

# 基于声学仿真对阻抗管校准工作的研究



赵莹, 郭鑫鑫, 郑浩锐

广州广电计量检测股份有限公司, 广州 510656

**【摘要】** 阻抗管(传递函数法)吸声系数测量误差的校准采用标准试样法, 管中宽带声源产生平面波的激励, 通过测量两传声器响应信号的传递函数计算得到标准试样的吸声系数, 计算与标准试样标准值的差值得到吸声系数的测量误差。在校准中, 阻抗管的工作频率范围与标准试样证书中的校准频率范围并不一致, 因此在开展阻抗管吸声系数测量误差校准前, 需要确定阻抗管工作频率范围, 进而确定校准的频率范围, 避免造成校准结果的误判。对阻抗管中产生平面波声场的截止频率进行理论分析和仿真计算, 并对两种不同管径(边长)、不同传声器间距的阻抗管的吸声系数进行仿真计算, 通过仿真计算得出了阻抗管管径(边长)、传声器间距与频率范围之间的数学模型, 通过该数学模型能够对阻抗管吸声系数测量误差的校准工作提供一定的指导和借鉴。

**【关键词】** 计量学; 阻抗管; 校准; 管径; 传声器间距; 声学仿真

**【中图分类号】** TB95

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 2096-9015(2023)05-0058-06

**DOI:** 10.12338/j.issn.2096-9015.2023.0002

**【引用本文】** 赵莹, 郭鑫鑫, 郑浩锐. 基于声学仿真对阻抗管校准工作的研究 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(5): 58-63.

## Research on Calibration of Resistance Tube Based on Acoustic Simulation

ZHAO Ying, GUO Xinxin, ZHENG Haorui

Guangzhou GRG METROLOGY & TEST Co., Ltd., Guangzhou 510656, China

**【Abstract】** The calibration of the measurement error of the sound absorption coefficient, using the impedance tube (transfer function method), employs the standard sample method. The excitation of a plane wave is produced by the broadband sound source within the tube. By measuring the transfer function of the response signals of two transducers, the sound absorption coefficient of the standard sample is determined. The measurement error of the sound absorption coefficient is then deduced by comparing this with the standard value of the standard sample. As the operating frequency range of the impedance tube under calibration may not correspond with the calibration frequency range mentioned in the certificate of the standard sample, it is essential to determine the impedance tube's working frequency range prior to calibration. This further aids in establishing the calibration frequency range, thereby avoiding calibration result inaccuracies. This study encompasses a theoretical analysis and simulation of the cut-off frequency of the plane wave sound field generated within the impedance tube, and a simulation of the sound absorption coefficient of two impedance tubes with distinct diameters (or side lengths) and varied transducer spacing. A mathematical model that establishes a relationship between the tube diameter (or side length), transducer spacing, and frequency range has been derived from these simulations. This model serves as a useful tool providing guidance for the calibration of the measurement error of the impedance tube's sound absorption coefficient.

**【Key words】** metrology, impedance tube, calibration, tube diameter, transducer spacing, acoustic simulation

## 0 引言

在建筑声学设计以及声学新材料的开发和研究中, 研究人员都对材料的声学特性指标提出了要求, 如材料的吸声系数、反射系数、声阻抗、声导纳等。测量材料吸声系数的方法有两种, 一种是混响

室法, 另一种是阻抗管法。混响室法测量声音无规入射的吸声系数<sup>[1]</sup>, 需要材料的面积较大, 对于只能提供小样品的吸声材料的研究和开发工作有不便之处; 阻抗管法测量声音正入射时的吸声系数, 测试材料所需的面积小。阻抗管法测试材料吸声系数的方法包含两种, 一种是驻波比法, 另一种是传递函数

收稿日期: 2023-01-04; 修回日期: 2023-06-02

作者简介: 赵莹(1988-), 广州广电计量检测股份有限公司工程师, 研究方向: 振动声学类仪器设备的校准方法, 邮箱: zhaoying@grgtest.com。

