

三维自由空间中指向性信息未知偶极声源的等效源识别方法

徐 滢, 张小正, 王 帅, 董光旭, 毕传兴

(合肥工业大学噪声振动工程研究所, 安徽 合肥 230009)

摘要: 偶极声源的指向性是影响声源识别结果的关键因素。目前, 偶极声源的识别方法通常是基于声源的指向性信息先验假设, 而在实际偶极声源识别中, 很难事先获得声源的指向性信息; 此外, 声源分布在二维平面上的假设通常不适用于实际的气动系统。为了准确识别指向性信息未知的偶极声源, 并获得声源的三维成像结果, 提出了一种基于加权迭代 L1 最小化算法的等效源方法。该方法将声源指向矢量作为未知参数, 从测量声压与等效源源强的传递函数中分离出来, 并通过加权迭代 L1 最小化算法将声源指向矢量与等效源源强一起求解出来, 进而利用这些求解获得的声源信息进一步预测声场。与以往的偶极声源识别方法不同, 该方法可以实现指向性信息未知偶极声源的三维成像。指向性信息未知偶极声源的三组仿真案例和自制类偶极声源的实验研究验证了该方法的有效性和鲁棒性。

关键词: 偶极声源; 指向性信息; 三维成像; 等效源方法

中图分类号: O422.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)02-0545-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.02.026

引 言

在过去几十年里, 随着航空、地面运输和风力涡轮机等工程领域的迅速发展, 伴随而来的气动噪声也越来越受到人们的关注。准确定位和量化气动噪声源对于气动噪声控制至关重要。自 Billingsley 等^[1]建立传声器阵列的理论基础以来, 许多基于传声器阵列测量的方法因其强大的定位和测量能力被广泛应用于气动噪声源的识别研究中^[2-4]。其中, 波束形成方法^[5-7]和逆方法^[8]由于其理论简单且测量过程灵活, 在处理复杂环境下的气动声学问题上具有很大优势, 因此成为气动噪声源识别的常用方法。偶极声源作为许多气动系统中的主要声源类型, 通常是气动噪声源识别研究的重要目标^[9-10]。与单极声源相比, 偶极声源在产生机理和传播特性上存在很大差异, 具体表现在偶极声源具有清晰的指向性。值得注意的是, 在偶极声源识别中, 声源指向性通常是影响识别结果的关键因素, 采用基于单极声源假设的识别方法会导致对声源位置和源强的错误估计。因此, 在偶极声源识别中考虑声源指向性的影响具有重要意义。

目前, 在偶极声源识别研究中考虑声源指向性信息的方式主要有以下两种: (1) 在偶极声源识别过

程中假设声源指向性信息已知; (2) 在未知指向性信息情况下, 通过一些信号处理手段消除指向性对声源识别结果的影响。基于第一种方式, Liu 等^[11]比较了单极声源和偶极声源在声传播过程中的差别, 并提出了一种偶极波束形成方法, 实现了偶极声源位置的准确估计。由于声源指向性信息通常未知且难于准确预判^[12-13], 近年来未知声源指向性信息的偶极声源识别研究引起了越来越多学者的关注。Jordan 等^[14]基于线阵列对单个偶极声源辐射的声压信号进行测量, 提出了一种基于信号修正的波束形成方法, 该方法通过检测并修正潜在偶极声源辐射声压的相位来定位指向性信息未知的偶极声源。Avarvand 等^[15]提出了一种基于多信号分类算法的修正方法, 该方法假设声源和传声器之间的相位延迟已知, 通过求解所构建的哈密顿特征方程对声源信号的幅值进行拟合, 从而定位指向性信息未知的偶极声源。Suzuki^[16]提出了一种基于广义逆波束形成的多极分解方法来识别指向性信息未知的偶极声源。Pan 等^[17]假设声源彼此不相干, 并且具有正交的辐射模式, 将多极正交波束形成与反演方法相结合, 实现了对指向性信息未知偶极声源的准确识别。最近, Gao 等^[18]发展了另一种修正的波束形成方法, 该方法通过计算每个扫描点的最大输出方向来实现指向性信息未知偶极声源的定位。

上述偶极声源识别方法最常见的配置是将感兴趣区域定义为一个平面,这就隐含了一个假设,即所有的噪声源都位于这个平面上。然而在实际气动系统中,声源通常体型较大,并且分布在三维空间中。因此很多学者开展了气动声源的三维成像研究^[19-22]。与声源平面成像研究相比,声源三维成像研究更为复杂。一方面,在各个方向上都需要良好的空间分辨率;另一方面,问题的规模(即感兴趣区域中潜在源的数量)大幅增加。常规波束形成方法在阵列中心径向上的空间分辨率较差,且旁瓣水平较高,因此不适用于三维成像。反卷积技术,如 CLEAN-SC, DAMAS 等技术^[20-21]能够在各个方向上实现良好的空间分辨率和精度。Sarradj^[21]基于不同导向矢量公式的 CLEAN-SC 技术实现良好的声源三维成像,但是这些方法的计算成本很高。随后,Porteous 等^[22]基于正交阵列测量发展了一种乘法波束形成方法,可以准确定位空间中的偶极声源,并获得声源的三维成像结果,然而在该方法中需要已知声源的指向性信息。

等效源方法理论简单,计算效率高,近年来被广泛地应用在气动噪声源识别研究中^[23-28],然而目前关于气动声源的三维成像研究通常是基于单极声源传播假设^[29-31]。因此,本文提出一种基于加权迭代 L1 最小化算法的等效源方法,用于三维空间中指向性信息未知偶极声源的识别研究。与以往的气动噪声源识别方法不同,该方法基于偶极声源传播假设,并可以在声源指向性信息未知的情况下实现声源的三维成像。

1 基于加权迭代 L1 最小化算法的等效源方法

之所以偶极声源的指向性会影响声源的识别结果,是因为在偶极声源识别过程中,声源指向矢量始终存在于传递函数当中。Liu 等^[11]假设声源指向性信息已知,通过将指向矢量的特征项与单极格林函数相乘发展了偶极传递函数,利用该函数可以准确估计偶极声源的位置。相反,本文是将偶极传递函数中所含的指向矢量分离出来,因此声源的识别过程中可以不需要指向性的先验信息。

