双传声器法测量斜入射吸声系数研究 *

陈克安 曾向阳

(西北工业大学航海工程学院 西安 710072) 1998 年 5 月 20 日收到

摘要 本文从理论和实验两方面研究了双传声器法测量斜入射吸声系数时,双传声器间距、双传声 器离材料表面距离、材料面积大小等因素对测量结果的影响。 关键词 双传声器法,斜入射吸声系数,声阻抗率

A study on the measurement of sound absorption coefficient at oblique incidence by the use of two-microphone technique

Chen Kean Zeng Xiangyang

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract The measurement of sound absorption coefficient at oblique incidence by the use of two-microphone technique is theoretically and experimentally studied. Firstly, how to choose a suitable distance between the microphones is examined. Then the effects of the distance from the microphones to the material surface and the size of the material on the measured results are discussed.

Key words Two-microphone technique, Sound absorption coefficient at oblique incidence, Specific acoustic impedance

1 引言

吸声系数的测量是声学测量中一项重要的 基础性工作。在工程实践中常用的方法有驻波 管法和混响室法^[1]。这两种方法的不足之处在 于,驻波管法仅能测量垂直入射吸声系数,并 且样品材料面积较小,与实际情况有出入;混 响室法仅能在扩散声场中测量塞宾吸声系数。 为了测量斜入射吸声系数,人们先后提出了脉 冲法^[1]、声压法^[2]、干涉图案法^[3]、傅里叶 分析法^[4]、双传声器法^[5,6]。相对而言,双传 声器法具有直观、简单,低频精度高,可在现 场应用等优点,受到人们的重视。

双传声器法是通过两个声压传声器,测量 材料的法向声阻抗率,而后计算斜入射吸声系 数的一种方法。文 [5] 从实验上验证了该方法 的有效性,分析了双传声器间距及两通道相位 失配对测量精度的影响。本文从理论和实验两 方面进一步研究了实际测量中如何确定双传声 器间距、讨论了双传声器离材料表面距离、材

 $\cdot 28 \cdot$

18 卷 4 期 (1999)

^{*} 国家自然科学基金资助项目

料面积大小等因素对测量结果的影响。

2 双传声器法测量斜入射吸声系数原 理^[5,6]

已知声波入射角为 θ,则声学材料的声压 反射系数为

$$R(\theta) = \frac{z\cos\theta - 1}{z\cos\theta + 1} \tag{1}$$

其中 z 为归一化的声阻抗率,它等于声学材料 的声阻抗率除空气的特性阻抗,材料声阻抗率 等于材料表面声压除以介质法向质点振速,即

$$z = \frac{Z}{\rho c} = \frac{1}{\rho c} \frac{P}{\nu_n} \tag{2}$$

在求得声压反射系数后,即可计算出材料的吸 声系数,有

$$\alpha(\theta) = 1 - |R(\theta)|^2 \tag{3}$$

这就是说,只要求得声阻抗率,就可得到吸声 系数,而声阻抗率可以用双传声器法测量,这 就是双传声器法测量斜入射吸声系数的基本思 路。

假定有两传声器 A、 B, 其间距为 2d, 两传声器连线垂直于材料表面,连线中点与材 料表面距离为 h(如图 1 所示)。如果在频域传 声器 A、 B 的输出信号为 *P_A(f)、 P_B(f)*,那 么两传声器连线中点的声压和质点振速可近似 为^[5]

$$P(f) = [P_A(f) + P_B(f)]/2,$$

$$V(f) = (1/j2\omega\rho d)[P_A(f) - P_B(f)]$$
(4)

于是,我们就可通过 $P_A(f), P_B(f)$ 得到归一化 的声阻抗率 ^[5]

$$z = \frac{j\omega d}{c} \frac{G_{AA} - G_{BB} + j2\mathrm{Im}(G_{AB})}{G_{AA} + G_{BB} - 2\mathrm{Re}(G_{AB})}$$
(5)

其中 G_{AA}, G_{BB}, G_{AB} 分别为 $P_A(f)$ 的自功率 谱、 $P_B(f)$ 的自功率谱、 $P_A(f), P_B(f)$ 的互功 率谱。

应用声学

双传声器法测量斜入射吸声系数的具体步骤是: (1) 测量 G_{AA}, G_{BB}, G_{AB} ;(2) 根据式 (5) 计算归一化的声阻抗率; (3) 根据式 (1) 和式 (3) 计算斜入射吸声系数。从这个过程可 以看出,该方法固有的误差来源主要是两传声 器的有限间距和测量 $P_A(f), P_B(f)$ 两通道的 相位失配,文 [5] 对此已作了定量分析。实际 中, $P_A(f), P_B(f)$ 的测量一般采用声强探头, G_{AA}, G_{BB}, G_{AB} 的计算采用专门的频谱分析 仪,其相位失配可控制在最小范围内。而双传 声器间距、双传声器离材料表面距离等参数对 测量结果的影响也必须弄清楚。



