

引用格式: 张苗, 漆琼芳, 罗建军. 吸声系数的传递函数法仿真计算[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 527-531. [ZHANG Miao, QI Qiongfang, LUO Jianjun. Simulative calculation of sound absorption coefficient by transfer function method[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(4): 527-531.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.04.014

吸声系数的传递函数法仿真计算

张 苗¹, 漆琼芳¹, 罗建军²

(1. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北武汉 430060; 2. 渤海造船厂集团有限公司, 辽宁葫芦岛 125004)

摘要: 为得到吸声材料的吸声系数, 提出了一种基于 Virtual.Lab Acoustics 平台的阻抗管模拟方法, 建立阻抗管和试件的声学模型, 提取声学计算得到的传声器测点处的复声压, 然后基于传声器间距、传声器与试件距离, 得到传声器测点位置的传递函数及吸声系数。将该方法的计算结果与文献值进行对比, 验证了文中传递函数及吸声系数计算方法的正确性。通过仿真分析了阻抗管直径、传声器测点位置对计算吸声系数的影响, 说明传声器测点位置可极大影响计算的吸声系数。对阻抗管内试件倾斜角度、试件厚度和试件后侧空气柱等对吸声系数的影响进行了定量计算。

关键词: 传递函数法; 吸声系数; 阻抗管; Virtual.Lab Acoustics 平台

中图分类号: TB535+1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-04-0527-05

Simulative calculation of sound absorption coefficient by transfer function method

ZHANG Miao¹, QI Qiongfang¹, LUO Jianjun²

(1. Wuhan Second Ship Design Institute, Wuhan 430060, Hubei, China; 2. Bohai Shipyards Group Co., Ltd, Huludao 125004, Liaoning, China)

Abstract: In order to obtain the sound absorption coefficient of sound absorption material, a simulation method of impedance tube based on Virtual.Lab Acoustics platform is proposed. The acoustic model of impedance tube and specimen is established, and the complex sound pressure at the measured point of microphone is extracted. Then, the transfer function and sound absorption coefficient at the measured point of microphone are obtained based on the distance between microphone and the distance between microphone and specimen. By comparing the calculated results with those in literature, the correctness of the transfer function and the calculation method of sound absorption coefficient in this paper are verified. The influence of impedance tube diameter and microphone location on the calculation of sound absorption coefficient is analyzed by simulation. It is shown that the location of microphone measurement point can affect the calculation of sound absorption coefficient, and the acoustic modes in the impedance tube should be considered for the measurement point arrangement. Quantitative calculations are made for the influences of the specimen tilt angle, specimen thickness and the rear air column of the specimen in the impedance tube on the sound absorption coefficient.

Key words: transfer function method; sound absorption coefficient; impedance tube; Virtual.Lab Acoustics platform

0 引 言

吸声材料广泛应用于建筑、船舶、车辆等的吸声处理中, 吸声系数是材料的一项重要声学性能指标, 目前测试样品的吸声性能测试主要有阻抗管法和混响室法, 阻抗管法认为波是垂直入射的, 依据双传声器的传递函数可得到吸声材料的吸声系数、反射系数、声阻抗、声导纳, 且需要的试件少。混响室法认为入射波是无规则分布, 需借助于混响室且所需试件面积较大^[1]。传递函数是系统输入与输

出间的固有特性, 测量两个传声器的复声压, 根据传声器间距、传声器与试件的间距, 计算传声器之间的复传递函数, 得到试件的法向入射吸声系数^[2]。

目前, 范丹丹^[3]设计了阻抗管结构、采集系统、扬声器等, 形成了一套完整的阻抗管样机系统, 通过理论和试验方法验证了样机的可行性, 通过样机测试了海绵、聚氨酯、木头、鸡蛋棉等吸声材料的吸声系数, 为常用吸声材料的选择提供了一定依据。朱有剑等^[4]基于传递函数的理论研究设计了一套阻抗管, 测量海绵的吸声系数, 将设计的阻抗管测试结果与传统驻波比法进行比较, 验证了所开发系统的准确性, 通过对比试验提出了测量吸声系数时的操作注意事项。梁小光^[5]通过改变材料孔隙率、流阻等计算吸声系数, 认为硅酸盐基多孔材料存在