假设包含真实声源的三维区域被离散成 N 个等效源,用包含 M 个传声器的阵列去测量声压,第 n 个等效源对第 m 个传声器所测声压的贡献可以表示为:

$$p(x_m, \omega) = g_m(y_n, \omega) \cdot \alpha_n \quad (1)$$

式中 x_m 和 y_n 分别表示第 m 个传声器和第 n 个等效源的位置矢量,其中, $m = 1, 2, \dots, M$; $n = 1, 2, \dots, N$; ω 为声源角频率; α_n 表示第 n 个等效源源

强; $g_m(y_n, \omega)$ 表示第 n 个等效源与第 m 个传声器之间的传递函数,对于偶极声源,它可以表示成:

$$g_m(y_n, \omega) = \frac{e^{-jkr_{mn}}}{4\pi r_{mn}} \cos(r_{mn}, \xi_n) \quad (2)$$

式中 k 表示波数; r_{mn} 表示第 n 个声源到第 m 个传声器的距离矢量; r_{mn} 表示距离矢量 r_{mn} 的模,即 $r_{mn} = |r_{mn}| = |x_m - y_n|$; ξ_n 为偶极声源的指向矢量,即 $\xi_n = (\xi_{nx} \ \xi_{ny} \ \xi_{nz})^T$ 。

为了消除指向性对偶极声源识别过程的影响,将偶极声源的指向矢量视为未知参数,从传递函数中分离出来,则式(1)可以进一步表示为:

$$p(x_m, \omega) = \psi_m(y_n, \omega) \cdot l_n \quad (3)$$

$$\psi_m(y_n, \omega) = \frac{e^{-jkr_{mn}}}{4\pi r_{mn}} (\cos \alpha_{mn} \ \cos \beta_{mn} \ \cos \gamma_{mn}) \quad (4)$$

$$l_n = \alpha_n \xi_n \quad (5)$$

式中 α_{mn}, β_{mn} 和 γ_{mn} 分别表示 r_{mn} 与笛卡尔坐标系中的 x, y 和 z 轴的夹角。

从式(3)中可以看出,声源的指向矢量已经从 $g_m(y_n, \omega)$ 中被分离到 l_n 中。

因此,第 m 个传声器所测得的总声压可以表示为:

$$P(x_m, \omega) = \varphi_m(\omega) L \quad (6)$$

$$\varphi_m(\omega) = [\psi_{mx}(y_1, \omega) \ \psi_{my}(y_1, \omega) \ \psi_{mz}(y_1, \omega) \ \dots \ \psi_{mx}(y_N, \omega) \ \psi_{my}(y_N, \omega) \ \psi_{mz}(y_N, \omega)] \quad (7)$$

$$L = [l_{1x} \ l_{1y} \ l_{1z} \ \dots \ l_{Nx} \ l_{Ny} \ l_{Nz}]^T \quad (8)$$

式中 $\psi_{mx}(y_1, \omega), \psi_{my}(y_1, \omega)$ 和 $\psi_{mz}(y_1, \omega)$ 分别表示 $\psi_m(y_1, \omega)$ 在笛卡尔坐标系中的三个分量; l_{1x}, l_{1y} 和 l_{1z} 分别表示 l_1 在笛卡尔坐标系中的三个分量。

所有传声器测得的声压与等效源源强之间的传递关系可以表示为:

$$P(\omega) = G(\omega) L \quad (9)$$

$$P(\omega) =$$

$$[P(x_1, \omega) \ \dots \ P(x_m, \omega) \ \dots \ P(x_M, \omega)]^T \quad (10)$$

$$G(\omega) = [\varphi_1(\omega)^T \ \dots \ \varphi_m(\omega)^T \ \dots \ \varphi_M(\omega)^T]^T \quad (11)$$

式中 $P(\omega)$ 为一个 M 维列向量; $G(\omega)$ 为 $M \times 3N$ ($M < 3N$) 传递矩阵。

经过上述处理,在声源识别过程中虽然不需要考虑声源的指向性信息,但是待求解的未知数相应地增加了 3 倍。考虑到在实际中声源通常是稀疏分布的,然而常规的等效源方法在采用 Tikhonov 正则化求解这种空间稀疏声源分布问题时往往无法获得最优解,其重建结果的空间分辨率不高,因此本文将反求源强和指向矢量的问题转化到稀疏框架下进行,在求解过程中引入 Candès 等^[32]所提出的加权范数算法,求解过程如下:

输入: 传递矩阵 $G(\omega)$, 声压向量 $P(\omega)$, 最大迭代数 $s_{\max}$ 。

输出: 源强矢量 L^s 。

初始化: 迭代序号 $s=0$, 权重系数向量 w^s 中的元素为 $w_i^{(0)}=1; i=1, \dots, 3N$ 。

步骤1: 求解以下加权 L1 范数最小化问题:

$$\arg \min_L \|w^s L^s\|_1 \text{ s.t. } \|P(\omega) - G(\omega) L^s\|_2^2 \leq \epsilon \quad (12)$$

式中 ϵ 为可调节的数据保真度约束, 通常为信号范数的 20%~30%; s 为迭代次数。

步骤2: 更新加权系数向量中的元素:

$$w_i^{s+1} = \frac{1}{|L_i^s| + \delta} \quad (13)$$

步骤3: 更新迭代序号 $s=s+1$ 。如果 $s=s_{\max}$, 迭代停止, 否则返回到步骤1。

公式(12)是基于加权迭代 L1 最小化算法的等效源方法的目标方程。在根据公式(13)更新加权系数向量的过程中, 引入分母项 $\delta > 0$, 以避免某些点源源强为 0 时分母为 0 的存在, 保证 w_i^{s+1} 的存在性。

2 数值仿真与验证

为了研究本文方法在声源定位精度、声源源强估计和声源指向估计等方面的性能, 下面将开展三维空间中指向性信息未知偶极声源的仿真研究, 并进一步研究该方法在不同声源频率和不同信噪比下的性能。

