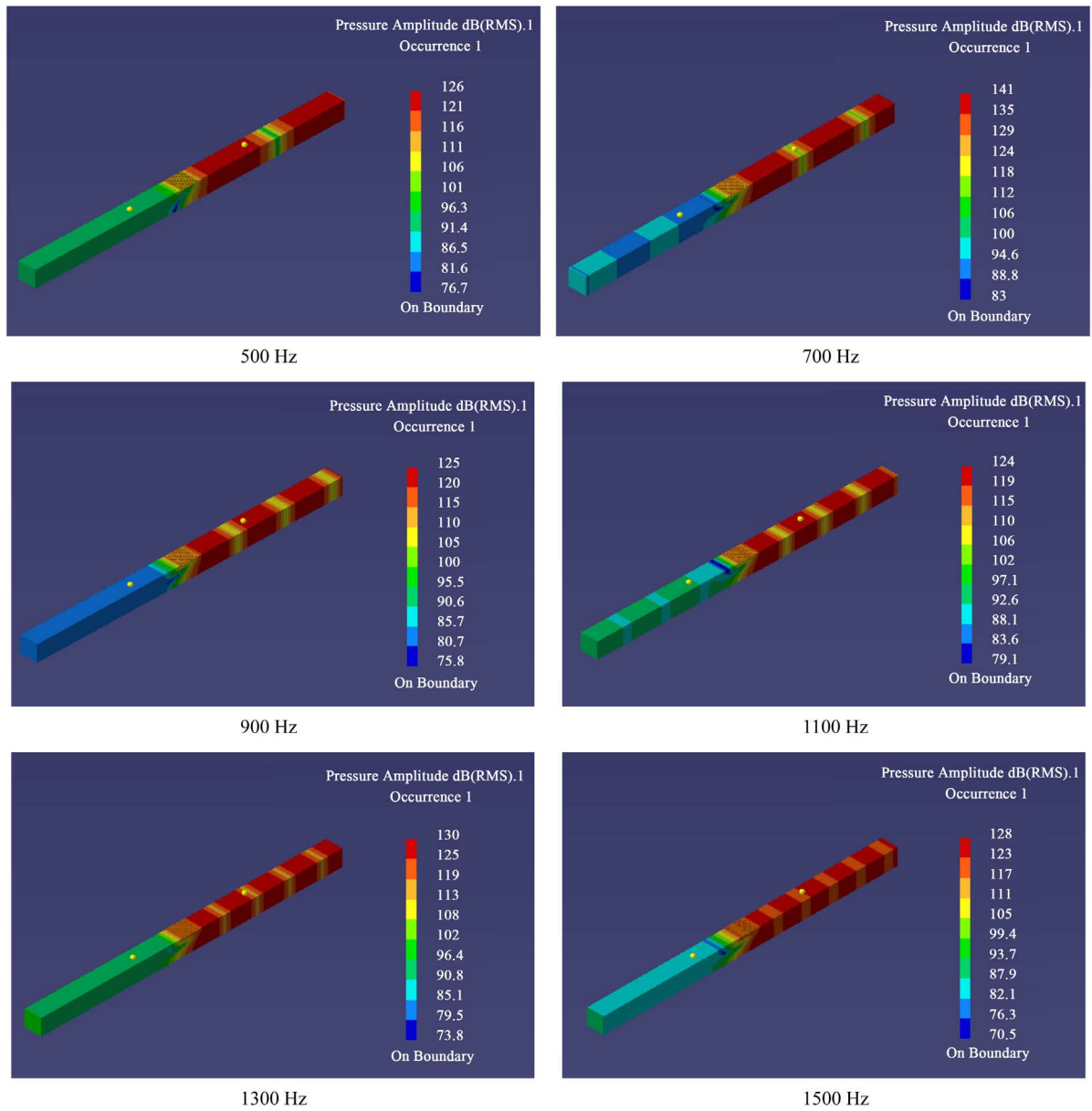


Figure 5. The sound pressure diagram of duct at each frequency ($M = 0.1$)

