

声强度的测量及其应用

刘 勋, 相敬林, 周 越

(西北工业大学, 西安 710072)

摘 要: 本文综述了声强度测量的简要发展历程及现状, 以及它的多种应用, 指出了其今后发展的重点。

关键词: 声强度; 测量; 应用

中图分类号: TG52 文献标识码: A

Measurements and its application of acoustic intensity

LIU Xun, XIANG Jing-lin, ZHOU Yue

(Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: This paper has described the brief developing process and condition of acoustic intensity measurement and its applications, and indicated the focus of its investigation.

Key words: acoustic intensity; measurement; application

1 引 言

在早期的测量中, 由于声压易测量, 测量声压便成为一种测量声场的标准, 但是, 声压是一个标量, 它所包含的声场信息有限。而声强度是一个向量, 其包含了声源的方向信息, 而且它还是一个 2 阶量, 包含了声场的能量信息, 所以它是一个比声压更有用的一个声学参量。自从 70 年代互谱声强度测量法出现以来, 声强度的测量及应用研究才算真正开始, 并达到一个高潮。

2 声强向量测量的发展历史

早在 1932 年, Olson^[1]就提出了声强的直接测量方法, 这种方法采用一个声压传感器和一个速度传感器来分别测量声压和粒子速度, 然后把它们相乘并积分来得到声强度。1941 年, C. W. Clapp 和 F. A. Firestone^[2]制

作了一个声瓦特计, 用来测量声能量流。1955 年, S. Baker^[3]设计了测量空间一点声波的声强度的仪器。以上的方法都难以克服它的两个基本缺陷: (1) 两个传感器无法放在同一个空间点上; (2) 两个不同类型的传感器难以实现匹配。1977 年, Fahy^[4]和 Chung^[5]分别推导了随机信号声强度的互谱测量方法。现在, 它已经基本取代了依声强定义进行测量的方法而成为一种标准的声强测量方法。随后人们对这种方法的各种误差进行了细致的分析^[6,7], 并且寻求各种办法以减小误差的影响^[5,8,9], 使这种方法日益完善。

3 互谱声强向量测量法及其误差分析^[4-7,10]

根据互谱声强向量测量法可得 O 点处 r 方向复声强度向量为:

$$I_r(f) = \{ \text{Im}[S_{12}(f)] / f + j [S_{11}(f) - S_{22}(f)] / (2f) \} / (2\pi\rho\Delta r) \quad (1)$$

式中, $S_{12}(f)$ 为 p_1 和 p_2 点处声压的互功率谱密度, S_{11} 和 S_{22} 分别为 p_1 和 p_2 点处声

收稿日期: 99-09-28; 修订日期: 99-10-28

国家教委博士学科点, 专项基金资助项目, 国防科技预研资助项目

作者简介: 刘勋(1969-), 男, 博士研究生。

压的自功率谱密度。记 $I(f) = \text{Im}[S_{12}(f)] / (2\pi f \rho \Delta r)$, $Q(f) = S_{11}(f) - S_{22}(f) / 4\pi f \rho \Delta r$, 称 $I(f)$ 为有功声强, $Q(f)$ 为无功声强, 有功声强为无散有旋矢量场, 无功声强为有散无旋矢量场。有功声强又可以分为有旋分量和无旋分量, 有旋分量与声源表面有功声强的切向分量有关, 此切向分量是声场有功声强有旋性的根源。无旋分量与表面声强有关。在声场中传播声能量者仅是有功声强的无旋分量, 故取实部作为实际测量的声强分量。

由于在互谱方法中使用了近似公式, 故此方法存在有限差分近似误差 (finite difference approximation error, 简称 FDAE), 可表示为:

$$E_{fda} = 10 \log_{10} [I_{\text{近似值}} / I_{\text{真实值}}]$$

$$10 \log_{10} [\sin(kd \cos \alpha) / (kd \cos \alpha)] \quad (2)$$

由于两个声压传感器的声学间距 kd 远小于 1, 所以它们的声压信号间的相位差 $\phi_2(f)$ (物理相移) 也相应地很小, 探头的两个电路通道的相位失配 (电相移) $\Delta\phi(f) = \phi_1 - \phi_2$ 会导致另一类误差, 即相位失配误差 (instrumentation phase mismatch error, 简称 IPME), 求得 IPME 为

$$E_{ipm} = 10 \log_{10} [I + \Delta\phi(f)] / (kd \cos \alpha) \quad (4)$$

对于这类误差, 实际上可以采用一定的措施加以消除^[5,8,9], 比如采用交换测量通道法, 可得到无相位失配误差的声强度为:

$$I_r(f) = \text{Im}\{[S_{12}(f) - \tilde{S}_{12}(f)]^2 / [2\pi f \rho \Delta r H_1 H_2]\} \quad (5)$$

