

基于等效源法和双面质点振速测量的声场分离方法*

毕传兴[†] 胡定玉 张永斌 徐亮

(合肥工业大学噪声振动工程研究所, 合肥 230009)

(2012年9月18日收到; 2012年12月20日收到修改稿)

目前基于等效源法的声场分离方法有两种输入方式, 一种以双测量面上的声压为输入, 另一种以单测量面上的声压和质点振速为输入. 本文以双测量面上的质点振速为输入, 提出一种新的基于等效源法的声场分离方法. 首先给出了该方法的理论推导, 然后通过数值仿真和实验验证了该方法的有效性. 通过与基于双面声压测量的声场分离方法的比较, 证明了该方法在分离质点振速方面的优越性. 此外, 在仿真中还研究了干扰声源强度和测量面间距对分离精度的影响.

关键词: 声场分离, 质点振速测量, 等效源法, 近场声全息

PACS: 43.35.Sx, 43.60.Sx

DOI: 10.7498/aps.62.084301

1 引言

近场声全息^[1-3] (NAH) 是一种强大的噪声源识别、定位工具. 利用在声源近场全息面上测得的复声压或质点振速, NAH 技术可以准确地实现三维声场的重建和预测. 但常规的 NAH 技术要求声源均位于测量面的同一侧, 其另一侧为自由场, 这一条件在很大程度上限制了 NAH 在实际工程中的应用. 为了解决该问题, 声场分离技术作为一种前处理方法被引入到 NAH 中^[2,4]. 该技术可以实现全息面两侧声源所产生声场的分离, 从而去除测量面背向干扰源的影响, 获得 NAH 重建所需要的自由场.

目前已发展出多种声场分离算法, 包括空间 Fourier 变换法^[4-6], 统计最优分离方法^[7-10]、边界元法^[11] 以及等效源法^[12,13] 等. 其中空间 Fourier 变换法和统计最优分离方法都受到测量面形状的限制; 边界元法虽不受到测量面形状的限制, 但该算法存在奇异积分等难于处理的问题, 计算效率低; 等效源法同样不受测量面形状的限制, 并且在计算精度和计算速度上相对边界元法具有较大的优势. 因此, 相对于其他算法, 基于等效源法的声场分离

方法具有更强的实用性.

现有的基于等效源法的声场分离方法有两种输入方式, 一种是以两个测量面上的声压作为输入^[12], 另外一种采用单个测量面上的声压和质点振速为输入^[13]. 在文献^[13] 提出的单测量面声场分离方法中, 质点振速是通过有限差分近似获得, 实际上依然是采用双面声压测量的方法. 本文直接采用两个测量面上的质点振速作为输入对基于等效源法的声场分离方法进行进一步拓展. 首先将推导基于等效源法和双面质点振速测量的声场分离公式, 然后通过数值仿真和实验验证该方法的有效性以及该方法在分离质点振速方面的优越性. 另外, 仿真中将干扰声源的强度以及两个测量面的间距对分离精度的影响开展研究.

2 理论基础

2.1 基于质点振速测量和等效源法的近场声全息

等效源法的基本原理为: 实际声源的辐射声场可以通过一系列位于声源内部^[14,15] 或测量面附近^[16,17] 的虚源所产生的声场代替. 如图 1 所示,

* 国家自然科学基金 (批准号: 11274087, 11004045) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20100111110007) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: cxbi@hfut.edu.cn

假设全息面 S_h 上有 M 个测量点, 虚源面 S_q 上有 N 个虚源, 则全息面上的质点振速可以表示为

$$\mathbf{V}_h = \mathbf{G}_{vh}\mathbf{Q}, \quad (1)$$

式中, \mathbf{V}_h 为全息面上的质点振速列向量; $\mathbf{Q} = [q_1, q_2, \dots, q_N]^T$ 为等效源强列向量; \mathbf{G}_{vh} 为虚源面到全息面的质点振速传递矩阵, 其中 $\mathbf{G}_{vh}(m, n) = \frac{1}{i\rho\omega} \frac{\partial g(\mathbf{r}_{hm}, \mathbf{r}_{qn})}{\partial n}$, ρ 为介质密度, ω 为角频率, \mathbf{r}_{hm} 表示全息面 S_h 上的第 m 个测量点的位置, \mathbf{r}_{qn} 表示虚源面 S_q 上的第 n 个虚源的位置, $g(\mathbf{r}_{hm}, \mathbf{r}_{qn})$ 为自由场格林函数

$$g(\mathbf{r}_{hm}, \mathbf{r}_{qn}) = \frac{\exp(ik|\mathbf{r}_{hm} - \mathbf{r}_{qn}|)}{4\pi|\mathbf{r}_{hm} - \mathbf{r}_{qn}|}, \quad (2)$$

式中, $k = \omega/c$ 为波数, c 为声速.

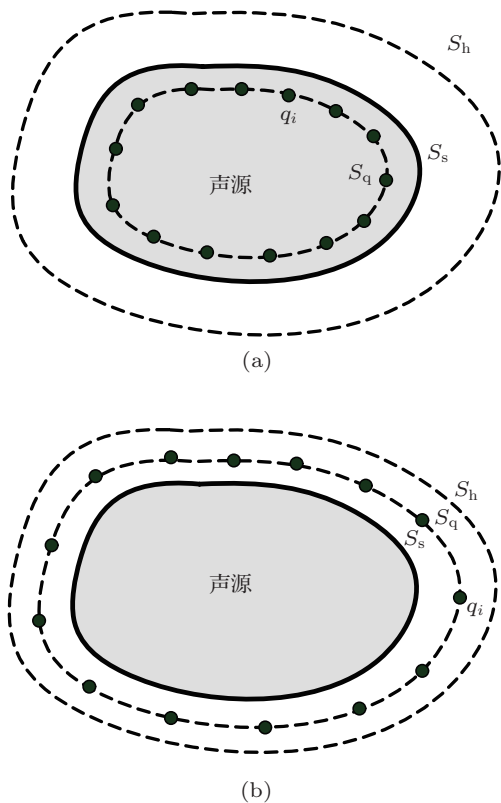


图1 等效源法示意图 (a) 虚源位于声源内部; (b) 虚源位于测量面附近

由 (1) 式可以求得源强列向量

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{G}_{vh})^+ \mathbf{V}_h, \quad (3)$$

式中, “+” 表示矩阵的广义逆. 在实际计算中, \mathbf{G}_{vh} 的广义逆一般通过奇异值分解获得.