理想的偶极声源辐射声压的仿真数据由下式得到:

$$p_s(x_m, \omega) = \frac{e^{-jkr_{ms}}}{4\pi r_{ms}} \cos(r_{ms}, \xi_s) \cdot \alpha_s \quad (14)$$

式中 r_{ms} 表示偶极声源到第 m 个传声器的距离矢量; r_{ms} 表示距离矢量 r_{ms} 的模, 即 $r_{ms} = |r_{ms}| = |y_s - x_m|$; ξ_s 为偶极声源的指向矢量; α_s 表示偶极声源源强。

为了模拟实测的声压数据, 在仿真声压信号中加入 30 dB 的高斯白噪声。考虑到平面阵列的空间识别精度较差, 这里采用两个相互正交的传声器阵列进行声学测量, 如图 1 所示。两个子阵列分别位于 $y=0.5$ m 和 $z=0.5$ m 的平面上, 每个子阵列包含 30 个传声器, 以五个环形模式排列, 半径分别为 0.08, 0.16, 0.24, 0.32 和 0.4 m。同样排列模式的一个预测平面位于 $y=0.8$ m 的平面上。在正交阵列中间显示的是体积为 0.4 m $\times$ 0.4 m $\times$ 0.4 m 的三维扫描网格, 网格包含 729 个等效源点, 两个相邻等效源点之间的间隔为 0.05 m。在三维空间中布置了两个偶极声源, 其位置分别是 $(-0.05$ m, -0.05 m, -0.05 m) 和 $(0.05$ m, 0.05 m, 0.05 m), 分别对应第

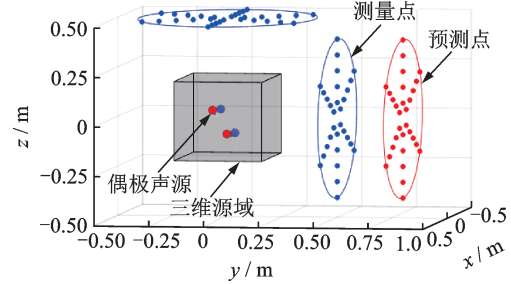


图1 仿真模型的布局示意图

Fig. 1 Geometric description of the simulation model

274 和 456 个扫描点。

下面将通过三组仿真案例研究所提方法的性能。为了更清晰地展示目标声源, 这里给出了三组案例中偶极声源的空间分布示意图, 如图 2(a), 3(a) 和 4(a) 所示。案例一中两个偶极声源的指向矢量分别是 $(0, 1, 0)$ 和 $(0, 0, 1)$; 案例二中两个偶极声源的指向矢量分别是 $(0, 0.8, 0.6)$ 和 $(0.707, 0, 0.707)$ 。案例一和案例二的声源频率都是 4 kHz。案例三中两个偶极声源的指向矢量分别是 $(0, 0.8, 0.6)$ 和 $(0, 1, 0)$, 声源频率为 1 kHz。三组案例中偶极声源源强都是 1。由于在仿真中已知偶极声源的真实位置、源强和指向性信息, 因此它们可以作为参考, 与所提方法重建的声源信息进行比较, 进而评估所提方法的重建精度。此外, 基于给定的声源信息, 预测面上的参考声压可以通过公式(14)计算获得。

案例一、二和三中偶极声源的识别结果分别如图 2~4 所示。图 2(b), 3(b), 图 4(b) 分别给出了三组案例中所提方法重建的所有等效源源强, 从图中可以看出, 三组案例中等效源源强均在第 274 和第 456 个等效源点处出现了突出的峰值, 这与真实声源的位置一致。此外还可以观察到在案例一中峰值处等效源源强的估计值分别是 0.9890 和 0.9981, 案例二中的峰值处等效源源强的估计值分别是 1.001 和 0.9999, 案例三中的峰值处等效源源强的估计值分别是 1.02 和 0.9933, 与真实声源源强非常接近。此外, 在三组案例中, 其他等效源点处的源强估计值几乎都趋近于零。这里声源的指向性信息和声源源强一起被求解, 案例一中两个偶极声源的指向矢量分别求解为 $(0, 1, 0)$ 和 $(0, 0, 1)$, 案例二中两个偶极声源的指向矢量分别求解为 $(0, 0.7985, 0.6019)$ 和 $(0.7105, 0, 0.7037)$, 案例三中两个偶极声源的指向矢量分别求解为 $(0, 0.8067, 0.6241)$ 和 $(0, 0.9933, 0)$ 。上述结果表明该方法能够准确地重建指向性信息未知的偶极声源源强, 并估计出这些声源的指向。为了更清晰地显示偶极声源的定位结果, 图 2(c), 3(c), 图 4(c) 给出了三维空间内所有等效源的分布, 从图中可以看出, 所提方法可以准确地定位到偶极声源。

所提方法重建的声源信息除了可以用于声源的定位外,还可以用于声场预测。图 2(d),3(d)和 4(d)分别给出了所提方法在案例一、二和三中所有预测点的预测声压,此外理论声压也在图 2(d),