其中 $\tilde{S}_{12}(f) = S_{12} \cdot (H_1 \cdot H_2^*)$, $\tilde{S}_{12}(f) = S_{12}(f) \cdot (H_2 \cdot H_1^*)$, 分别是通道交换前和交换后计算所得的互谱密度函数。 H_1 和 H_2 分别是信号通道 1 和 2 的频率响应。

在声强的互谱测量方法中, 随机扰动有时会造成较大的测量误差, Seybert 求得归一化的统计误差为:

$$\hat{\epsilon}[I_r(f)] = \frac{\text{Var}[I_r(f)]}{I_r(f)} = \{1/\overline{\gamma_{12}(f)} + \cot^2 \phi_2(f) [1 - \overline{\gamma_{12}^2(f)}] / [2\overline{\gamma_{12}^2(f)}]\}^{1/2} / \overline{nd} \quad (6)$$

上式表明, 随机误差与物理相移 $\phi_2(f)$ 和相干函数 $\gamma_{12}(f)$ 有关, \overline{nd} 为测量次数。

4 声强度向量的应用

4.1 声源声功率的测量

取一个包围声源的空间封闭曲面, 并把这一封闭曲面分割为 N 个小曲面, 通过每一个小曲面的声强矢量可以认为是垂直于小曲面, 并且在小曲面上是一个恒量, 则声源的声功率为:

$$W = \sum_{i=1}^n I_i \Delta S_i \quad (7)$$

其中, ΔS_i 为第 i 个小曲面的面积。

用互谱测量技术来测定声源的声功率的优点之一是在现场可以测量声源的声功率级, 在国际标准 ISO/9614 草案中给出了许多必须在每个倍频程或 1/3 倍频程频带上进行测量的声场指标, 来校核声场是否符合测量精度的要求。

但是, 有时候这些工作是很复杂而又费时的, 为此^[11]提出了一种仅利用正声强部分在现场测量和计算噪声源的正声强测量方法。该方法对声场环境要求较低, 测量简便、省时, 便于推广。

4.2 测量结构的声辐射效率^[12]

在噪声控制工程中, 为了衡量结构的声辐射能力, 往往需要知道其声辐射率。声辐射率的定义为:

$$\sigma_{rad} = W_{rad} / [\rho_c S \langle V^2(\omega) \rangle] \quad (8)$$

其中 W_{rad} 为结构辐射的声功率; ρ_c 声场介质的特性阻抗; S 为结构振动表面积; $\langle V^2(\omega) \rangle$ 为结构表面振速方值的时空平均。当靠近结构表面测量时, 可用介质质点振动速度来近似结构的振动速度, 利用双传声器技术, 在频域内测量的质点速度功率谱的表达式为:

$$G_{uu}(\omega) = [G_{22}(\omega) + G_{11}(\omega) - 2\text{Re}(G_{12}(\omega))] / (\omega^2 \Delta r)^2 \quad (9)$$

Re 表示取实部。由此可得:

$$\sigma_{rad} = \sum_{i=1}^N I_i / \rho_c \sum_{i=1}^N G_{ui}^i \quad (10)$$

式中 N 是测量点数。

4.3 用于强背景噪声下声源的识别^[13]

当系统由多个辐射源组成时, 每一个测量到的声强矢量为各声源所辐射的声强矢量的和, 为了获得各声源辐射的声强, 可以把系统表示为一个多输入双输出的系统模型:

$$\left. \begin{aligned} P_1(f) &= \left[\sum_{i=1}^m H_{ip_1}(f) X_i(f) \right] + N_1(f) \\ P_2(f) &= \left[\sum_{i=1}^m H_{ip_2}(f) X_i(f) \right] + N_2(f) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