法<sup>[2]</sup>。其中,驻波比法通过测量驻波管中驻波声压极大值和极小值处的声压,得到驻波比,并用驻波比和第一个声压极小值的位置,计算得到测试材料的声阻率和声抗率<sup>[3]</sup>,进而计算得到测试材料的吸声系数。由于在测试时难以获得准确的驻波声压的极大值和极小值,且一次只能测量一个频率点,驻波比法的发展受到了一定限制<sup>[4]</sup>。传递函数法通过双传声器测量复值声压之比,可一次性测量整个所需频段内的吸声系数,测试效率高,在建筑材料的测试和声学超材料研究中得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>。

JJF 1446-2014《阻抗管校准规范(传递函数法)》<sup>[6]</sup>(以下简称“校准规范”)对抗阻管的测量材料的吸声系数校准提出了要求。目前市面上的阻抗管形式多样,有方形管和圆形管之分,长短截面尺寸大小不一,传声器间距也各有差别,在计量校准工作中,面对形式多样的阻抗管,是否均采用同样一种标准试样,校准频率范围是否要变化等问题在校准规范中并没有体现出来,但却是实际校准工作中碰到的实际问题。

本文从阻抗管校准原理出发,采用有限元方法解算阻抗管中声波的 Helmholtz 方程<sup>[7]</sup>,对解算得到的传声器处的复声压信号进行后处理,计算得到测试材料的吸声系数,对抗阻管的校准工作中应注意的几个问题进行探讨,以期对抗阻管的校准给予一定的指导。

### 1 阻抗管中平面波理论

传递函数法测量材料的吸声系数利用在声阻抗管中传播的平面声波,平面声波的形成具有一定的条件,管的形状、尺寸以及管壁的边界对管中平面波均会有影响,下文通过理论结合声学仿真,对常见的矩形阻抗管和圆形阻抗管中平面声波的影响因素进行分析。

#### 1.1 矩形管中平面波

矩形管示意图如图 1 所示,设有一矩形管,其高度为  $l_x$ , 宽度为  $l_y$ , 管长方向为  $z$  轴,管口取在  $z=0$  处。矩形管中三维直角坐标方程为式(1)<sup>[8]</sup>。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 p}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 p}{\partial^2 z} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

通过分离变量法并根据刚性壁管的边界条件得到式(1)的一个特解为式(2)。

$$p_{n_x, n_y} = A_{n_x, n_y} \cos k_x x \cos k_y y e^{i(\omega t - k_z z)} \quad (2)$$

$p_{n_x, n_y}$  为每一组  $(n_x, n_y)$  ( $n_x, n_y$  取 0, 1, 2, ... 正整数)对应的沿  $z$  方向传播的声波,存在式(3)。

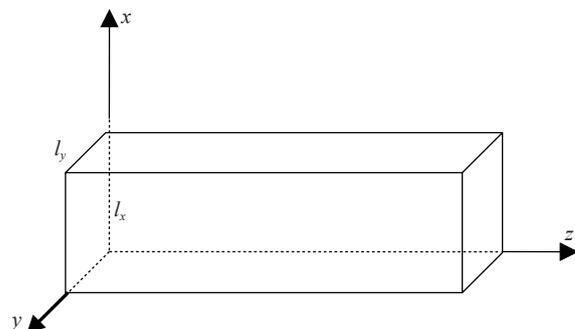


图 1 矩形管示意图

Fig.1 Schematic of rectangular tube

$$k_z = \left\{ \frac{\omega^2}{c_0^2} - \left[ \left( \frac{n_x}{l_x} \right)^2 \pi^2 + \left( \frac{n_y}{l_y} \right)^2 \pi^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

从式(3)得到,当  $k_z$  为实数时,在  $z$  方向才表现有波的传播,存在式(4)。

$$\frac{\omega^2}{c_0^2} > \left( \frac{n_x}{l_x} \right)^2 \pi^2 + \left( \frac{n_y}{l_y} \right)^2 \pi^2 \quad (4)$$