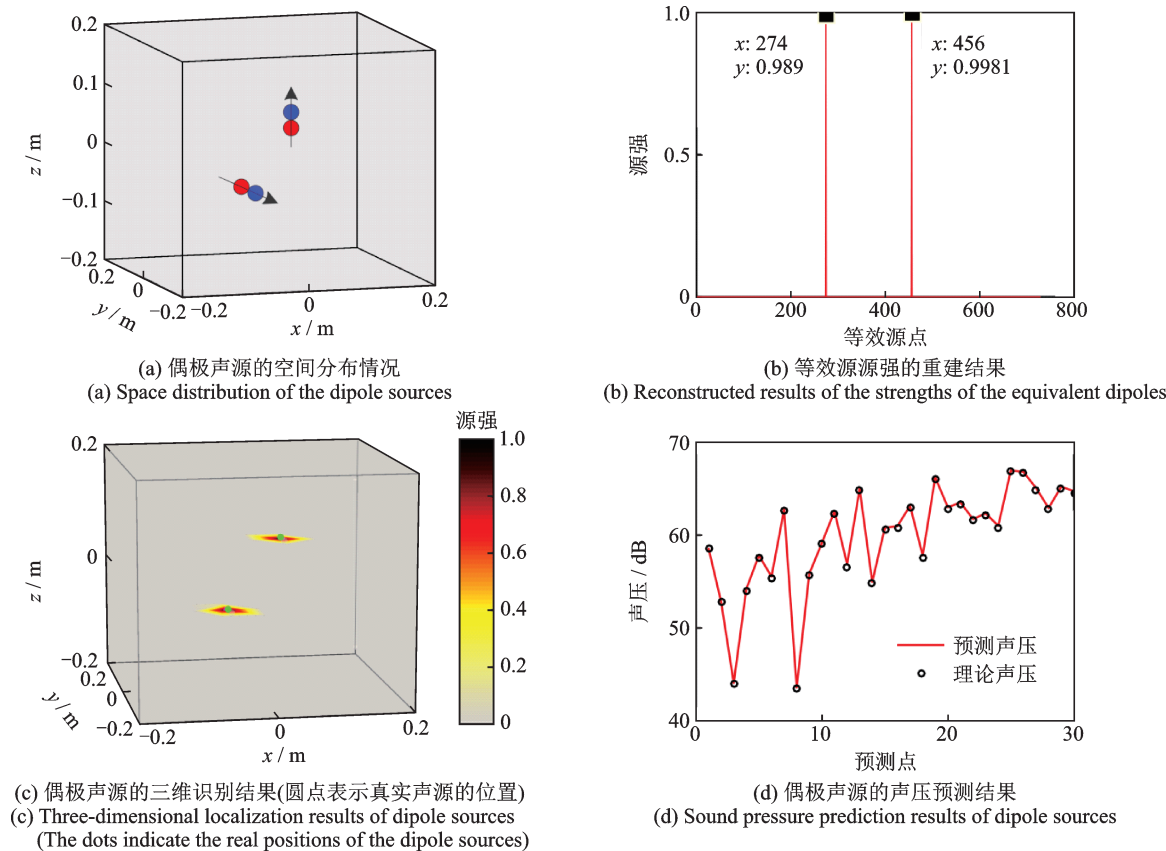


图 2 案例一中偶极声源的识别结果

Fig. 2 Dipole source identification results in case 1

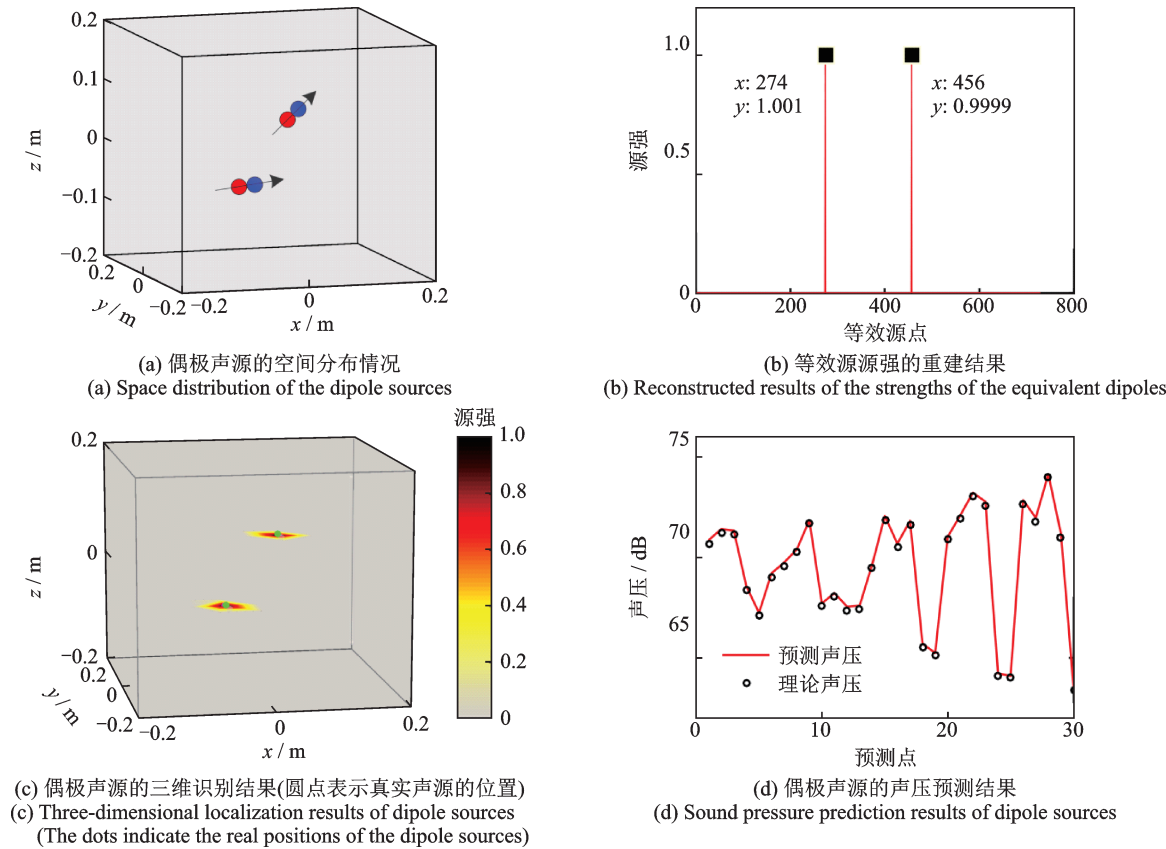


图 3 案例二中偶极声源的识别结果

Fig. 3 Dipole source identification results in case 2

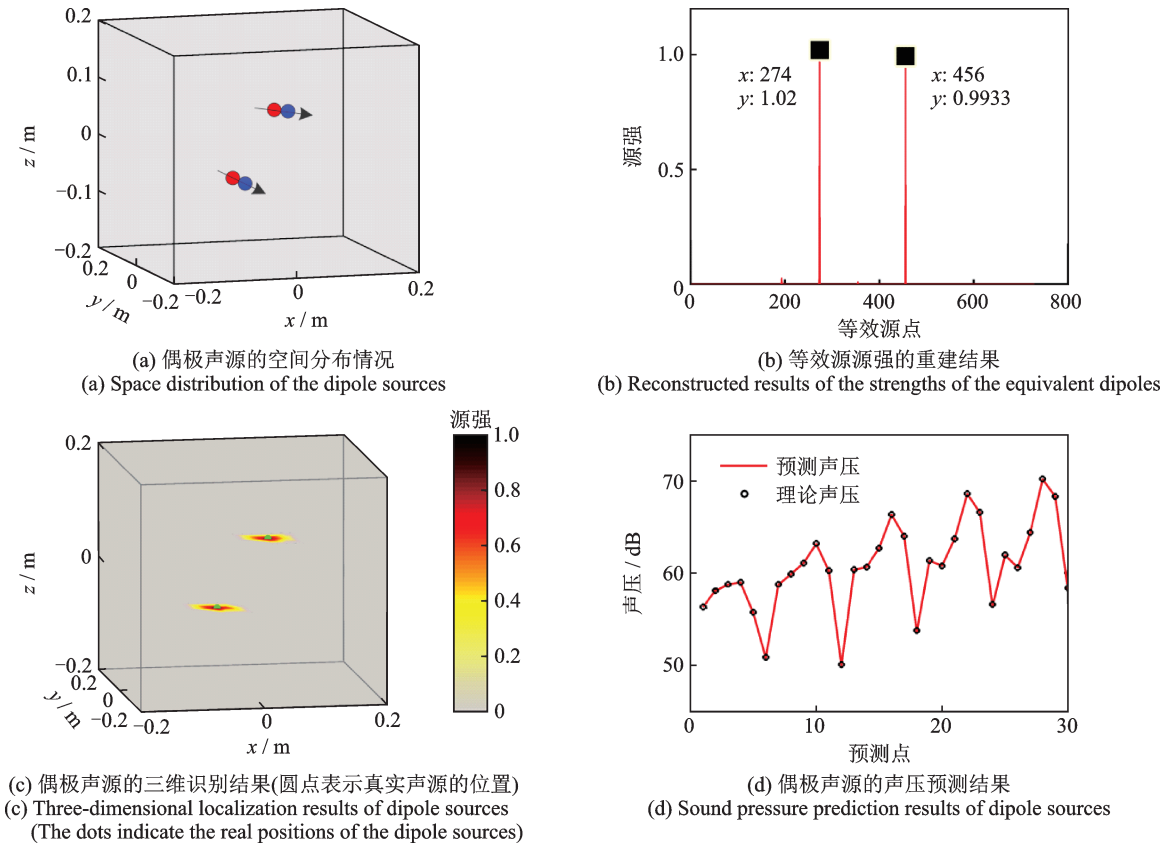


图4 案例三中偶极声源的识别结果

Fig. 4 Dipole source identification results in case 3

3(d)和4(d)中给出以供参考,从图中可以看出,在不同预测点处预测值与理论值吻合得很好,验证了所提方法预测指向性信息未知偶极声源辐射声场的准确性。

为了量化重建误差,将预测点的声压重建误差定义为:

$$E = \frac{\|p_{re} - p_{th}\|_2}{\|p_{th}\|_2} \times 100\% \quad (15)$$

式中 p_{re} 和 p_{th} 分别表示声压的重建值和理论值。