图 5. 各频率下管道声压云图($M = 0.1$)

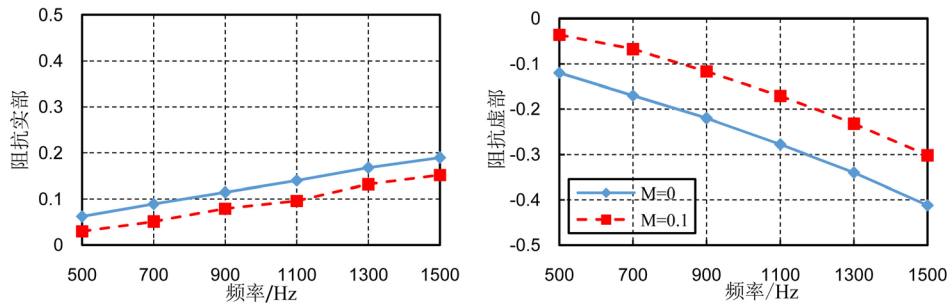


Figure 6. $M = 0$ and $M = 0.1$ optimal impedance comparison

图 6. $M = 0$ 与 $M = 0.1$ 下最优阻抗对比

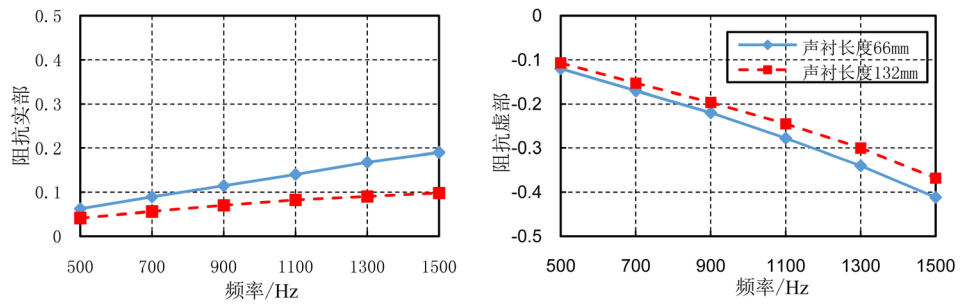


Figure 7. Comparison of optimal impedance at different liner length