声源声波频率  $f$  需满足式(5)。

$$f > f_{n_x, n_y}$$

$$f_{n_x, n_y} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left( \frac{n_x}{l_x} \right)^2 + \left( \frac{n_y}{l_y} \right)^2} \quad (5)$$

只有在满足式(5)的条件时才能在管中激发出对应的  $(n_x, n_y)$  次波。而高次波(当  $n_x$  和  $n_y$  同时大于 0)在垂直于  $z$  轴的平面上,不同  $x$  与  $y$  的位置声压振幅不同,不满足平面声场的定义<sup>[9]</sup>,因此称  $(0, 0)$  次波为阻抗管主波,除零以外的一个最低简正频率为截止频率  $f_c$ ,即为式(6)。

$$f_c = \min(f_{0,1}, f_{1,0}) \quad (6)$$

当矩形阻抗管的尺寸确定,其截止频率随即确定,因此如果要在阻抗管中产生平面声场,声波的频率需要远低于截止频率。

#### 1.2 圆形管中平面波

与矩形管类似,为了方便计算,对圆形管采用柱坐标系来表示管中声波方程。设有一半径为  $a$  的圆截面导管,如图 2 所示,其径向坐标为  $r$ ,极角为  $\theta$ ,管轴用  $z$  表示,将式(1)转化为式(7)<sup>[10]</sup>。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (7)$$

与矩形管类似,圆截面导管的截止频率为式(8)。

$$f_c = 1.841 \frac{c_0}{2\pi a} \quad (8)$$



图 2 圆形管示意图

Fig.2 Schematic of circular tube

1.3 矩形管中平面波的仿真

设矩形管宽度和高度均为 100 mm, 根据式(6)确定其截止频率为:

$$f_c = f_{0,1} = f_{1,0} = \frac{343}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{0.1}\right)^2} = 1715 \text{ Hz}$$

对矩形管建立几何模型并进行仿真计算, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看到矩形管中任意位置的声压级相同, 说明声波是平面波, 管中声场为平面声场。

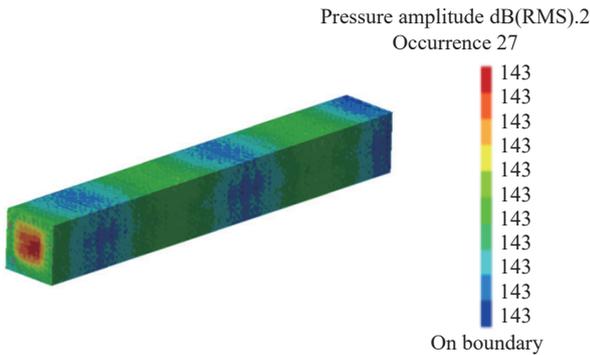


图 3 矩形管中平面波仿真结果

Fig.3 Simulation results of plane wave in rectangular tube

沿矩形管长度方向选取了 6 个点, 计算得到此 6 点处的声压如图 4 所示。

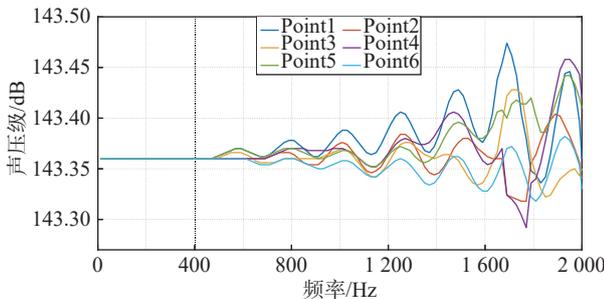


图 4 矩形管中 6 点声压

Fig.4 Sound pressure level at six points in rectangular tube

从图 4 可以看到, 该矩形管在 1663 Hz 频率处, 此 6 点声压分别为: 143.45 dB、143.42 dB、143.30 dB、143.36 dB、143.37 dB、143.35 dB, 相差在 0.15 dB 范