图5显示了所提方法在不同声源频率(0~5000 Hz)和不同信噪比(5~30 dB)下的重建性能。从图5中可以观察到,信噪比越低,所提方法对指向性信息未知偶极声源的重建误差越大,主要原因是信噪比过低会严重破坏源信号,因此造成很大的重建误差。尽管如此,该方法在信噪比高于10 dB的很大范围内仍具有较好的适用性。此外,图5还给出了声源频率对重建误差的影响,从图中可以观察到,所提方法对低频的重建能力将变弱,主要原因是当声源频率很低时,传递矩阵的列相关性会增强,在相同阵列布置条件下,声源的重建误差将增大。虽然所提方法对于低频的重建能力较弱,但是在信噪比高于10 dB,且声源频率高于800 Hz的很大范围内,该方法可以准确重建指向性信息未知偶极声源的声场,其重建误差均低于10%。

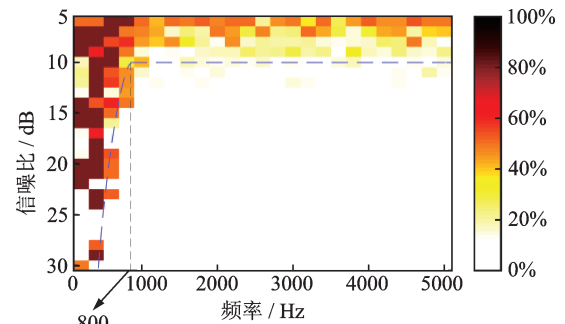


图5 不同声源频率和不同信噪比下的声压重建误差

Fig. 5 Reconstruction error of source pressure at different source frequencies and different SNRs

3 实验研究

下面在半消声室中开展实验以检验所提方法识别指向性信息未知的偶极声源的性能,实验布置如图6所示。实验中采用的类偶极声源是由两个扬声器紧密地面对面安装并以反相位驱动形成。为了更清晰地展示实验过程,这里给出了实验原理图,如图7所示。实验测试中采用24个均匀分布在4个环上的传声器阵列来测量声压。通过固定参考传声器,将阵列移动三次,得到三组相互垂直平面上的声压数据,采样频率为20.48 kHz,采样时间为0.8 s。每个数据集被分割成8块,每块的长度为8192,频率分辨率为2.5 Hz。