收稿日期: 2020-04-24; 修回日期: 2020-06-28

作者简介: 张苗(1987—), 男, 湖北荆门人, 硕士, 研究方向为振动噪声控制。

通信作者: 漆琼芳, E-mail: qi_qiongfang@163.com

最佳的流阻和孔隙率。

本文基于 Virtual.lab Acoustics 建立阻抗管和试件的声学模型, 建立声源及传声器位置处场点, 计算吸声材料阻抗, 提取传声器测点处的复声压, 基于传声器间距、传声器与试件距离, 得到传声器测点处的传递函数, 并计算得到试件吸声系数。将本文计算结果与文献值^[6]进行对比, 验证了阻抗管模拟方法及传递函数计算的有效性。探讨了阻抗管直径、传声器测点位置对吸声系数的影响。对阻抗管内试件后侧空气柱、安装倾斜角度、试件厚度等试件安装状态进行定量参数分析。

1 管道声传播及传递函数法

管道内声传播的波动方程^[7]为

$$\frac{\partial^2 p^2(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p^2(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式(1)解的形式为 $p^2(x,t) = f(\omega t - kx) + g(\omega t + kx)$,

其中, x 是位移, t 是时间, ω 是声波角频率, 波数 $k = 2\pi f/c$, f 是频率(Hz), c 是声速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 管中声速 $c = 343.2\sqrt{T/293}$, T 为空气温度(K), p 是管道内声压(Pa)。根据管道硬边界、平面波声源边界, 可计算声学有限元商业软件里传声器测点处的复声压, 然后采用传递函数法, 求出试件的吸声系数。

以图 1 所示实验用阻抗管为例, 阻抗管的试件管一端安装试件, 发声管一端布置有模拟扬声器的平面波声源, 测量靠近试件的两个传声器的声压, 根据传声器间距及与试件距离关系, 可求得两个传声器间的传递函数。

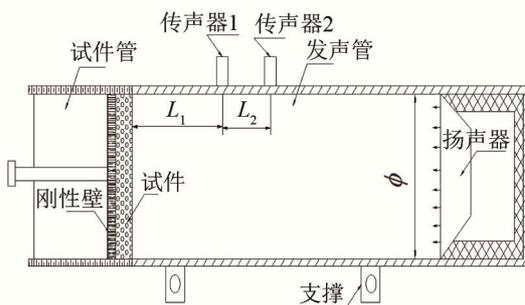


图 1 阻抗管示意图

Fig.1 Schematic diagram of impedance tube

假设管内声波可分解为入射波 p_1 和反射波 p_R , 其声压幅值分别为 P_1 和 P_R , 假设传声器 1 和传声器 2 处的声压分别为 p_1 和 p_2 , 且声压都为复数形式, 根据入射和反射的相位关系可得^[4,8]:

$$p_1 = P_1 e^{jk(L_1+L_2)} + P_R e^{-jk(L_1+L_2)} \quad (2)$$

$$p_2 = P_1 e^{jkL_1} + P_R e^{-jkL_1} \quad (3)$$

管中空气密度 ρ 的表达式为

$$\rho = \rho_0 \frac{p_a T_0}{p_0 T} \quad (4)$$

式中, p_a 是空气压力(kPa); p_0 是基准压力, $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$; ρ_0 是基准密度, $\rho_0 = 1.186 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; j 是虚数单位, k 是波数, $k = \omega/c = 2\pi f/c$, ω 是声波角频率, f 是声波频率, c 是声速。