利用求得的源强列向量可以计算任意重建面上的声压和质点振速

$$\mathbf{P}_r = \mathbf{G}_{pr}\mathbf{Q}, \quad (4)$$

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{G}_{vr}\mathbf{Q}, \quad (5)$$

式中, \mathbf{P}_r 和 \mathbf{V}_r 分别为重建面上的声压和质点振速列向量; \mathbf{G}_{pr} 和 \mathbf{G}_{vr} 分别为虚源面到重建面的声压传递矩阵和质点振速传递矩阵, 其中

$$\mathbf{G}_{pr}(m, n) = g(\mathbf{r}_{rm}, \mathbf{r}_{qn}), \quad (6)$$

$$\mathbf{G}_{vr}(m, n) = \frac{1}{i\rho\omega} \frac{\partial g(\mathbf{r}_{rm}, \mathbf{r}_{qn})}{\partial n}, \quad (7)$$

式中, \mathbf{r}_{rm} 为重建面上第 m 个重建点的位置.

2.2 基于等效源法和双面质点振速测量的声场分离方法

当测量面两侧都存在声源时, 如果直接采用测量的质点振速数据重建, 会在重建面上产生虚假的声源 [12], 此时需要去除来自测量面背向干扰源的影响后才能实现准确重建. 如图 2 所示, 在测量面 S_{h1} 和 S_{h2} 上的法向质点振速 \mathbf{V}_{h1} 和 \mathbf{V}_{h2} 分别可以表示为

$$\mathbf{V}_{h1} = \mathbf{V}_{11} + \mathbf{V}_{21}, \quad (8)$$

$$\mathbf{V}_{h2} = \mathbf{V}_{12} + \mathbf{V}_{22}, \quad (9)$$

式中, \mathbf{V}_{11} 和 \mathbf{V}_{12} 分别为声源 1 在测量面 S_{h1} 和 S_{h2} 上产生的法向质点振速, \mathbf{V}_{21} 和 \mathbf{V}_{22} 分别为声源 2 在 S_{h1} 和 S_{h2} 上产生的法向质点振速.

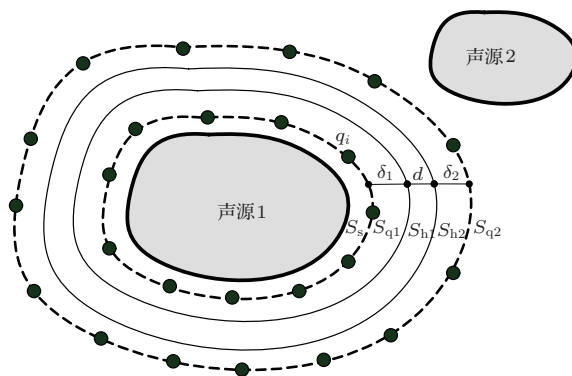


图2 声场分离示意图

由等效源法原理可知, \mathbf{V}_{11} , \mathbf{V}_{12} , \mathbf{V}_{21} 和 \mathbf{V}_{22} 可以通过一系列位于测量面附近的虚源表示为

$$\mathbf{V}_{11} = \mathbf{G}_{11}^v \mathbf{Q}_1, \quad (10)$$

$$\mathbf{V}_{21} = \mathbf{G}_{21}^v \mathbf{Q}_2, \quad (11)$$

$$\mathbf{V}_{12} = \mathbf{G}_{12}^v \mathbf{Q}_1, \quad (12)$$

$$V_{22} = G_{22}^y Q_2, \quad (13)$$

式中, G_{11}^y 和 G_{12}^y 分别为虚源面 S_{q1} 到测量面 S_{h1} 和 S_{h2} 的质点振速传递矩阵, G_{21}^y 和 G_{22}^y 分别为虚源面 S_{q2} 到测量面 S_{h1} 和 S_{h2} 的质点振速传递矩阵, Q_1 和 Q_2 分别为虚源面 S_{q1} 和 S_{q2} 上的虚源源强列向量.

(8)—(13) 式可以用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} V_{h1} \\ V_{h2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}^y & G_{21}^y \\ G_{12}^y & G_{22}^y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

对 (14) 式求逆, 即可求得源强列向量

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}^y & G_{21}^y \\ G_{12}^y & G_{22}^y \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{h1} \\ V_{h2} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

与基于等效源法和双面声压测量的声场分离方法相同^[12], 在对 (14) 式的求逆过程中不需要进行正则化处理. 将求得的源强列向量 Q_1 和 Q_2 分别代入 (10)—(13) 式, 即可求得声源 1 和声源 2 分别在两个测量面上产生的法向质点振速. 也可以根据 (4) 式求出两个声源分别在两个测量面上产生的声压

$$P_{11} = G_{11}^p Q_1, \quad (16)$$

$$P_{21} = G_{21}^p Q_2, \quad (17)$$

$$P_{12} = G_{12}^p Q_1, \quad (18)$$

$$P_{22} = G_{22}^p Q_2, \quad (19)$$

式中, G_{11}^p 和 G_{12}^p 分别为虚源面 S_{q1} 到测量面 S_{h1} 和 S_{h2} 的声压传递矩阵, G_{21}^p 和 G_{22}^p 分别为虚源面 S_{q2} 到测量面 S_{h1} 和 S_{h2} 的声压传递矩阵.