围内, 满足平面波声压幅值不随距离而变化的特性, 而在 1700 Hz 以上频段, 声压级相差较大, 基本与理论分析相符合。

1.4 圆形管中平面波的仿真

设圆形管内径为 100 mm, 根据式(8)确定其截止频率为:

$$f_c = 1.841 \times \frac{343}{2 \times \pi \times 0.05} = 2010 \text{ Hz}$$

对圆形管建立几何模型并进行仿真计算, 结果如图 5 所示。从图 5 可以看到圆形管中任意位置的声压级相同, 说明声波是平面波, 管中声场为平面声场。

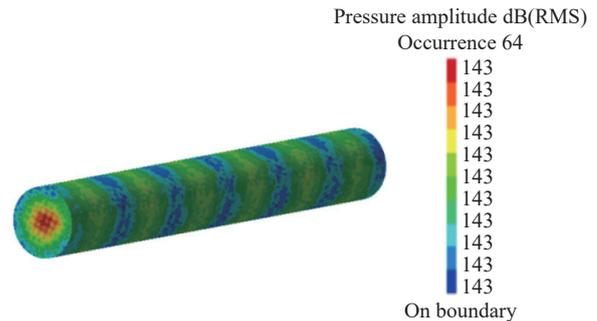


图 5 圆形管中平面波仿真结果

Fig.5 Simulation results of plane wave in circular tube

沿圆形管长度方向选取 6 个点, 计算得到此 6 点处的声压如图 6 所示。

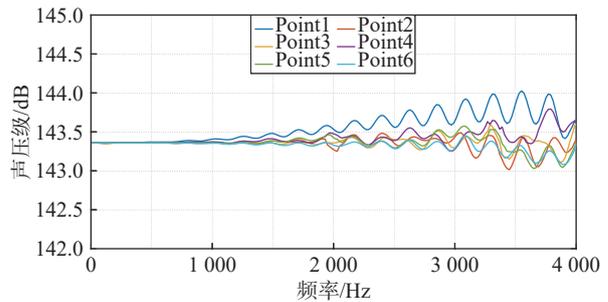


图 6 圆形管中 6 点声压

Fig.6 Sound pressure level at six points in circular tube

从图 6 可以看到, 该圆形管在超过 2000 Hz 频率范围, 各处声压级差异越来越大, 不再满足平面波的定义, 因此要想获得纯净的平面波, 声源频率最好远低于截止频率<sup>[1]</sup>, 这一结论与理论分析的结果相符合。

2 标准试样校准阻抗管吸声系数测量误差

2.1 吸声系数测量原理

基于传递函数法和标准试样对阻抗管吸声系数

测量误差进行校准,重要的是通过测量测试样品前两个传声器位置上的声压,然后计算两个传声器声压的复传递函数来确定法向入射声反射因数,从而计算得到测试样品材料的法向入射吸声系数<sup>[12]</sup>,校准示意图如图 7 所示。

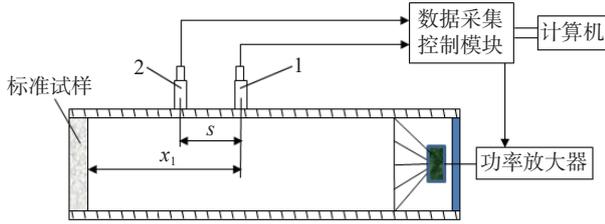


图 7 阻抗管吸声系数校准示意图

Fig.7 Schematic of impedance tube sound absorption coefficient calibration

测量原理是将宽带稳态随机信号分解成入射波  $p_i$  和反射波  $p_r$ <sup>[13]</sup>,根据平面声波的一维 Helmholtz 波动方程,将坐标原点取为标准试样测量表面,则阻抗管中入射波  $p_i$  和反射波  $p_r$  声压表示为式(9)、式(10)<sup>[14]</sup>。