图 1 双传声器法测量斜入射吸声系数示意图

3 各参数对测量结果的影响

假定入射声波为平面波,入射角为 θ ,材 料声压反射系数的准确值为 $R_E(R_E=|R_E|e^{j\phi})$, 那么从式 (1)可得到归一化的声阻抗率的准确 值为

$$z_E = \frac{1}{\cos\theta} \frac{1+R_E}{1-R_E} \tag{6}$$

· 29 ·

在距材料表面 x 处, 其声压表达式为

$$P(x) = P_0[e^{j(\omega t - kx\cos\theta)} + R_E e^{j(\omega t + kx\cos\theta)}]$$
(7)

其中 *P*₀ 为入射声波振幅。传声器 A 、 B 离 材料表面的距离分别为 (h-d) 和 (h+d) 。从上 式,可推导出

$$G_{AA} = P_0^2 [1 + |R_E|^2 = 2|R_E| \cdot \cos(2k(h-d)\cos\theta + \phi)]$$
(8a)
$$G_{BB} = P_0^2 [1 + |R_E|^2 + 2|R_E| \cdot \cos(2k(h+d)\cos\theta + \phi)]$$
(8b)
$$G_{AB} = P_0^2 [e^{-j2kd\cos\theta} + |R_E|e^{j2kd\cos\theta} + 2|R_E|\cos(2kh\cos\theta + \phi)]$$
(8c)

将以上三式代入式 (5), 可得到双传声器法测得 的归一化声阻抗率, 有

$$z_M = C \frac{1 - |R_E|^2 + j2|R_E|\sin(2kh\cos+\phi)}{1 + |R_E|^2 - 2|R_E|\cos(2kh\cos\theta+\phi)}$$
(9)

其中

$$C = kd \frac{\sin(2kd\cos\theta)}{1 - \cos(2kd\cos\theta)} \tag{10}$$

如果 $kd\cos\theta << 2\pi$,也就是 $d\cos\theta << \lambda$ (最高 频率成分声波的波长),则有

$$\sin(2kd\cos\theta) \approx 2kd\cos\theta$$
$$\cos(2kd\cos\theta) \approx 1 - \frac{1}{2}(2kd\cos)^2$$
$$= 1 - 2(kd\cos\theta)^2$$
(11)

将上式代入式 (10) 和式 (9), 有 $C \approx 1/\cos\theta$, 因此

$$z_M \approx \frac{1}{\cos \theta} \\ \cdot \frac{1 - |R_E|^2 + j2|R_E|\sin(2kh\cos\theta + \phi)}{1 + |R_E|^2 - j2|R_E|\sin(2kh\cos\theta + \phi)}$$
(12)

这就是说,如双传声器间距乘 cos θ 远小 于入射声波最高频率成分所对应的声波波长,

 \cdot 30 \cdot

则间距 2d 对测量结果的影响就可忽略。图 2 给出了不同入射角 (θ =0°,30°,45°,60°)下系数 C 与 kd 的关系。可以看出,入射角大, C 的 变化要平缓,对垂直入射的声波,如果要 C 保 持恒定,则要求 $d < 0.1\lambda$ 。然而,实验表明, 为了保证测量结果的稳定,传声器间距应大于 0.1m。这就是说,当入射声波频率大于 200Hz 时,间距 2d 对 z_M 的影响是不可避免的。



图 2 不同入射角时系数 C 与 kd 的关系

式(12)进一步整理,有

$$z_{M} = \frac{1}{\cos\theta} \frac{(1 + R_{E}e^{jkh\cos\theta})}{(1 - R_{E}e^{jkh\cos\theta})}$$
$$\cdot \frac{(1 - R_{E}^{*}e^{-j2kh\cos\theta})}{(1 + R_{E}^{*}e^{-j2kh\cos\theta})}$$
$$= \frac{1}{\cos\theta} \frac{(1 + R_{E}e^{j2kh\cos\theta})}{(1 - R_{E}e^{j2kh\cos\theta})}$$
(13)

比较式 (13) 和式 (6) 可看出:即使忽略间距 2d 的影响,由于传声器与材料表面的距离,归一 化声阻抗的测量值与其准确值是有差别的.将 式 (13) 代入式 (1),得到声压反射系数的测量 值为

$$R_M = R_E e^{j(2kh\cos\theta + \phi)} \tag{14}$$

由此可得到吸声系数的测量值为

$$\alpha_{M} = 1 - |R_{M}|^{2}$$

$$= 1 - |R_{E}e^{jkh\cos\theta}|^{2}$$

$$= 1 - |R_{E}|^{2} = \alpha_{E} \qquad (15)$$

$$18 \ \text{\& 4 \ \text{in}} (1999)$$

以上两式说明,由于双传声器与材料表面有一 段距离,测量值中声压反射系数与真实值之间 有相位偏差,但吸声系数的测量值没有影响。 但 h 也不能任意取,因为材料面积有限, h 大 到一定程度,材料边缘效应将影响测量结果。