3 数值仿真

为了验证基于等效源法和双面质点振速测量的声场分离方法 (V-V 法) 的有效性, 下面将首先进行数值仿真研究. 选取两个半径为 0.01 m 的摆动球分别作为目标声源和干扰声源, 其径向速度均为 1 m/s. 如图 3 所示, 两个摆动球分别位于测量面两侧, 其中位于 $(-0.3, 0, -0.4)$ m 处的声源为目标声源, 位于 $(0.3, -0.25, 0.4)$ m 处的声源为干扰声源. 两个测量面 S_{h1} 和 S_{h2} 分别位于 $z_{h1} = 0$ m 和 $z_{h2} = 0.08$ m, 大小均为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. 测量点间隔为 0.1 m, 因此共有 11×11 个测量点. 等效源面 S_{q1}

与测量面 S_{h1} 之间的距离和等效源面 S_{q2} 与测量面 S_{h2} 之间的距离均为 1 倍的采样间隔. 仿真中两个测量面上的质点振速均加入了 30 dB 的高斯白噪声.

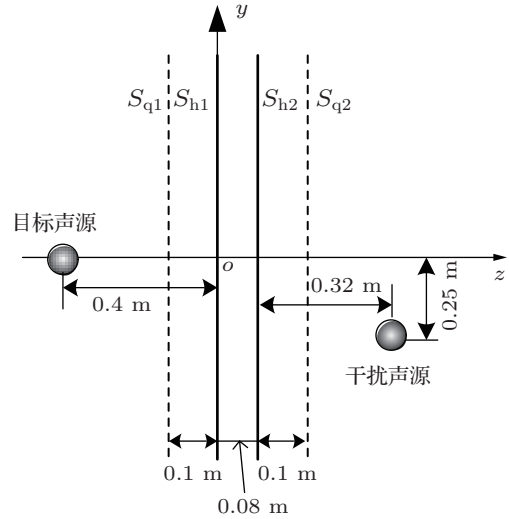


图 3 声源及测量面位置示意图

为了定量地描述分离误差的大小, 定义分离误差为

$$\eta = \sqrt{\sum_{i=1}^M (|p_i - \bar{p}_i|)^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^M |\bar{p}_i|^2} \times 100(\%), \quad (20)$$

式中, M 为测量点数, \bar{p}_i 和 p_i 分别为理论和分离得到的目标声源在第 i 个测量点处产生的声压或法向质点振速.

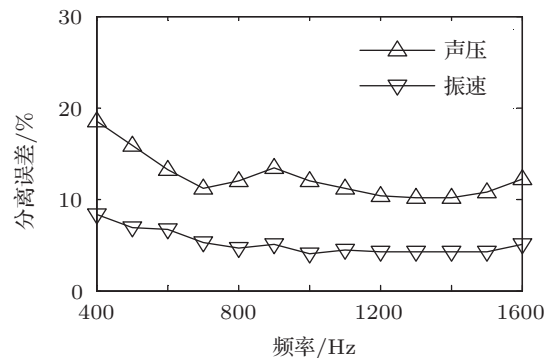


图 4 V-V 法分离声压和质点振速的误差随频率的变化

图 4 给出了采用 V-V 法分离声压和法向质点振速的误差随频率变化的曲线. 在 400—1600 Hz 的频率范围内, V-V 法分离声压的误差均在 18% 以下, 分离质点振速的误差均在 10% 以下. 由此可见, V-V 法无论分离声压还是质点振速都可以得到较好的结果, 但 V-V 法分离质点振速的精度要高于分离

声压的精度. 为了进一步说明 V-V 法的性能, 下面将与基于等效源法和双面声压测量的声场分离方法比较, 并分析测量面间距对 V-V 法分离精度的影响.

3.1 与基于等效源法和双面声压测量的声场分离方法的比较

基于等效源法和双面声压测量的声场分离方法已被证明是一种稳健的声场分离方法 [12]. 该方法和 V-V 法的区别在于该方法采用两个测量面上的声压作为输入, 因此, 这里将其简称为 P-P 法. 在下面的分析中 P-P 法和 V-V 法的等效源布置完全相同.

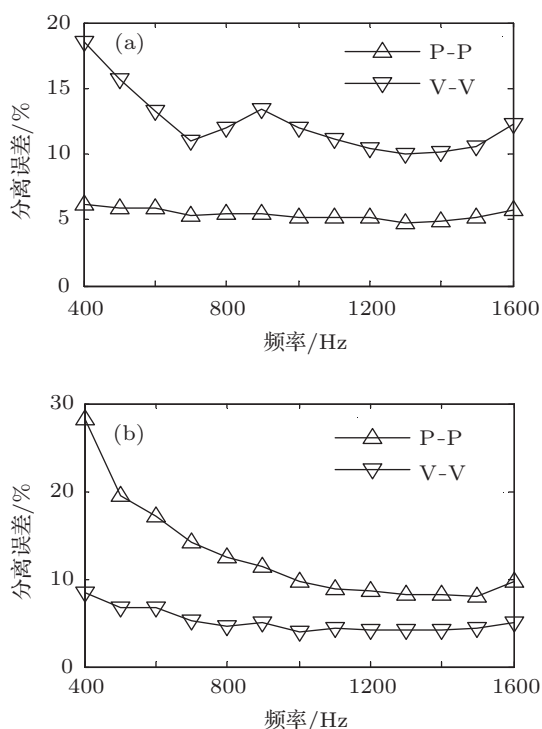


图5 P-P法和V-V法分离声压(a)和质点振速(b)的误差随频率的变化

分别用 P-P 法和 V-V 法分离测量面上的声压和质点振速, 并分别绘制声压和质点振速的分离误差随频率的变化曲线. 图 5(a) 显示的是不同频率下两种分离方法分离声压的误差, 由图可知, P-P 法分离声压的误差要小于 V-V 法. 图 5(b) 显示了 V-V 法分离质点振速的误差则要小于 P-P 法, 其误差始终保持在 10% 以下, 并且在整个频率范围内基本保持稳定. 虽然 P-P 法分离质点振速的误差随频率的升高而减小, 但始终比 V-V 法的分离误差大.