输入信号 X_i 是每一声源特征信号的傅里叶变换, H_{ip_1} 和 H_{ip_2} 分别为 X_i 和 P_1 、 P_2 之间的频率响应函数, N_1 和 N_2 为背景噪声信号的傅里叶变换。由此可得:

$$I(f) = \text{Im} \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [H_{ip_1}(f) H_{jp_2}(f) G_{ij}^*(f)] + G_{N_1 N_2}^*(f) \right\} / (2\pi f \rho \Delta r) \quad (12)$$

如果要得到声源 X_k 对总声强的贡献 (表示成 I_{X_k}), 只要令除 $i = j = k$ 以外的其他所有频率响应函数 H_{ip_1} 和 H_{jp_2} 等于零并减去背景噪声谱 $G_{N_1 N_2}^*(f)$, 可得:

$$I_{X_k} = \text{Im} [H_{kp_1}(f) H_{kp_2}(f) G_{kk}^*(f)] / (2\pi f \rho \Delta r) \quad (13)$$

为了计算选择声强, 需要得到 $2m$ 个频率响应函数 H_{ip_1} 和 H_{ip_2} ($i, j = 1, 2, 3, \dots, m$)。

在最小二乘意义下, 可得到最优选择的频率响应函数, 这些频率响应函数应使得 N_1 和 N_2 与 X_i 和 P_1 、 P_2 不相关。各频率响应函数可通过解下面矩阵方程来得到:

$$\begin{bmatrix} G_{1p_1} & G_{1p_2} \\ G_{2p_1} & G_{2p_2} \\ \vdots & \vdots \\ G_{mp_1} & G_{mp_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1m} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ G_{m1} & G_{m2} & \dots & G_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{1p_1} & H_{1p_2} \\ H_{2p_1} & H_{2p_2} \\ \vdots & \vdots \\ H_{mp_1} & H_{mp_2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中 G_{ip_1} 和 G_{ip_2} 分别为第 i 个声源的特征信号 X_i 与声压信号 P_1 和 P_2 的互谱。

4.4 用于声源的定向^[14,15]

由于声强度是一个矢量, 它的方向指向声源, 因此, 可以应用它来对声源进行定向。

设在空间笛卡儿坐标系中, 利用三个声强探头, 分别位于 x 轴、 y 轴和 z 轴上, 用来测量 x 轴、 y 轴和 z 轴方向上的声强度分量 I_x 、 I_y 和 I_z , 则俯仰角 Φ 的方位角 θ 分别为:

$$\Phi(f) = \tan^{-1} [I_x(f) / I_y(f)] \quad (15)$$

$$\theta(f) = \cos^{-1} [I_z(f) / \sqrt{I_x^2(f) + I_y^2(f) + I_z^2(f)}] \quad (16)$$

我们应用矢量声探头在半消声实验室中进行了单频声源的定向实验 (其中 $\varphi = 45^\circ$; $\theta = 60^\circ$; 利用了交换通道技术, 以消除相位误差), 所得结果如表 1 所示:

表 1: 声强矢量法对声源的定向误差结果

信噪比 (dB)	方位角误差 (°)	俯仰角误差 (°)
0	6.2	5.3
5	2.3	1.7
10	0.7	0.5

5 声强度向量的发展前景

声强向量是表征声场的一个重要参量, 它的测量及应用一直受到人们的重视。对于用直接方法 (按定义) 来测量声强度的方法, 人们一直在克服此方法的缺陷, 不断开发出的新的产品和专利。而对于互谱方法, 针对其误差源, 正在研究减少以至消除误差的方法。同时, 在复杂的声场条件下的测量结果的差异性, 使得人们对声强向量的本质有了更清晰的认识^[10], 从而为更有效、更准确地测量声强度提供了基础。进而可以放宽国际标准 ISO9614 中的苛刻条件, 使得该方法可以直接应用于复杂的现场测量中。故对此方法的进一步改进及对复杂声场的进一步认识仍是今后研究的一个重点。声强度向量的各种应用研究也是一个研究重点。

(下转第 100 页)