入射波的传递函数 H_1 为

$$H_1 = \frac{P_{2I}}{P_{1I}} = e^{-jkL_2} \quad (5)$$

反射波传递函数 H_R 为

$$H_R = \frac{P_{2R}}{P_{1R}} = e^{-jkL_1} \quad (6)$$

假设反射系数为 r 为

$$P_R = r P_1 \quad (7)$$

传声器 1 到传声器 2 的复传递函数 H_{12} 为

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} \quad (8)$$

由传声器 1 和传声器 2 处的复声压, 可得互功率谱 S_{12} 为

$$S_{12} = p_1 \cdot p_2^* \quad (9)$$

由传声器 2 和传声器 1 处的复声压, 得互功率谱 S_{21} 为

$$S_{21} = p_2 \cdot p_1^* \quad (10)$$

两个传声器位置处的传递函数为

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} = \frac{S_{22}}{S_{21}} \quad (11)$$

根据式(7)~(10)推导出:

$$H_{12} = \left(\frac{S_{12} \cdot S_{22}}{S_{11} \cdot S_{21}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

式中: S_{11} 是传声器 1 的自功率谱; S_{22} 是传声器 2 的自功率谱; S_{12} 是传声器 1 与传声器 2 的互功率谱; S_{21} 是传声器 2 与传声器 1 的互功率谱。 H_{12} 写成复数形式为

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk(L_1)} + r e^{-jk(L_1)}}{e^{jk(L_1+L_2)} + r e^{-jk(L_1+L_2)}} \quad (13)$$

反射系数 r 为

$$r = \frac{H_{12} - H_1}{H_R - H_{12}} e^{jk(L_1+L_2)} \quad (14)$$

吸声系数 α 为

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (15)$$

若采用平面质点振动模拟平面波声源, 阻抗管内某位置 i 处声压 p_i 与振速 v_i 满足:

$$p_i = \rho c v_i \quad (16)$$

式中: ρ 为阻抗管内空气密度, c 为阻抗管内声速。

2 吸声系数声学计算模型

2.1 阻抗管模型的建立

建立阻抗管的空气层、试件的三维模型并划分网格，将网格导入 LMS Virtual.Lab Acoustics 商业软件，进行声学网格前处理，建立传声器场点。实验条件下的声源是扬声器，已知阻抗管内扬声器可以产生平面波和非平面波，非平面波在大于 3 倍管径的位置会衰减，因此在施加平面波声学模拟扬声器时，声源离传声器距离至少为 3 倍管径^[2]，为覆盖吸声系数的测试频段 100~6 300 Hz，使用以下 3 种阻抗管：

(1) 大管：直径 $\varphi=100\text{ mm}$ ，大阻抗管长 520 mm。传声器 1 与试件间距 $L_1=50\text{ mm}$ ，传声器 1 与传声器 2 间距 $L_2=80\text{ mm}$ ，吸声系数测试范围 63~1 600 Hz。

(2) 大管：与(1)中大管的尺寸一样，传声器 1 与试件距离 $L_1=50\text{ mm}$ ，传声器 1 与传声器 2 间距 $L_2=300\text{ mm}$ ，吸声系数测试范围 1 000~5 000 Hz。

(3) 小管：直径 $\varphi=30\text{ mm}$ ，小阻抗管长 380 mm。传声器 1 与试件间距 $L_1=15\text{ mm}$ ，传声器 1 与传声器 2 间距 $L_2=25\text{ mm}$ ，吸声系数测试范围 1 600~6 300 Hz。

本算例以质点振动模拟平面波声源，得到传声器测点 1 和传声器测点 2 的振速如图 2 所示，经过式(16)计算得到相应的声压，经过式(2)~(15)进行数据后处理计算，得到吸声系数。