$$p_i = P_i e^{jk_0 x} \quad (9)$$

$$p_r = P_R e^{-jk_0 x} \quad (10)$$

式中,  $P_i$ 、 $P_R$  分别是测量表面上  $p_i$ 、 $p_r$  的幅值;  $k_0$  为波数; 传声器 1、2 处的声压(考虑到各列波的时间因子都是简谐变化,故因子  $e^{j\omega t}$  略去不写)表示为式(11)、式(12)。

$$p_1 = P_i e^{jk_0 x_1} + P_R e^{-jk_0 x_1} \quad (11)$$

$$p_2 = P_i e^{jk_0(x_1-s)} + P_R e^{-jk_0(x_1-s)} \quad (12)$$

通过测量安装于阻抗管管壁上的两支传声器的声压  $p_1$ 、 $p_2$ ,得到入射波传递函数  $H_i$ 、反射波传递函数  $H_r$  如式(13)、式(14)所示<sup>[15]</sup>。

$$H_i = \frac{p_2}{p_1} = e^{-jk_0 s} \quad (13)$$

$$H_r = \frac{p_2 r}{p_1 r} = e^{jk_0 s} \quad (14)$$

令  $r = P_R/P_i$ ,即声压反射系数,则总声场的传递函数  $H_{12}$  表示为式(15)。

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_0(x_1-s)} + r e^{-jk_0(x_1-s)}}{e^{jk_0 x_1} + r e^{-jk_0 x_1}} \quad (15)$$

将入射波传递函数  $H_i$ 、反射波传递函数  $H_r$  代入式(15)整理得式(16)<sup>[16]</sup>。

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} e^{j2k_0 x_1} \quad (16)$$

通过测得的传递函数、距离  $s$ 、 $x_1$  和  $k_0$  可以得到声压反射系数,则吸声系数  $\alpha$  可由式(17)确定<sup>[17]</sup>。

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (17)$$

以上即为采用阻抗管传递函数法测量材料吸声系数的原理,在对阻抗管的校准中,以标准试样作为量值传递标准器,标准试样的吸声系数由三家及以上的具有相应资质和能力的计量技术机构共同测定<sup>[18]</sup>,作为吸声系数的标准值,与被校准阻抗管测得的吸声系数实测值进行比较,得到被校准阻抗管的吸声系数测量误差。

## 2.2 阻抗管校准中考虑的问题

目前市面上的阻抗管品牌主要有丹麦 B&K、杭州爱华及北京声望,各品牌的阻抗管已经系列化,型号多样。工作频率范围与阻抗管的横向尺寸或直径及两个传声器之间的间距有关<sup>[19]</sup>,不同尺寸或直径和间距的组合,可得到不同的频率测量范围,在对阻抗管的校准中需要综合考虑各项几何要素,以便进行校准频率范围的选取。

利用声学仿真软件进行仿真分析,设置管直径为 100 mm,划分网格大小 10 mm,管内声学材料选择空气,空气密度为 1.225 kg/m<sup>3</sup>,声速为 340 m/s,末端吸声材料流阻设置为 87000 Pa·s/m<sup>2</sup>,孔隙率为 0.97,普朗特数 0.71<sup>[20]</sup>。分别设置两传声器间距为 70 mm、140 mm 和 400 mm,仿真得到两传声器处声压实部值和虚部值并通过 MATLAB 软件读取,根据式(13)~式(17)编程计算吸声系数,仿真结果如图 8 所示。将阻抗管截面建立模型为矩形 100 mm×100 mm,其余条件不变,传声器间距分别为 70 mm 和 140 mm,同样将仿真所得两传声器处声压实部和虚部数据导入 MATLAB 进行计算,结果如图 9 所示。

从图 8 和图 9 的仿真结果可以得到如下结论:

1) 阻抗管的频率范围与其尺寸大小有密切关系,GB/T 18696.2 中规定了阻抗管的工作频率范围上限与阻抗管的截面尺寸的关系,以及传声器之间的间距要求。因此在校准阻抗管之前首先查看说明书中关于其工作频率范围的说明,如果没有说明,则根据以下公式计算其频率范围上限:  $d_1 < 0.50\lambda_u$  (方管);  $d < 0.58\lambda_u$  (圆管),其中  $d_1$  为方管的长边边长,  $d$  为圆管直径。