表 1 被采用的松散颗粒材料的流阻数据

颗粒尺寸范围 (m)	$R_{iss}(\text{Pa s/m}^2)$	$\sigma_s(\%)$	$R_{la}(\text{Pa s/m}^2)$	$\sigma_a(\%)$
0.2-0.5	2.70×10^5	2.2	2.44×10^5	9.7
0.5-0.8	5.08×10^4	5.2	4.48×10^4	7.9
0.8-1.0	2.40×10^4	8.9	2.19×10^4	8.8
1.0-1.6	1.24×10^4	5.7	1.37×10^4	8.1
1.6-2.0	5.88×10^3	7.8	6.60×10^3	8.7
2.0-4.0	2.49×10^3	10.9	4.99×10^3	17.9

表中最后两列是用声学技术获得的结果(同一种材料)。 R_{la} 是平均流阻。每一种颗粒尺寸范围(除范围为 0.2mm-0.5mm 以外),样品厚度均取 8cm 和 16cm。颗粒尺寸范围为 0.2mm-0.5mm 的材料,为了在高流阻材料的背面得到满意的信噪比,样品厚度取 3cm 和 4cm,在这种情况下第一样品被重倒 4 次; σ_a 是相应的百分标准误差。

通过对松散颗粒材料流阻两种测试方法得到的数据分析揭示了这两种方法具有很好的兼容性,除了最大颗粒尺寸外,对表中所列颗粒尺寸范围两种方法是兼容的。稳态气流的方法虽然较简单,但比较耗时,与声学方法相比不确定度较大。

丁玉薇编译自: Gino Iannace, et al., J. A. S. A. 1999, 106(3): 1416.

1982, 83: 53-65.

- [7] A. F. Seybeit. [J]. J. Sound Vib, 1981, 75: 519-526.
- [8] 甘常胜. [J]. 应用声学, 1989, 8(5): 4.
- [9] 陈继康等. [J]. 应用声学, 1995, 14(6): 26.
- [10] 姜哲, 郭骅. [J]. 声学学报, 1991, 16(5): 330.
- [11] 徐滇等. [J]. 应用声学, 1991, 10(3): 9-15.
- [12] 任明章等. [J]. 应用声学, 1991, 10(5): 24.
- [13] 胡章伟等. 选择声强法用于强背景噪声下声源识别 [J]. 应用声学, 1991, 10(4): 31-36.
- [14] R. Hickling and W. Wei. [J]. J. A. S. A., 1995: 97.
- [15] Liu xun, etc. Passive tracking and size estimation of volume target based on acoustic intensity vector [J]. Chinese Journal of Acoustics, admitted.

当样品下的管子长度为 2.08m 时,式(8)中的比值 p_1/p_3 可以在最低特征频率 $f = 41\text{Hz}$ 时得到。当 $L = \lambda/4$ 时。声压极小值恰好在样品下,而声压极大值则在管端钢板上。由于相应于 $\lambda/4$ 的频率对温度的依赖性,故在每一轮测量之前应在位置 2 处测定其频率响应,检验它的数值。与第一极小值相应的频率可被取作计算比值 p_1/p_3 时所用频率。

(4) 测试结果

稳态气流测试是在样品两端维持不同压力情况下实现的,其范围为 0~50Pa,由于颗粒大小及样品厚度不同,气流速度范围为 0.3mm/s-26.2mm/s 之间。每一种颗粒尺寸范围的样品,用三种不同厚度进行测试,厚度范围在 3cm-38cm 之间。对每一种样品,由于颗粒大小分布不同以及倒入样品保持器时不同沉降将对测试结果产生影响,为克服这种影响,所以倒入样品保持器中的样品至少更换 3 次。测试数据如表,表中第一列是相应样品颗粒尺寸范围,第二列是材料流阻 R_{iss} 的总平均值,第三列是百分标准误差 σ_s ,它等于标准误差除以均值所得值的 100 倍,是样品变异性及测试随机误差的一种度量。

(上接第 97 页)

参考文献:

- [1] H. F. Olson. System responsive to the energy flow in sound waves [P]. U. S. Patent 1892644, 1932.
- [2] C. W. Clapp and F. A. Firestone. [J]. J. A. S. A., 1941, 13: 124-136.
- [3] S. Baker. [J]. J. A. S. A., 1995, 27: 269-273.
- [4] F. J. Fahy. Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals [J]. J. A. S. A., 1997, 62: 1057-1059.
- [5] J. Y. Chung. [J]. J. A. S. A., 1978, 64: 1613-1616.
- [6] J. C. Pascal and C. Carles. [J]. J. Sound Vib,