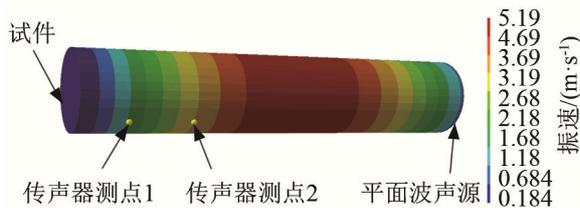


图 2 直径 100 mm 阻抗管的振速云图
Fig.2 Vibrating velocity nephogram in $\varphi 100\text{ mm}$ impedance tube

2.2 模型有限性验证

为了验证本声学计算模型和传递函数后处理编制计算程序的有效性，采用文献[3]中的算例，大管直径 100 mm，传声器与试件最近距离 $L_1=50\text{ mm}$ ，传声器间距 $L_2=80\text{ mm}$ ，计算频率范围 500~2 500 Hz，步长为 20 Hz，毛毡厚度 20 mm，空气密度为 $1.225\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，声速为 $340\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，毛毡流阻为 $23\ 150\text{ Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ，孔隙率为 0.93，结构因子为 1，网格尺寸为 10 mm，得到的吸声系数曲线与文献

Delany-Bazley-Miki 公式^[6]的对比情况如图 3 所示，可知两者结果吻合较好，证明了本阻抗管声学模型及边界条件施加的有效性，验证了传声器测点复声压并求取传声器之间的传递函数的有效性，也验证基于 LMS Virtual.Lab Acoustics 平台导出测点复声压、根据传递函数后处理计算吸声系数是可行的。

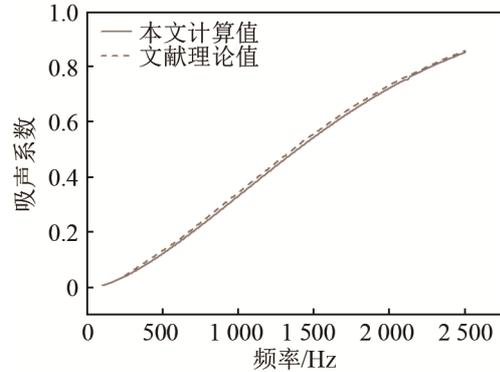


图 3 计算值与文献[6]公式计算值对比
Fig.3 Comparisons between calculated values in this paper and in literature[6]

2.3 模型分频段

根据实验用三种阻抗管类型，将传声器测点的复声压导出，按照公式计算出试件的吸声系数，计算频率范围 100~6 200 Hz，步长 20 Hz，得到的吸声系数曲线如图 4 所示。图 4 中大管 100(50-80)代表模拟的直径 10 mm 大阻抗管，传声器与试件最近距离 $L_1=50\text{ mm}$ ，传声器间距 $L_2=80\text{ mm}$ 。在 3 900 Hz 以上，小管模拟的吸声系数比大管大，按照试验用阻抗管分频段计算，在重叠频率采用求平均值插值后再拟合的方法，最终合成的吸声系数曲线，按照以上原则，在频段交界处拟合，得到最终试件的吸声系数。

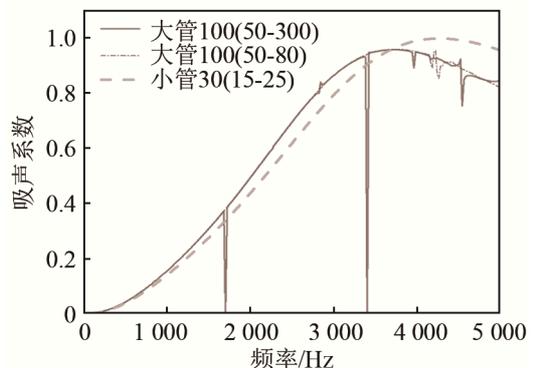


图 4 三种阻抗管计算的吸声系数曲线
Fig.4 Sound absorption coefficient curves of three types of impedance tubes