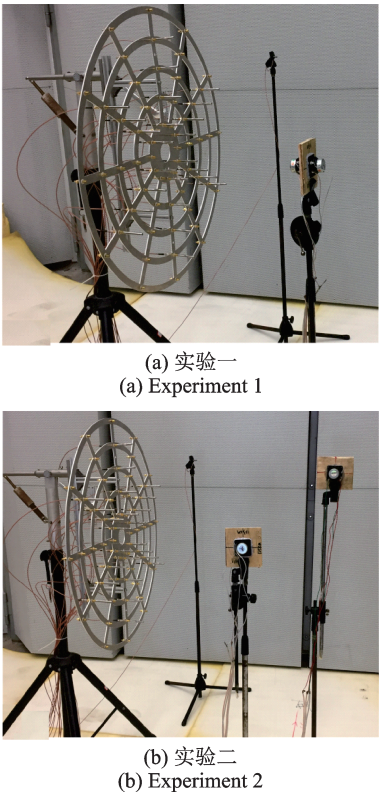


图6 实验测试的总体布局
Fig. 6 Experimental setups

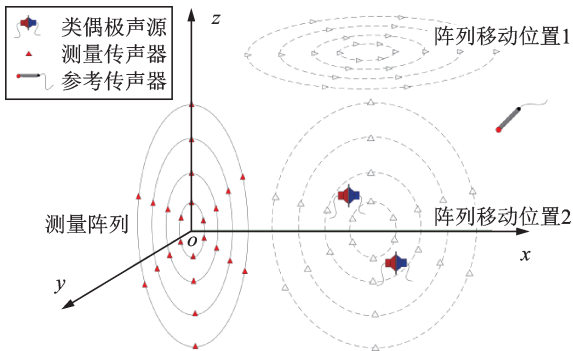


图7 实验原理示意图
Fig. 7 Schematic diagram of experimental principle

在实验测试之前,对自制的类偶极声源的声辐射模式进行了测量,以检验它的偶极特性。如图8所示,在与声源高度相同的平面上,将24个传声器均匀布置在以声源为中心,半径为1 m的圆上;图9显示的声场辐射模式测量结果表明,所设计的类偶极声源具有清晰的偶极指向性。

本文开展了单个偶极声源和两个偶极声源两组实验。在实验一中,偶极声源位于(0.1 m,0.1 m,−0.1 m),声源频率为4 kHz。在实验二中,两个偶极声源分别位于(−0.1 m,−0.1 m,0 m)和(0.1 m,0.1 m,−0.2 m),声源频率均为4 kHz。

图10和11分别显示了两组实验中的类偶极声源的识别结果和声场预测结果。需要指出的是,由于实验中的类偶极声源的真实源强难以测量,因此

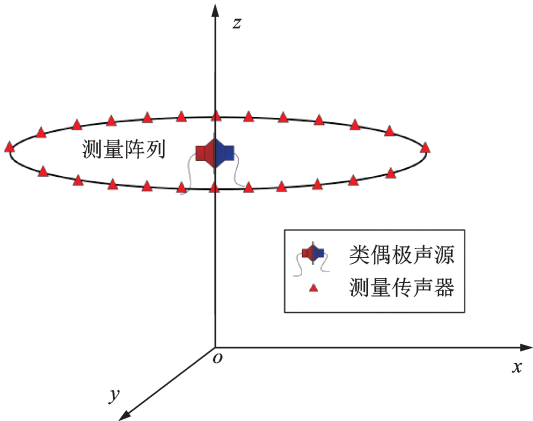


图8 实验中类偶极声源声辐射模式测量示意图
Fig. 8 The measurement of sound field radiation pattern around a dipole-like source in the experimental test

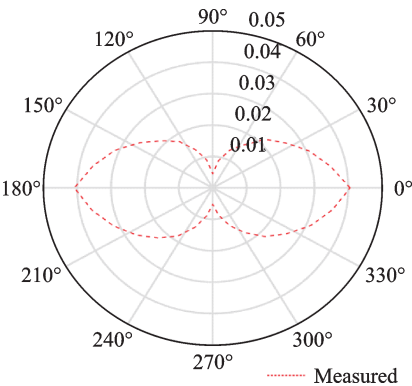


图9 实验中类偶极声源的声辐射模式
Fig. 9 The sound field radiation pattern around a dipole-like source in the experimental test

无法直接评价所重建的声源源强和指向矢量的精度。因此,从72个测量点中随机抽取47个测量点,并用这些测点处的声压数据重建出偶极声源源强和指向性信息;然后采用所重建的声源信息预测出剩余25个测量点处的声压,并与这25个测点的声压数据进行比较,间接评估所提方法对于指向性信息未知偶极声源的重建精度。

图10(a)和11(a)给出了偶极声源的空间分布示意图,图10(b)和11(b)给出了两组实验中所提方法重建的所有等效源源强。从图10(b)和11(b)中可以观察到,实验一中与真实声源位置对应的第223个扫描格点以及实验二中与真实声源位置对应的第62和第364个扫描格点处均出现了突出的峰值,并且这些峰值处的等效源源强分别估计为0.9937,1.484和0.842,它们的指向矢量同时也被求解出来,分别为(0,1,0),(1,0,0)和(1,0,0),其余等效源源强均趋近于0,远低于真实声源处的等效源源强。图10(c)和11(c)分别展示了实验一和二中采用重建的所有等效源源强进行偶极声源空间定位的结果。实验结果表明,所提方法可以准确地定位到指向性信息未知的偶极声源。