图 7. 不同声衬长度下最优阻抗对比

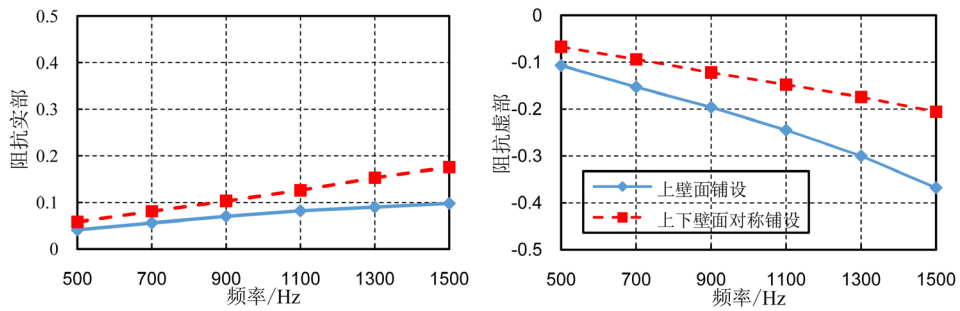


Figure 8. Comparison of optimal impedance indifferent laying way

图 8. 不同铺设方式下最优阻抗对比

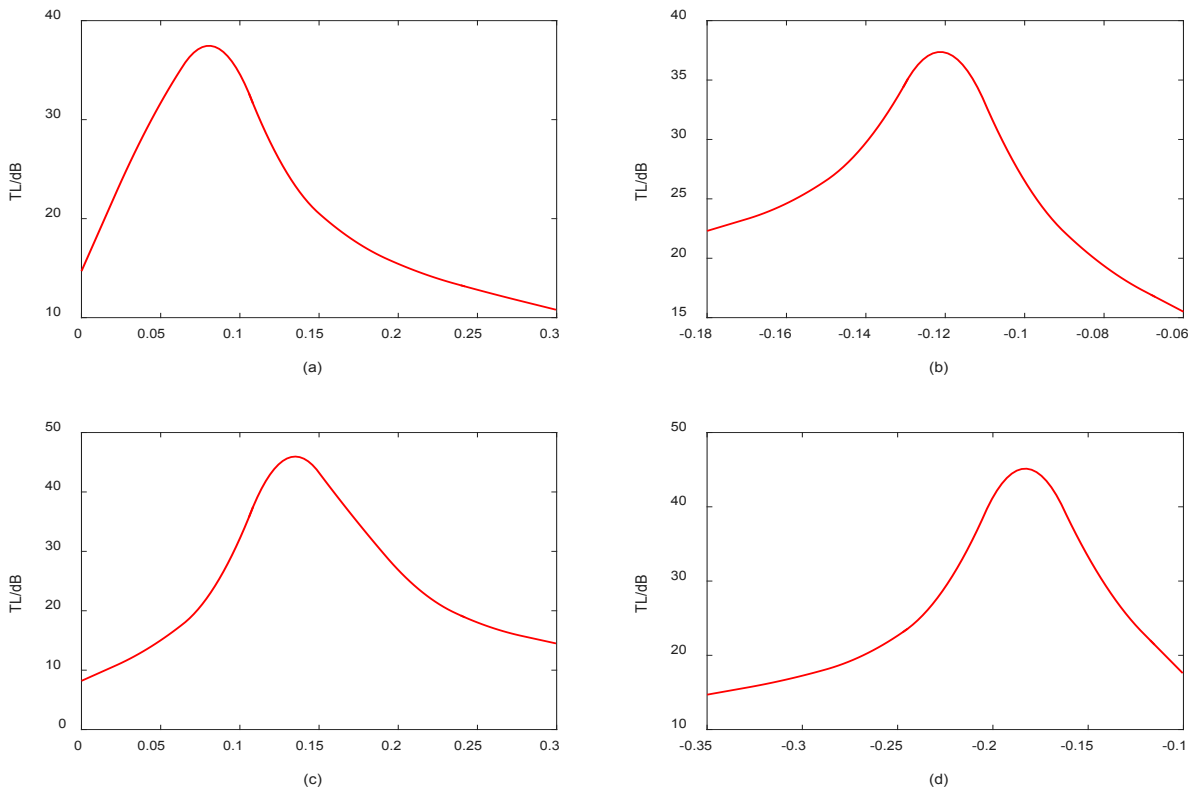


Figure 9. The transmission loss of duct ($M = 0$)