传声器布置位置对吸声系数计算的影响如图 5 所示。由图 5 可知，以测试用直径为 100 mm 的大阻抗管为模型，当传声器位置不同时，分析频段为

100~6 300 Hz。实验室用大管(50-80)(代表 $L_1=50$ mm, $L_2=80$ mm, 其余类推)可测试 400~1 600 Hz 频段而不出现试件阻抗率畸变, 大管(50-300)在测试 125~500 Hz 频段内仿真模拟的阻抗管, 在该频段内均没有低谷, 不会出现试件阻抗率畸变。所以实验室用阻抗管采用大管(50-80)的传声

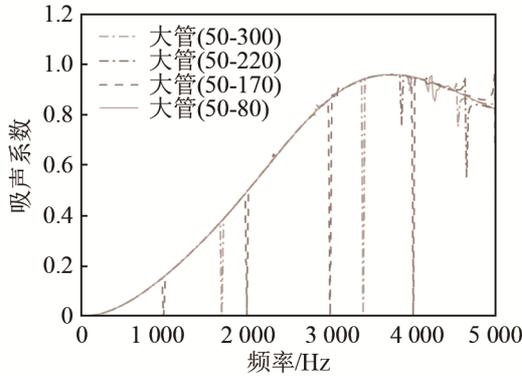


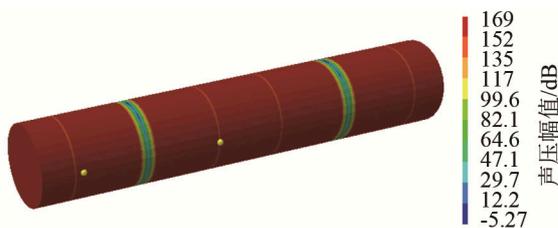
图5 传声器布置位置对吸声系数计算的影响
Fig.5 The influence of microphone location on the calculation of sound absorption coefficient

器测点布置有其合理性, 而大管(50-170)和大管(50-300)出现了几个明显的低谷, 存在声阻抗率畸变。

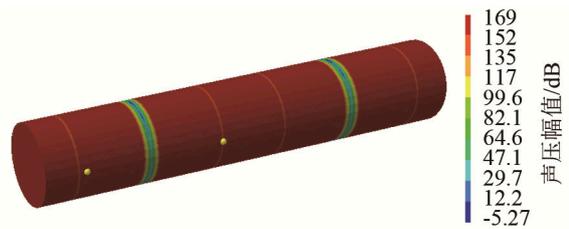
根据曲线低谷捕捉可知, 大管 100(50-300)在 1 660、3 360、5 060、5 660 Hz 时吸声系数均有极小值出现, 大管 100(50-170)在 960、1 960、2 960、3 960、4 960、5 960 Hz 时均有吸声系数曲线极小值出现, 可能与管内声模态有关, 对直径 100 mm 大管进行声模态计算, 模态频率如表 1 所示, 在 1 960 Hz 左右出现峰值, 声模态云图如图 6 所示。两种情况下传声器测点处于声压云图较接近部位, 采用阻抗管法仿真计算吸声系数时, 传声器测点对声阻抗率影响较大, 可能引起噪声吸声系数曲线位置的选择畸变。

表 1 阻抗管内声模态
Table 1 Acoustic modes in impedance tubes

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	6.5×10^{-4}	7	1 961.5
2	326.9	8	1 996.9
3	653.8	9	2 023.5
4	980.7	10	2 101.2
5	1307.7	11	2 224.0
6	1634.6	12	2 288.0



(a) 大管 100(50-300)第 6 阶声模态



(b) 大管 100(50-170)第 7 阶声模态

图 6 直径 100 mm 大管的声模态云图

Fig. 6 Sound modal nephogram in ϕ 100 mm tube

3 试件安装状态对吸声系数的影响

阻抗管测试规范^[2]对试件的安装提出了适当要求, 可通过仿真探讨试件安装状态对吸声系数的影响, 阻抗管安装参数主要包括试件后侧与刚性壁是否紧贴、试件厚度是否均匀、试件安装是否平整等。