文献 [6] 在研究基于空间 Fourier 变换的声场

分离方法时也曾指出基于双面声压测量的声场分离方法可以获得更高的声压分离精度, 基于双面质点振速测量的声场分离方法可以获得更高的质点振速分离精度这一结论, 本文进一步证明了该结论, 并且说明了该结论不仅仅只适用于基于空间 Fourier 变换的声场分离方法, 也适用于其他方法.

另外, 在文献 [15] 中已说明在利用等效源法重建空间声场时, 以质点振速作为输入重建要比用声压作为输入重建获得的精度更高. 因此在非自由场环境下, 利用 V-V 法分离质点振速并将其用于重建会得到更好的重建结果.

3.2 目标声源和干扰声源的强度大小对 V-V 法的影响

下面将在保持目标声源的径向速度不变的情况下, 改变干扰声源的径向速度, 以研究干扰声源的强度对分离精度的影响. 图 6 给出了 400, 1000 和 1600 Hz 三个频率下干扰声源在两个测量面上产生的声功率的总和与目标声源在两个测量面上产生的声功率的总和之比为 0.1—10 时, V-V 法分离声压和质点振速的误差曲线, 其中图 6(a) 为分离声压的误差, 图 6(b) 为分离质点振速的误差. 从图 6(a)

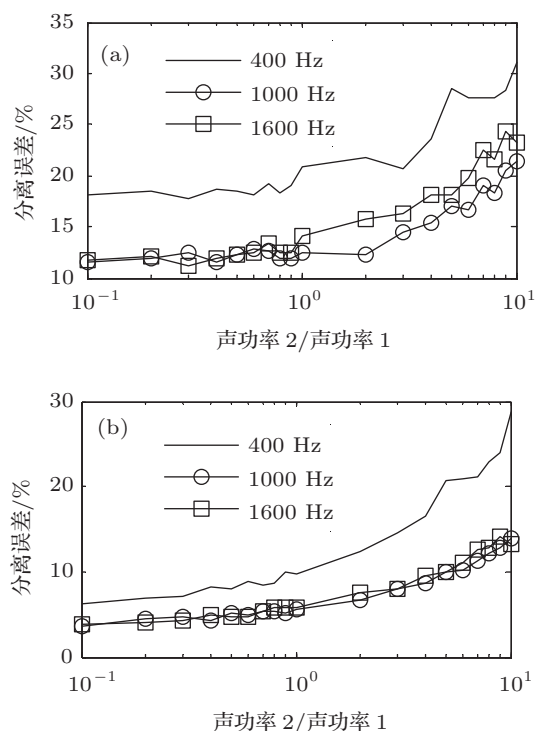


图6 干扰声源的强度对V-V法分离声压(a)和质点振速(b)的影响 声功率1为目标声源在两个测量面上产生的声功率总和; 声功率2为干扰声源在两个测量面上产生的声功率总和

和 6(b) 中都可以看出, 当干扰声源的强度小于目标声源时 (声功率 2/声功率 1 < 1), V-V 法的分离效果很稳定, 在该范围内, 分离误差变化不大. 随着干扰声源强度的增加, V-V 法的分离误差逐渐增大. 因此, 在实际应用中, 如果干扰声源的强度较大, 测量面应尽量靠近目标声源, 以保证在测量面上目标声源产生的声功率占优.

3.3 测量面间距对 V-V 法的影响

对于双测量面声场分离方法, 测量面之间的距离对分离精度的影响很大^[18], 因此研究测量面间距的大小对 V-V 法分离精度的影响是很必要的. 保持目标声源和测量面 S_{h1} 的位置不变, 移动 S_{h2} 的位置, 使两个测量面的间距从 0.1λ (λ 为波长) 逐渐增加到 2λ . 为避免在移动过程中测量面 S_{h2} 与干扰声源过近而导致在两个测量面上干扰声源的声功率占优, 甚至出现 S_{h2} 不再位于两个声源之间的情况, 在移动 S_{h2} 的同时也移动干扰声源, 使其球心到测量面 S_{h2} 的距离始终保持为 0.32 m .

图 7(a) 和 7(b) 分别给出了 400, 1000 和 1600 Hz 三个频率下, 不同的测量面间距下 V-V 法分离声压和质点振速的误差曲线. 从两图均可看出, 误差曲

线规律性的出现峰值, 该峰值出现在测量面间距为 0.5λ 的整数倍附近, 从 0.5λ 的整数倍开始, 在之后的 0.1λ 范围内分离误差都很大. 对于这种现象, 称其为奇异间距引起的误差增大. 对 400—1600 Hz 范围内其他的频率进行分析, 均出现这种现象, 并且有着频率越高, 峰值越大的趋势. 在整个测量间距的分析范围内, 只有在 $0.1\lambda—0.5\lambda$ 的区间, 分离误差的变化不大, 分离的稳定性最好, 因此, 测量面间距应尽量在该范围内选择.