另外,材料面积对测量结果是有影响的。 一般说来,材料边长应大于最低频率成分声波 的波长,实际中,样品材料面积在 1m² 左右就 可以了^[6]。

4 实验结果及分析

根据上述双传声器法测量吸声系数原理, 我们建立了实验系统,其系统框图如图 3 所 示。图中各部分分别为:①信号发生器,②功 率放大器,③支架及 2.5 英寸飞乐牌扬声器, ④ CM-202 精密型双传声器探头(附 1/2 英寸 传声器一对);⑤ CE-0310 放大器;⑥ CF-350 FFT 分析仪;⑦声学材料样品。



图 3 实验系统示意图

声学材料为 2 块软质岩棉板,比重为 80kg/m³,厚度为 50mm。单块岩棉板长、 宽分别为 1.0m 和 0.63m,声波垂直入射。实 验在西北工业大学声学工程研究所消声室内进 行,包括以下几部分:

(1)两传声器间距对测量结果的影响将两块岩棉板合并,长、宽分别为 1.26m

和 1.0m 。测量点在岩棉板中央,两传声器连 线中点距材料表面 0.30m 。两传声器间距分别 取 0.20m , 0.30m , 0.4m 和 0.5m 所测吸声系 数与驻波管法测量同一材料吸声系数结果^[7] 示于图 4 。可以看出,传声器间距取 0.20m 效 果最好。总的说来,所有测量值在低频段更准 确。

(2) 吸声系数测量值与测点的关系

取岩棉板中央为坐标原点,图 5 给出了 1KHz 垂直入射声波沿 X 轴方向测得的吸声系 数,测量中传声器间距为 0.20m。结果表明, 在材料中间部分,测量值是正常的。

(3) 材料面积对吸声系数测量值的影响

分别采用单块和两块岩棉板为样品,在其 中央测得吸声系数如图 6 中所示,图中实线为 驻波管法测量值,曲线 A 、 B 分别为材料面 积为 1.26m² 和 0.63m² 时的吸声系数。在低频 段,两者差别不大。

(4) 双传声器与材料表面的距离对测量结果的影响

分别取 h=0.3m 和 h=0.4m, 采用两块岩 棉板为样品,在其中央测量吸声系数,其结果 非常接近。



图 4 不同间距双传声器法与驻波管法 测量结果的比较

· 31 ·

应用声学





(上接第 35 页)

最近通过距离,实线为递归算法的结果,虚线 为简化算法的结果(为区别起见,本文中对目 标达到最近点之前的正横距离 X₀ 一律加上了 "-"号)。

从分析结果看,以上算法是可行的,适当 修正部分参数后,可望应用于实践中。

4 小结

目标由远而近地运动,辐射噪声会越来越 强,其包络变化的规律在近距离上可近似为球 5 结语

根据上述理论分析和实验,有如下结论:

(1) 总体上讲,双传声器法测量斜入射吸 声系数,在低频范围内较精确;

(2) 双传声器与材料表面的距离对测量吸 声系数没有影响;

(3) 用双传声器法测量斜入射吸声系数, 所需材料面积在 1m² 左右即可。



- 1 沈蠔. 声学测量. 科学出版社. 1986 年
- Ingard U, Bolt K H. J.Acoust. Soc. of Amer., 1951,
 23: 509-516.
- 3 Sides D J, Mulholland K A. Journal of Sound and Vib., 1971, (14): 139-142.
- 4 Tamura M. J.Acoust. Soc. of Amer., 1990, 88: 2259-2264.
- 5 Minten M, Cops A, Lauriks W. Journal of Sound and Vib., 1988, **120**(3): 499–510.
- 6 Allard J F, Bourdier R, Bruneau A M. Journal of Sound and Vib., 1985, 101(1): 130-132.
- 7 方丹群,王文奇,孙家麒、噪声控制.北京出版社. 1986 年

面波扩展规律。而且,对于水听器接收点而言, 在目标的不同最近通过距离的航次,包络变化 的斜率也会不一样。根据这一特性,作者介绍 了两种利用目标辐射噪声实时被动测距的快速 算法,一种是递归最小二乘算法,另一种是解 方程组算法,两种算法均可实时地估计出目标 的当前距离和可能的最近通过距离。对仿真数 据和实验数据分析的结果表明,两种方法都是 可行的。该法可应用于近程测距的诸多场合。 近程目标距离的实时估计研究。

18 卷 4 期 (1999)

 \cdot 32 \cdot