3.1 试件后侧空气层厚度

模拟大阻抗管: 管径 $\phi=100$ mm, 施加厚 9 mm 的文献[3]用吸声材料, 传声器位置 $L_1=50$ mm, 传声器位置 $L_2=80$ mm, 当试件管的刚性壁与试件管内的间距分别为紧密接触(0 mm 空气层)、10 mm 厚空气层、20 mm 厚空气层、30 mm 厚空气层时, 仿真得到传声器测点的复声压, 将导出结果进行传递函数后处理, 得到的试件吸声系数曲线如图 7 所示。

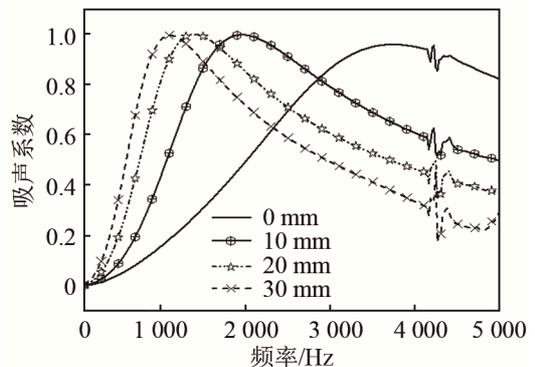


图 7 试件后侧空气层厚度对吸声系数的影响

Fig.7 The influence of the rear air layer thickness of the specimen on the sound absorption coefficient

根据试件后侧空气层模拟可知, 试件在安装时后侧的空气层厚度对吸声系数有明显影响, 随着空气层厚度的增加, 吸声系数曲线向低频移动。在进行阻抗管试验时, 试件与后侧刚性壁应安装紧密, 避免出现空气层。

3.2 试件厚度对吸声系数影响

模拟大阻抗管: 管径 $\phi=100$ mm, 施加文献[3]用吸声材料, 传声器位置 $L_1=50$ mm, 传声器位置 $L_2=80$ mm。当试件厚度分别为 4、9、19、29 mm

时，吸声材料厚度对吸声系数的影响如图 8 所示。
 由图 8 可知，在一定厚度范围内，随着试件厚度的增加，吸声系数曲线有向低频移动的趋势。

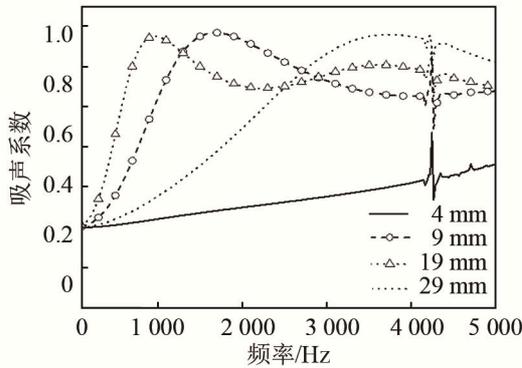


图 8 试件厚度对吸声系数的影响
 Fig.8 Effect of specimen thickness on sound absorption coefficient

3.3 试件倾斜度对吸声系数影响

假设试件在安装时不平整有角度倾斜，则大管 100(50-80)在试件平整和试件法向有 5° 倾斜的安装状态下，计算的吸声系数曲线如图 9 所示，试件一定角度的偏转使吸声系数曲线呈现无规则状态。综合如图 10 所示的声压云图可知这种无规则状态与靠近试件的传声器 1 的声场处于非平面波状态有关，在阻抗管设计时，传声器 1 与试件应适当隔开一定距离，以确保传声器 1 和传声器 2 均处于平面波声场中，且传声器 1 和传声器 2 应避免使计算出的声阻抗率产生畸变的位置。