改变两测量面上的信噪比 (SNR), 分别选择 SNR 为 35, 25 和 15 dB, 研究不同 SNR 的情况下, 测量面间距对 V-V 法的影响. 这里只在 $0.1\lambda—0.5\lambda$ 的范围内进行研究. 图 8 给出了频率为 400 Hz 时, V-V 法分离声压和质点振速的误差随测量面间距的变化. 从图中可以看出, 分离误差主要决定于 SNR 的大小, 测量面间距的影响并不明显.

图 9 和图 10 分别给出了频率为 1000 和 1600 Hz 时, 在不同的 SNR 下 V-V 法的分离误差随测量面间距的变化. 同样, SNR 的大小对分离精度起着决定性的作用. 同频率为 400 Hz 的情况相比, 随着 SNR 的减小, 测量面间距的影响增大, 尤其在 SNR 为 15 dB 时表现最明显, 但此时分离结果已失效.

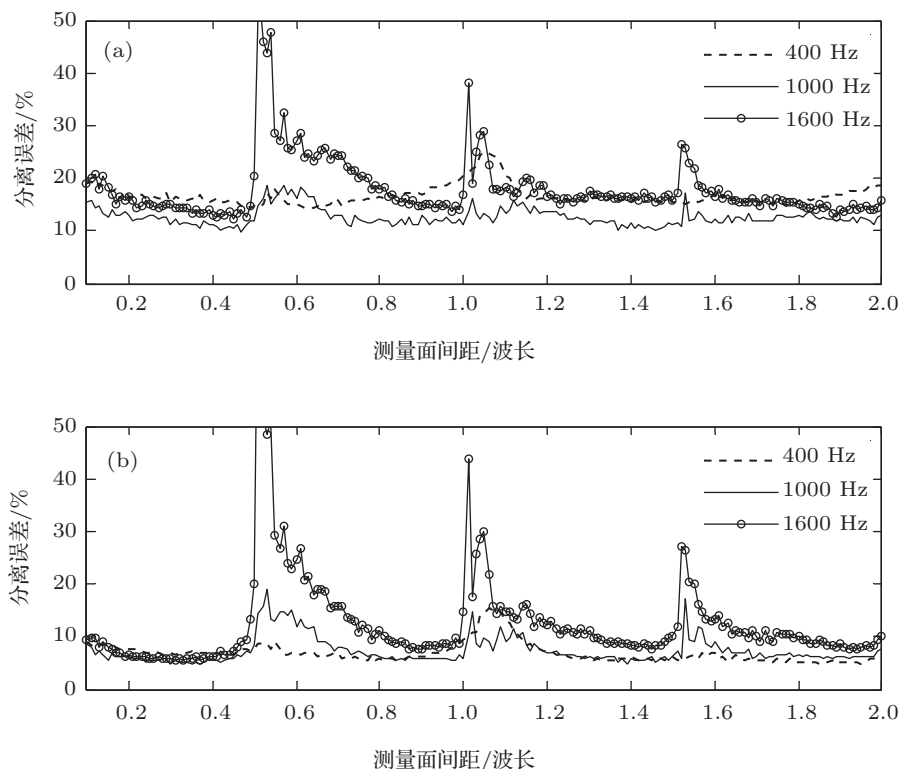


图 7 V-V 法分离声压 (a) 和质点振速 (b) 的误差随测量面间距的变化

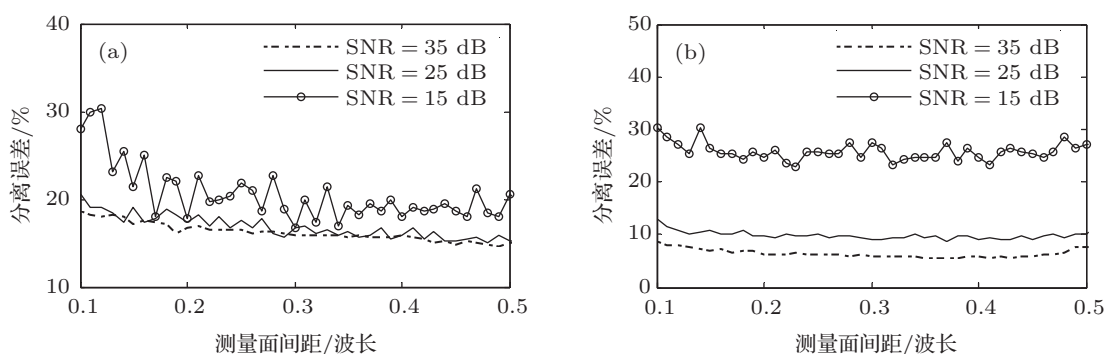


图 8 频率为 400 Hz 时 V-V 法分离声压 (a) 和质点振速 (b) 的误差随测量面间距的变化

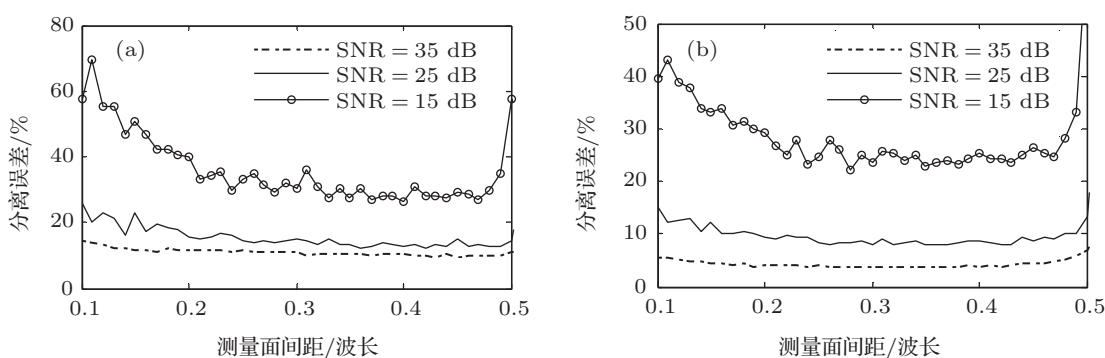


图 9 频率为 1000 Hz 时 V-V 法分离声压 (a) 和质点振速 (b) 的误差随测量面间距的变化

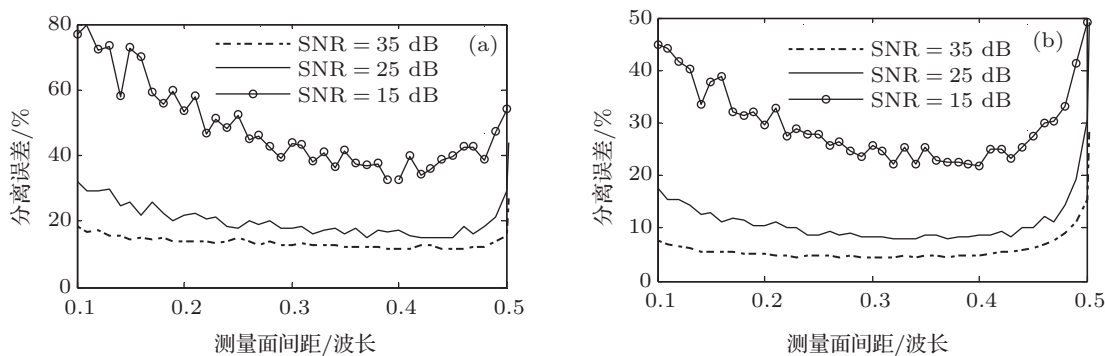


图 10 频率为 1600 Hz 时 V-V 法分离声压 (a) 和质点振速 (b) 的误差随测量面间距的变化