2) 阻抗管的两传声器间距大小对测量结果有影响,GB/T 18696.2 中规定了阻抗管的传声器之间的间距  $s$  应满足:  $f_u \cdot s < 0.45c_0$ ,代入圆管的上限工作频率 2010 Hz,得到传声器间距  $s < 76$  mm。由图 8

仿真结果可以看到,传声器间距超过 GB/T 18696.2 的规定上限,吸声系数测量结果在频率较高的地方出现了波形畸变,出现畸变的原因与阻抗管的声模态有关,同时也与传声器的位置有关,阻抗管生产厂

家应该根据阻抗管声模态来合理选择传声器的位置。在对其校准时,应该在其频率范围上限以内开展校准,避免出现校准超出其频率范围上限而判断其超差的情况。

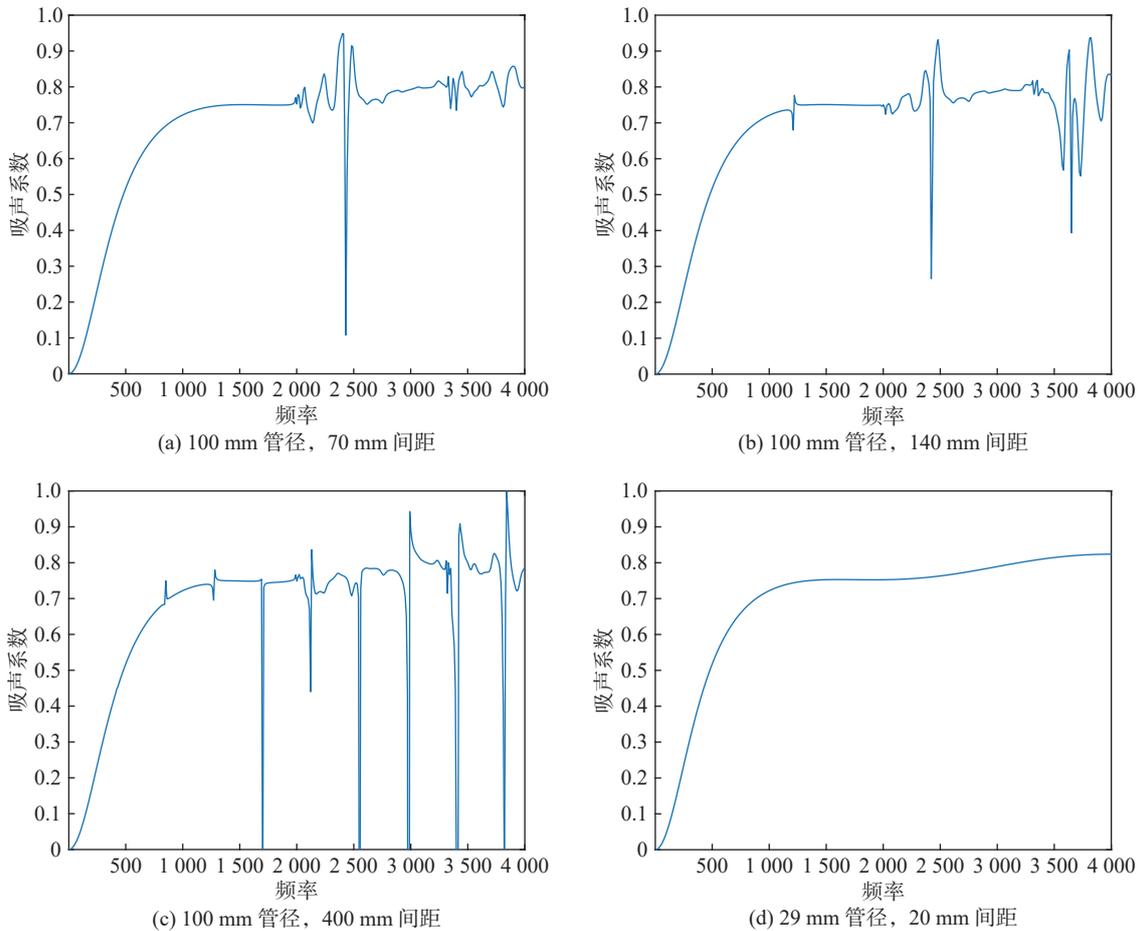


图 8 圆形管两种管径不同间距仿真结果

Fig.8 Simulation results for circular tube with varying diameters and spacings

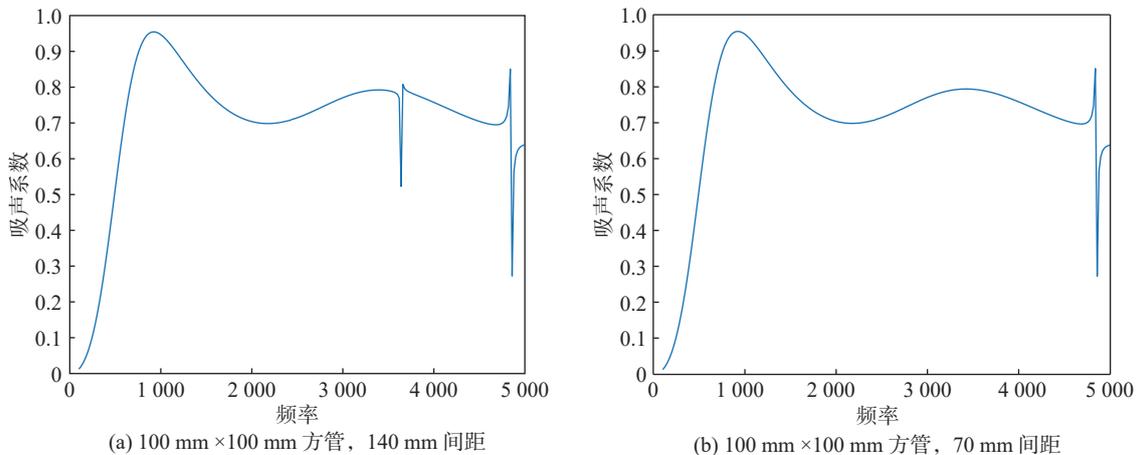


图 9 矩形管两种间距仿真结果

Fig.9 Simulation results for rectangular tube with varying spacings

3)对同一类型的材料而言,阻抗管直径不是选的越大越好,从图 8(d)可以看到,小管径的阻抗管