通过以上分析可知，为确保阻抗管内是平面波

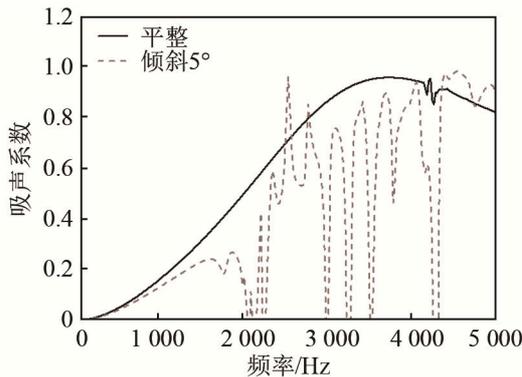


图 9 试件倾斜度对吸声系数的影响
 Fig.9 Effect of specimen tilt angle on sound absorption coefficient

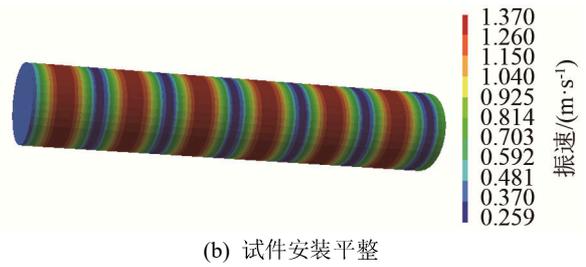
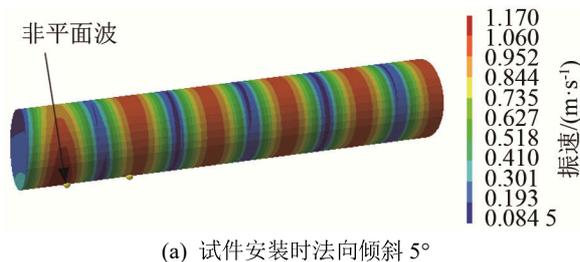


图 10 试件不同倾斜度时的振速云图
 Fig.10 Vibrating velocity nephograms with different specimen tilt angles

声场，试件厚度应均匀，且传声器 1 内与试件应保持一定距离，使传声器测点均处于平面波声场中。

4 结论

本文建立了阻抗管的声学模型并借助于 Virtual.lab Acoustic 软件进行声学计算，提取阻抗管传声器测点的复声压，基于传递函数法得到试件吸声系数。探讨了阻抗管直径及模拟阻抗管传声器测点对计算结果的影响，并对试件安装状态对吸声系数的影响进行分析，总结如下：

- (1) 将该值与文献值进行比较，验证了模拟阻抗管声学模型及传递函数计算的有效性。
- (2) 模拟阻抗管时，传声器测点位置的选择与管道内声模态有关，应避免吸声系数极小的情况。
- (3) 在进行阻抗管测试吸声系数实验时，试件后侧的空气层可使吸声系数曲线向低频方向移动，因此实验时应使试件紧贴着刚性壁。
- (4) 试件安装应平整，当试件倾斜一定角度时，可使最靠近试件的传声器测点声场紊乱，形成非平面波，使吸声系数曲线出现极小的情况。

参 考 文 献

- [1] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 255-391.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 声学 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第 2 部分: 传递函数法 GB/T 18696.2—2002[S], 2002.
- [3] 范丹丹. 阻抗管吸隔声测量系统的设计与实现[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [4] 朱有剑, 张勇, 熊文波. 基于传递函数法的阻抗管吸声系数测量系统研究[J]. 声学及电子工程, 2012(4): 27-31.
- [5] 梁小光. 基于 Virtual.lab 的多孔材料吸声性能仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [6] DECKERS E, JONCKHEERE S, VANDEPITTE D, et al. Modelling techniques for vibro-acoustic dynamics of poroelastic materials[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2015, 22(2):183-236.
- [7] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [8] 詹福良, 徐俊伟. Virtual. Lab Acoustic 声学仿真计算从入门到精通[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.