对 400—1600 Hz 范围内其他的频率进行分析,发现随着频率的增大,测量面间距的影响越大(比较图 8 和图 10 也可发现该现象),但主要集中在 0.1λ — 0.2λ 的区间和 0.5λ 附近的范围内.这是因为对于 0.1λ — 0.2λ 的区间来说,如果频率较高,会导致两个测量面间距过小,目标声源在两个测量面上产生的质点振速差异也很小,而 V-V 法的原理则是根据目标声源在两个测量面上产生的质点振速差异将目标声源分离出来,因此过小的质点振速差异会被随机噪声掩盖而不足以实现精确的分离;

测量面间距在 0.5λ 附近的范围内误差的增加,则是由于奇异间距引起.实际应用中,对于分析频率较高的情况(本例为 1000 Hz 以上),选择测量面间距时要考虑到这两方面的影响,测量面间距最好在 0.2λ — 0.4λ 的范围内选取;而当分析频率较低时,在 0.1λ — 0.5λ 的范围内选取测量面间距即可得到较好的分离效果.

4 实验验证

为了进一步验证 V-V 法的有效性,以及 V-V 法

分离质点振速的优势,下面将采用本文所提出的分离方法做进一步的实验研究.实验是在半消声室中进行,声源为两个相同的扬声器,实验布置如图 11 所示.位于点 (0.45, 0, -0.12) m 处的扬声器作为目标声源,位于点 (0.3, 0, 0.18) m 处的扬声器作为干扰声源.在 $z = 0$ m 和 $z = 0.08$ m 两个平面上进行测量,根据仿真所得结论,选取 0.08 m 作为测量面

间距保证了对以下两个分析频率都可以进行有效的声场分离.采用 Microflown 的 $p-u$ 声强探头同时测量声压和质点振速.测量面的大小为 0.75 m (x) \times 0.6 m (y),测量点为 16×13 的点阵, x 和 y 方向的测量间隔均为 0.05 m.等效源面与测量面之间的距离的选取方法与仿真中相同.