图 9. 管内无切向流($M = 0$)时传递损失

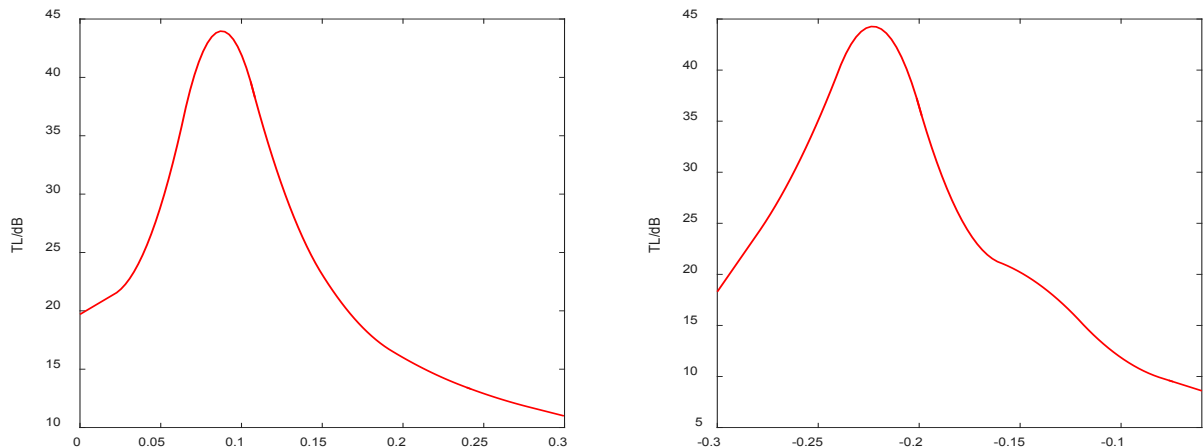


Figure 10. The transmission loss of duct ($M = 0.1$)
图 10. 管内存在定常切向流($M = 0.1$)时传递损失

5. 结论

针对矩形管道壁面最优声阻抗, 本文以声学有限元法为理论基础, 运用 Virtual Lab Acoustics 声学软件进行建模与优化计算, 得出如下结论:

- 1) 无论管道是否存在切向气流时, 最优阻抗值的实部都与频率成正比, 虚部与频率成反比且一直为负值。
- 2) 当管道内存在均匀流动时, 最优阻抗值有明显的变化。实部相比于无流情况下有所减小, 虚部则增大。
- 3) 声衬长度对最优阻抗值的虚部影响不大; 声衬铺设方式的不同对阻抗最优值有较明显的影响。
- 4) 声阻抗值的较小变化都会令管道的传递损失发生显著的改变。

基金项目

国家自然科学基金(51405093); 广西自然科学基金项目(2015GXNSFBA139232)。

参考文献

- [1] Sellen, N., Cuesta, M. and Galland, M.A. (2006) Noise Reduction in a Flow Duct: Implementation of a Hybrid Passive/Active Solution. *Journal of Sound & Vibration*, **297**, 492-511. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.03.049>
- [2] Galland, M.A., Mazeaud, B. and Sellen, N. (2005) Hybrid Passive/Active Absorbers for Flow Ducts. *Applied Acoustics*, **66**, 691-708. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.09.007>
- [3] Betgen, B., Galland, M.A., Piot, E. and Simon, F. (2012) Implementation and Non-Intrusive Characterization of a Hybrid Active-Passive Liner with Grazing Flow. *Applied Acoustics*, **73**, 624-638. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.01.008>
- [4] Betgen, B. and Galland, M.A. (2011) A New Hybrid Active/Passive Sound Absorber with Variable Surface Impedance. *Mechanical Systems & Signal Processing*, **25**, 1715-1726. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.12.006>
- [5] Betgen, B. (2010) Comportement d'un absorbant actif en écoulement: étude théorique et expérimentale. Doctoral Thesis, Ecully Ecole Centrale De Lyon, Lyon.
- [6] Tester, B.J. (1973) The Propagation and Attenuation of Sound in Lined Ducts Containing Uniform or "Plug" Flow. *Journal of Sound & Vibration*, **28**, 151-203. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(73\)80102-6](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(73)80102-6)
- [7] Jing, X., Peng, S. and Sun, X. (2008) A Straightforward Method for Wall Impedance Education in a Flow Duct. *Journal of the Acoustical Society of America*, **124**, 227-234. <https://doi.org/10.1121/1.2932256>
- [8] Ingard, U. (1959) Influence of Fluid Motion past a Plane Boundary on Sound Reflection, Absorption, and Transmis-

sion. *Journal of Acoustical Society of America*, **31**, 1035-1036. <https://doi.org/10.1121/1.1907805>

- [9] Myers, M.K. (1980) On the Acoustic Boundary Condition in the Presence of Flow. *Journal of Sound and Vibration*, **71**, 429-434. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(80\)90424-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(80)90424-1)

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0530, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojav@hanspub.org