比大管径的阻抗管的频率上限要大的多。因此,在校准小管径阻抗管时,需要在更高频率的范围进行校准。

4) 比较同一规格的 100 mm 的圆形管和矩形管,如图 8(a)和图 9(b),以及以上理论计算均表明,方管的截止频率更高一些,因此其频率范围相对圆形管更高。

### 3 结论

本文从管中平面波的理论出发,探讨了阻抗管的截面尺寸对其工作频率范围的影响,推导出管中存在平面波的上限截止频率与其截面尺寸的数学关系式,并进行了仿真验证。进一步对基于传递函数法进行材料吸声系数测试的原理进行分析,阻抗管吸声系数测量误差的校准基于此原理,采用标准试样(吸声系数由三家及以上的具有相应资质和能力的计量技术机构共同测定)证书的平均值作为标准值。因此,在吸声系数测量误差的校准中,需要根据被校准的阻抗管的说明书或几何尺寸确定其工作频率范围<sup>[21]</sup>,全面考虑阻抗管的管径大小或管边长以及两个传声器之间的间距,在合理的频率范围内进行校准,而不能根据标准试样证书中出具的频率范围开展校准而造成误判。

另外,阻抗管的校准中还需考虑传声器适配<sup>[22-29]</sup>、标准试样安装倾斜、传声器与样品之间的间距等因素,这些因素对校准结果的影响还需进一步的研究。

### 参考文献

[1] 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(108):27-31.