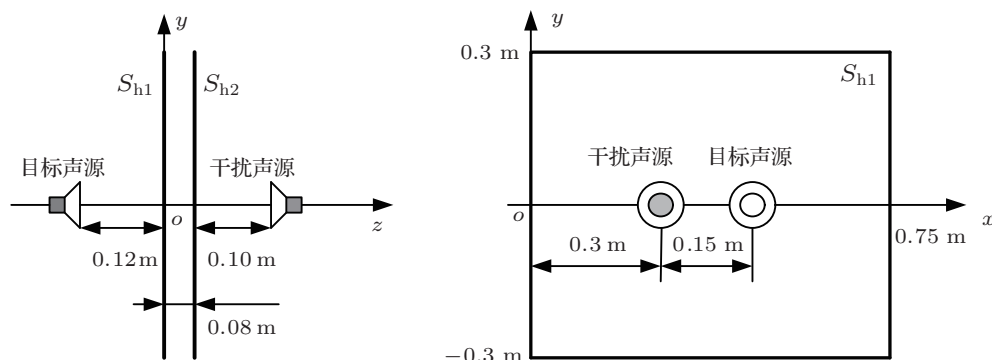


图 11 实验布置示意图

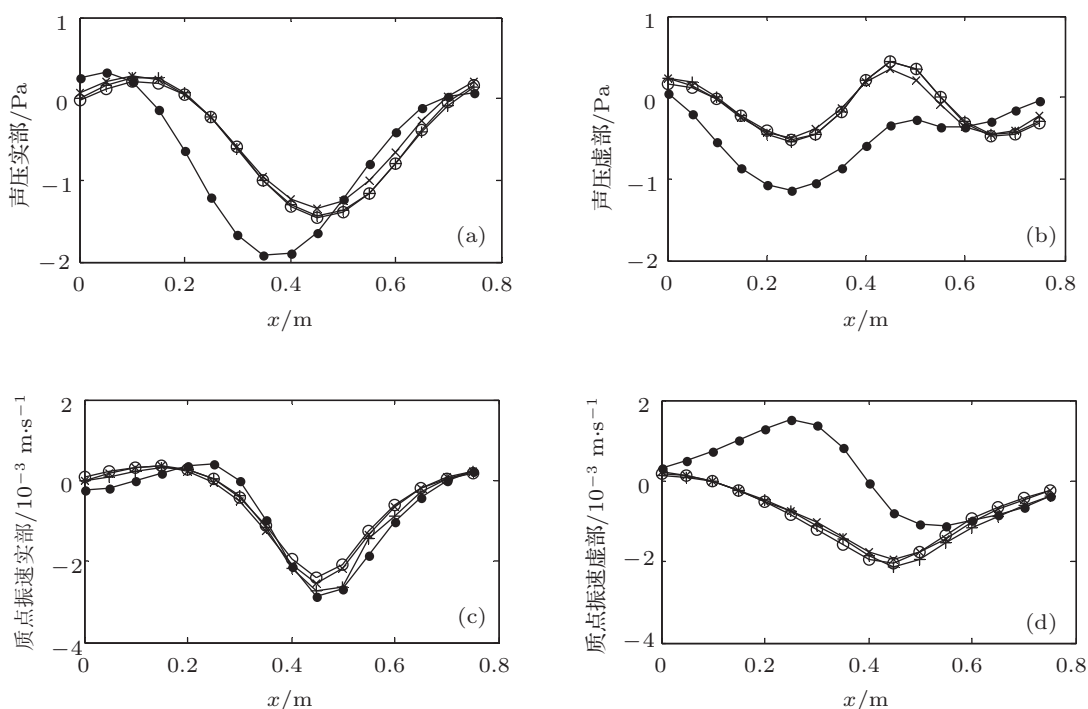


图 12 600 Hz 时测量面 S_{h1} 上 P-P 法和 V-V 法的分离效果比较 —•—, 混合值 (两个声源同时开); \circ —, 真实值 (只开目标声源); +—, P-P 法分离结果; \times —, V-V 法分离结果 (a) 分离声压的实部; (b) 分离声压的虚部; (c) 分离质点振速的实部; (d) 分离质点振速的虚部

首先选取频率为 600 Hz 的情况进行分析.图 12 给出了在测量面 S_{h1} 的中轴线 (x 轴) 上目标声源和干扰声源共同产生的混合声压和混合质点振速、目标声源单独产生的声压和质点振速以及分别采用 P-P 法和 V-V 法分离后得到的声压和质点

振速.其中图 12(a) 和图 12(b) 显示的是声压的实部和虚部,图 12(c) 和图 12(d) 显示的是质点振速的实部和虚部.从图中可以看出,混合声压和混合质点振速同其真实值之间存在较大差异,尤其是质点振速,干扰的存在导致了新的峰值出现;分别利用 P-P

法和 V-V 法进行分离后, 所得到的声压和质点振速都和真实值符合得很好, 这说明了 V-V 法和 P-P 法一样, 都是有效的声场分离方法.

从图 12 中还可看出, P-P 法分离的声压更接近真实值, V-V 法分离的质点振速更接近真实值. 根据 (20) 式计算两种方法在测量面 S_{h1} 上的分离误差, 可以得到 P-P 法分离声压和质点振速的误差分别为 12.59% 和 14.49%, V-V 法为 15.75% 和 8.54%. 这也进一步证明了仿真中得到的结论: P-P 法可以更好地用于声压分离, V-V 法可以更好地用于质点

振速分离.

图 13 给出了频率为 800 Hz 时测量面 S_{h1} 的中轴线上目标声源和干扰声源共同产生的混合声压和混合质点振速、目标声源单独产生的声压和质点振速, 以及分别采用 P-P 法和 V-V 法分离后得到的声压和质点振速. 其中 P-P 法分离声压和质点振速的误差分别为 5.31% 和 14.72%, V-V 法为 11.13% 和 9.91%. 由图 13 所得到的结论与图 12 的结论完全相同.