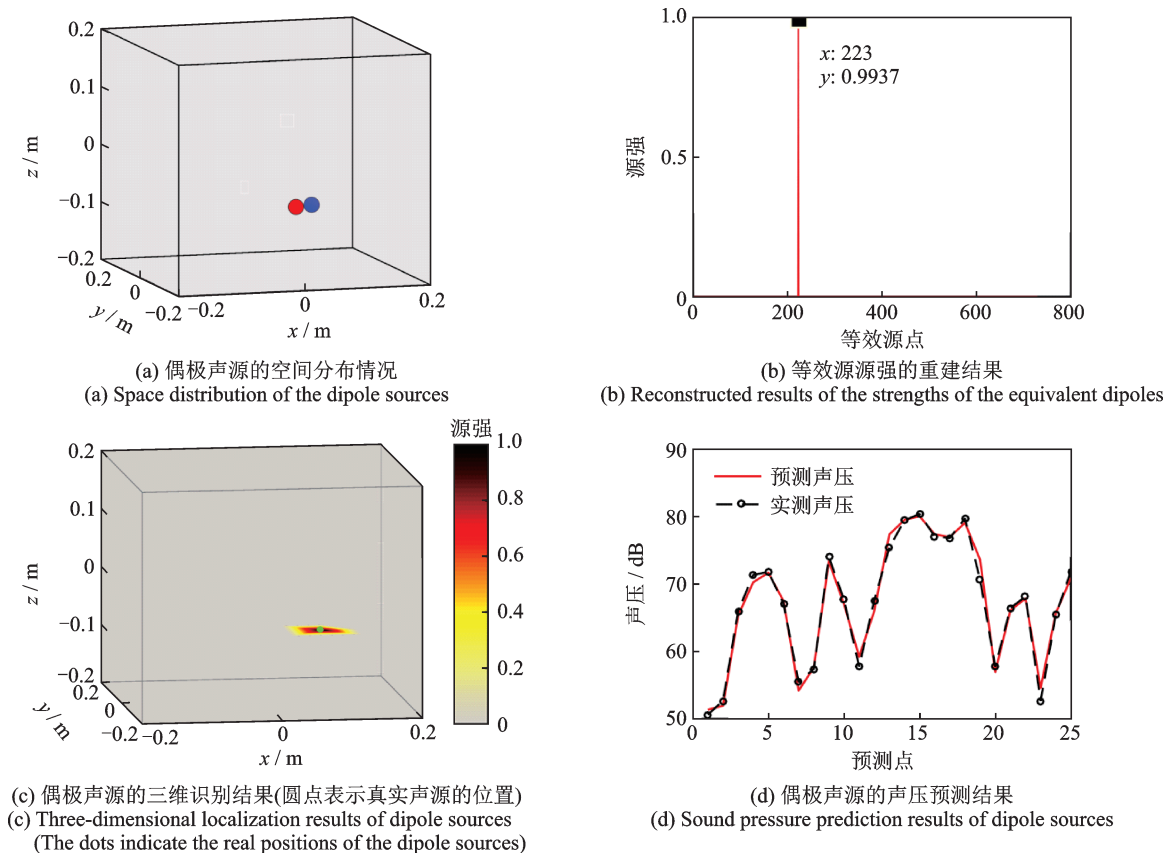


图10 实验一中偶极声源的识别结果

Fig. 10 Dipole source identification results in experiment 1

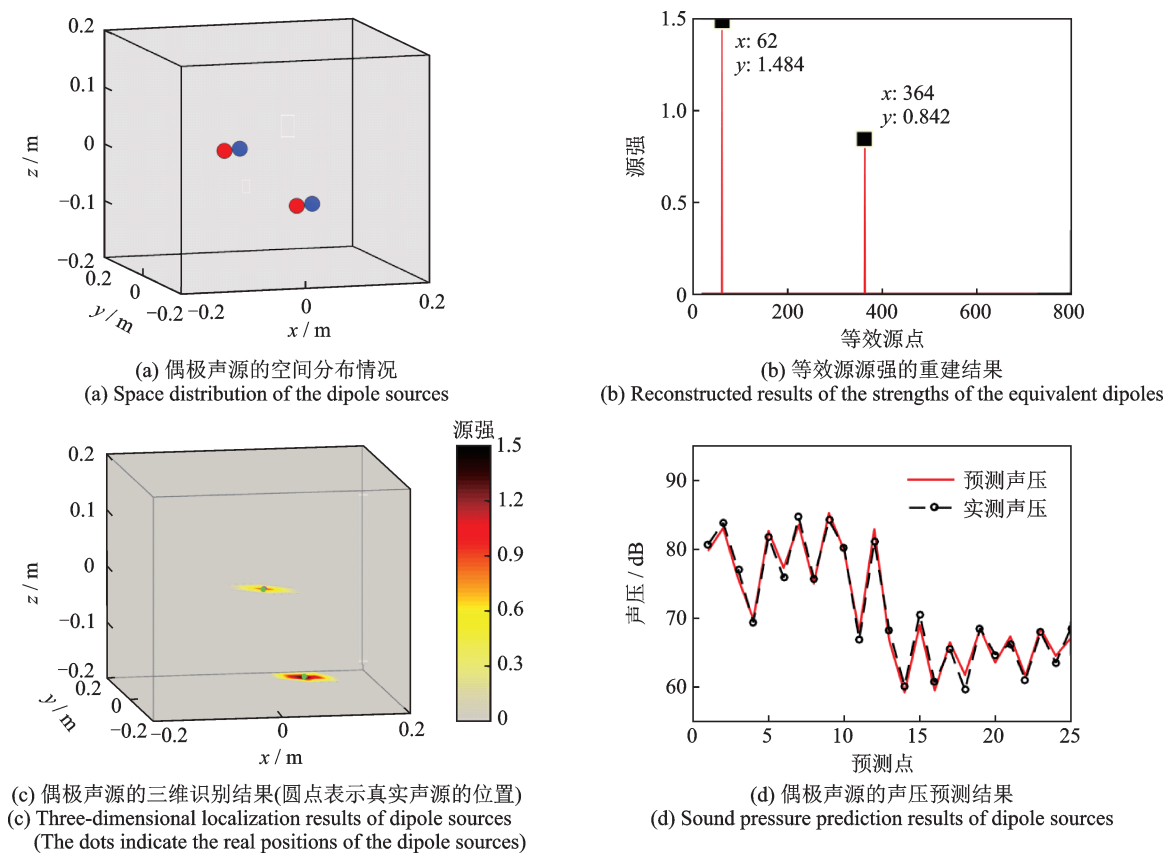


图11 实验二中偶极声源的识别结果

Fig. 11 Dipole source identification results in experiment 2

图10(d)和图11(d)分别给出了所提方法在实验一和二中所有预测点的预测声压与实测声压之间

的比较,从图中可以看到,预测声压曲线与实测声压曲线基本吻合,从而从实验的角度验证了所提方法

预测指向性信息未知偶极声源辐射声场的准确性,同时也进一步表明所提方法重建的偶极声源源强和指向性信息的准确性。

4 结 论

本文提出一种基于加权迭代L1最小化算法的等效源方法来识别三维空间中指向性信息未知的偶极声源。该方法将声源指向矢量作为未知参数,从测量声压与等效源源强的传递函数中分离出来,通过加权迭代L1最小化算法进行反演求解出声源指向矢量和等效源源强,进而利用这些声源信息可以预测声场。与以往的偶极声源识别方法不同,该方法可以准确识别指向性信息未知的偶极声源,并获得声源三维成像结果。对三组指向性信息未知偶极声源的案例进行了数值研究,并对自制的类偶极声源进行了实验研究。结果表明,该方法能够准确定位指向性信息未知的偶极声源、估计声源指向和源强,并预测偶极声源的辐射声场。此外,在数值仿真中还进行了声源频率、信噪比等参数的讨论,结果表明,该方法在声源频率大于800 Hz,且在信噪比大于10 dB时可以获得较高的声场重建精度。本文所提方法将有助于分析偶极声源的产生机理和辐射特性,并进一步指导气动噪声的控制。

此外,在实际工程中,常常会遇到与理想偶极指向性特征有偏差的类偶极声源,尽管本文方法是建立在理想偶极声源的声辐射理论基础之上,但本文方法的求解思路可为类偶极声源的识别提供借鉴,即通过建立类偶极声源的声辐射计算模型,然后采用本文等效源方法反演求解的思路实现类偶极声源的识别。另外,对于三维空间中存在多种类型的声源(单极子、指向性信息未知的偶极子或四极子)的情况,同样可以修正所提方法的理论模型,并采用等效源方法反演求解的思路进行相应的声源识别研究。

参考文献:

- [1] Billingsley J, Kinns R. The acoustic telescope[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1976, 48(4): 485-510.
- [2] Merino-Martinez R, Sijtsma P, Snellen M, et al. A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays[J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2019, 10(1): 197-230.
- [3] Johnson D H, Dudgeon D E. *Array Signal Processing: Concepts and Techniques* [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1993.
- [4] Debrouwere M, Angland D. Airy pattern approximation of a phased microphone array response to a rotating point source[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 141(2): 1009-1018.
- [5] Chiariotti P, Martarelli M, Castellini P. Acoustic beamforming for noise source localization-reviews, methodology and applications[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 120: 422-448.
- [6] Castellini P, Martarelli M. Acoustic beamforming: analysis of uncertainty and metrological performances[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(3): 672-692.
- [7] Porteous R, Moreau D J, Doolan C J. A review of flow-induced noise from finite wall-mounted cylinders[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, 51: 240-254.
- [8] Pinho M, Arruda J. On the use of the equivalent source method for near-field acoustic holography[J]. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 2004, 1: 590-599.
- [9] Goldstein M E. *Aeroacoustics* [M]. New York: McGraw-Hill International, 1976.
- [10] Glegg S, Devenport W. *Aeroacoustics of Low Mach Number Flows: Fundamentals, Analysis, and Measurement* [M]. London: Academic Press, 2017.
- [11] Liu Y, Quayle A R, Dowling A P, et al. Beamforming correction for dipole measurement using two-dimensional microphone arrays[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 124(1): 182-191.
- [12] Bouchard C, Havelock D I, Bouchard M. Beamforming with microphone arrays for directional sources[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 125(4): 2098-2104.