[2] ASTM. Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method: ASTM E2611-09[S]. ASTM, 2009.

[3] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬.声学基础[M].南京:南京大学出版社,2001.

[4] 张福林,董玲抒,李忠盛,等.材料声学特性的典型参数测试技术研究进展[J].装备环境工程,2020,17(8):131-137.

[5] 国家质量监督检验检疫总局.阻抗管校准规范(传递函数法):JJF 1446[S].北京:中国标准出版社,2014.

[6] 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[S].北京:中国标准出版社,2002.

[7] 詹福良,徐俊伟. Virtual. Lab Acoustics 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.

[8] 吴胜举,张明铎.声学测量原理与方法[M].北京:科学出版社,2014.

[9] 张哲,王小鹏,陈天宁,等.适用于高温阻抗管的修正传递函数法[J].西安交通大学学报,2014,48(5):118-122.

[10] J Y Chung, D A Blaser. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory [J]. JASA, 1980, 68(3): 907-913.

[11] 刘冬冰.垂直/斜入射阻抗管吸隔声测量仪的设计与仿真[D].长春:吉林大学,2018.

[12] 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.

[13] ISO. Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes Part 2 Transfer-function method: ISO 10534-2[S]. ISO, 1998.

[14] 刘宏宏,彭立民,朱广勇.传递函数法和混响室法测量木质穿孔板吸声性能的对比如研究[C].北京:工业建筑杂志社,2016.

[15] 姚广春,代阳,马训鸣,等.基于传递函数法的吸声系数测试系统设计与实现[J].仪表技术与传感器,2022(11):55-59.

[16] 朱蒨丽.双传声器技术测量材料的吸声系数[J].声学技术,1990(4):16.

[17] 李东旭,张霞,聂嘉兴,等.吸声系数的先进现场测试技术发展概述[J].装备环境工程,2020,17(12):45-54.

[18] 朱有剑,张勇,熊文波,等.基于传递函数法吸声系数测量误差分析[J].噪声与振动控制,2012(S1):178-184.

[19] 魏伟力.噪声变送器电流-声压级系统灵敏度校准方法[J].计量科学与技术,2021,65(8):51-54.

[20] 庞业珍.基于传递函数的吸声隔声测量方法与应用研究[D].大连:大连理工大学,2006.

[21] 王煜,纪红刚,臧春华,等.高精度传声器相位校准设备的研发[J].计量与测试技术,2018,45(2):34-37.

[22] Toth P, Schram C. Simultaneous Calibration of Multiple Microphones for Both Phase and Amplitude in an Impedance Tube [J]. Archives of Acoustics, 2015, 39(2): 277-287.

[23] R Boonen, P Sas, W Lauriks, et al. Calibration of the two microphone transfer function method to measure acoustic impedance in a wide frequency range[J]. International Conference on Noise & Vibration Engineering, 2006, 6624(1): 151-152.

[24] 张正坤,冯秀娟,何龙标,等.光学法测量驻波管中声压量值的优化研究[J].计量技术,2020(5):40-45.

[25] 孙中政,韩旭,王宇飞.多阶声模态分解的改进阻抗管法测量材料的高频吸声系数[J].声学学报,2022,47(2):229-240.

[26] 王伟,倪计民,肖国权,等.双传声器声压测量的计算误差分析[J].计量技术,2007(3):24-26.

[27] 鲁光军,杜富荣.在 PULSE 系统中测量声压级的技巧[J].计量科学与技术,2021,65(11):8-10.

[28] 杨嘉莉,毛宏宇,何龙标,等.高声压谐振耦合管共振频率的优化设计[J].计量科学与技术,2021,65(3):66-70.

[29] 杨鹏. Helmholtz 腔-微穿孔板复合结构的吸声性能[J].电声技术,2022,46(12):36-41.