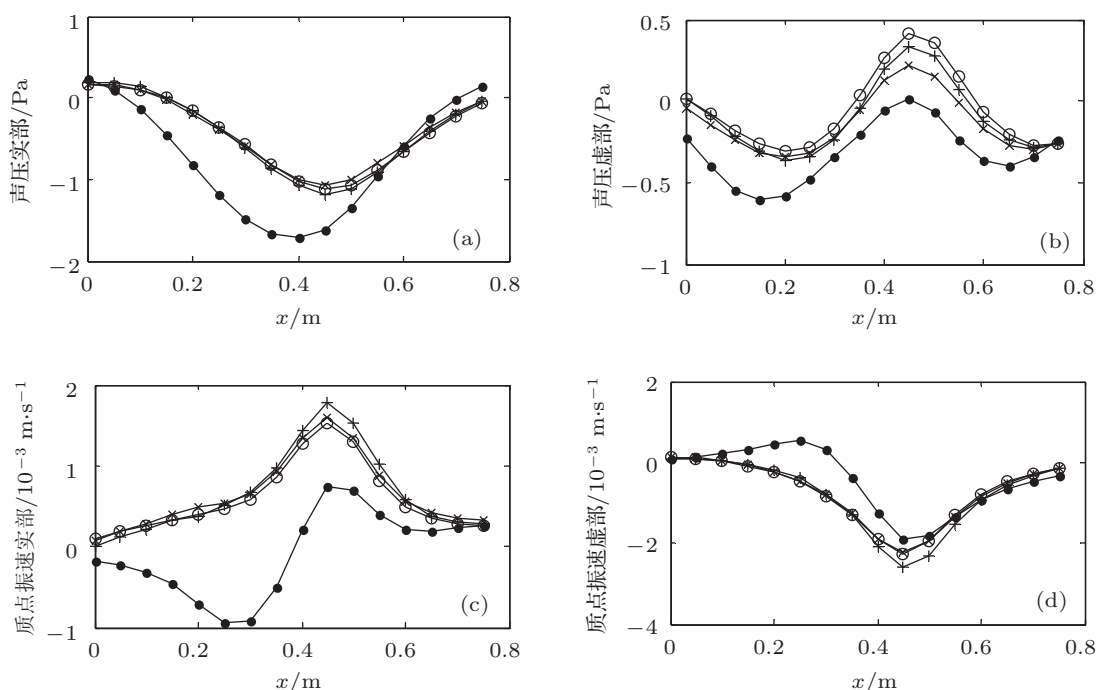


图 13 800 Hz 时测量面 S_{h1} 上 P-P 法和 V-V 法的分离效果比较 —, 混合值 (两个声源同时开); \circ , 真实值 (只开目标声源); +, P-P 法分离结果; \times , V-V 法分离结果 (a) 分离声压的实部; (b) 分离声压的虚部; (c) 分离质点振速的实部; (d) 分离质点振速的虚部

5 结论

本文以双测量面上的质点振速为输入提出了一种新的基于等效源法的声场分离方法. 文中给出了该方法的理论推导, 并通过数值仿真和实验验证了该方法的有效性. 数值仿真和实验结果还表明, 与基于双面声压测量的方法相比, 该方法分离质点振速的精度更高, 但分离声压时, 基于双面声压测量的方法效果更好. 另外, 通过数值仿真研究了干扰声源的强度对分离精度的影响, 发现只要在

测量面上目标声源的强度大于干扰声源的强度, 就可以保证准确的分离. 对 V-V 法中测量间距的影响研究则显示测量面间距应在 (0.1—0.5) 倍的声波波长范围内选择, 但当分析频率较高时, 应该尽量在 (0.2—0.4) 倍的声波波长范围内选择. 本文方法的提出, 和基于等效源法和双面声压测量的方法构成了一个完整的基于等效源法声场分离方法的理论体系, 在实际应用中可以根据需要选择采用基于声压测量或者基于质点振速测量的声场分离方法, 以获得更好的分离效果.

- [1] Williams E G 1999 *Fourier Acoustics—Sound Radiation and Nearfield Acoustic Holography* (1st Ed.) (London: Academic Press)
- [2] Maynard J D, Williams E G, Lee Y 1985 *J. Acoust. Soc. Am.* **78** 1395
- [3] Zhang H B, Jiang W K, Wan Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 313 (in Chinese) [张海滨, 蒋伟康, 万泉 2008 物理学报 **57** 313]
- [4] Yu F, Chen J, Chen X Z 2003 *Acta Acustica* **28** 385 (in Chinese) [于飞, 陈剑, 陈心昭 2003 声学学报 **28** 385]
- [5] Yu F, Chen J, Li W B, Chen X Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 789 (in Chinese) [于飞, 陈剑, 李卫兵, 陈心昭 2005 物理学报 **54** 789]
- [6] Bi C X, Zhang Y B, Xu L, Chen X Z 2010 *Acta Acustica* **35** 653 (in Chinese) [毕传兴, 张永斌, 徐亮, 陈心昭 2010 声学学报 **35** 653]
- [7] Li W B, Chen J, Yu F, Bi C X, Chen X Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1253 (in Chinese) [李卫兵, 陈剑, 于飞, 毕传兴, 陈心昭 2005 物理学报 **54** 1253]
- [8] Hald J 2006 *Proceedings of Euro-Noise 2006* Tampere, Finland, May 30–June 1, 2006 p1
- [9] Jacobsen F, Jaud V 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 1550
- [10] Zhang Y B, Chen X Z, Jacobsen F 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 3518
- [11] Langrenne C, Melon M, Garcia A 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 2750
- [12] Bi C X, Chen X Z, Chen J 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **123** 1472
- [13] Bi C X, Chen X Z 2008 *Proceedings of Inter-Noise 2008* Shanghai, China, October 26–29, 2008
- [14] Koopmann G H., Song L, Fahline J 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **86** 2433
- [15] Zhang Y B, Jacobsen F, Bi C X, Chen X Z 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **126** 1257
- [16] Sarkissian A 2004 *J. Acoust. Soc. Am.* **115** 1593
- [17] Sarkissian A 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **118** 671
- [18] Cheng M, Mann A, Pate A 1996 *J. Acoust. Soc. Am.* **99** 3550

Sound field separation technique based on equivalent source method and double-layer particle velocity measurements*

Bi Chuan-Xing[†] Hu Ding-Yu Zhang Yong-Bin Xu Liang

(Institute of Sound and Vibration Research, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(Received 18 September 2012; revised manuscript received 20 December 2012)

Abstract

Two sound field separation techniques based on equivalent source method are proposed: one is based on the double-layer pressure measurements and the other is based on the single-layer pressure-velocity measurements. In this paper, a sound field separation technique based on equivalent source method but using the double-layer velocity measurements is proposed. First, the theoretical description of this technique is given, and then numerical simulations and experiments are conducted to demonstrate the validity of this technique. By comparison with the technique based on double-layer pressure measurements, the superiority of the proposed technique in separating particle velocity field is shown. And also, in the numerical simulations, the influences of the strength of disturbing source and the distance between two measurement planes on separation accuracy are investigated.

Keywords: sound field separation technique, particle velocity measurement, equivalent source method, nearfield acoustic holography

PACS: 43.35.Sx, 43.60.Sx

DOI: 10.7498/aps.62.084301

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274087, 11004045) and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, China (Grand No. 20100111110007).

[†] Corresponding author. E-mail: cxbi@hfut.edu.cn