- [13] Bouchard C, Havelock D I, Bouchard M. Beamforming for directional sources: additional estimator and evaluation of performance under different acoustic scenarios[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, 129(4): 2042-2051.
- [14] Jordan P, Fitzpatrick J A, Valiere J C. Measurement of an aeroacoustic dipole using a linear microphone array[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 111(3): 1267-1273.
- [15] Avarvand F S, Ziehe A, Nolte G. Music algorithm to localize sources with unknown directivity in acoustic imaging [A]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* [C]. Prague, Czech Republic, 2011: 2744-2747.
- [16] Suzuki T. L1 generalized inverse beam-forming algorithm resolving coherent/incoherent, distributed and multipole sources[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 330(24): 5835-5851.
- [17] Pan X J, Wu H J, Jiang W K. Multipole orthogonal beamforming combined with an inverse method for coexisting multipoles with various radiation patterns[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 463: 114979.

- [18] Gao J Z, Wu H J, Jiang W K. Dipole-based beamforming method for locating dipole sources with unknown orientations in three-dimensional domains[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 147(1): 125-136.
- [19] Pereira A. Acoustic imaging in enclosed spaces[D]. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2014.
- [20] Brooks T F, Humphreys W M. Three-dimensional applications of DAMAS methodology for aeroacoustic noise source definition[A]. 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference[C]. Monterey, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [21] Sarradj E. Three-dimensional acoustic source mapping with different beamforming steering vector formulations[J]. Advances in Acoustics and Vibration, 2012, 2012: 292695.
- [22] Porteous R, Prime Z, Doolan C J, et al. Three-dimensional beamforming of dipolar aeroacoustic sources[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 355: 117-134.
- [23] Zhang X Z, Bi C X, Zhang Y B, et al. A time-domain inverse technique for the localization and quantification of rotating sound sources[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 90: 15-29.
- [24] Zhang X Z, Bi C X, Zhang Y B, et al. On the stability of transient nearfield acoustic holography based on the time domain equivalent source method[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 146(2): 1335-1349.
- [25] Farassat F. Derivation of formulations 1 and 1A of farassat[R]. NASA/TM-2007-214853, Washington, D.C.: NASA, 2007.
- [26] Lowis C R, Joseph P F. Determining the strength of rotating broadband sources in ducts by inverse methods[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295: 614-632.
- [27] Lee S, Brentner K S, Morris P J. Acoustic scattering in the time domain using an equivalent source method[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010, 48(12): 2772-2780.
- [28] Lee S, Brentner K S, Morris P J. Assessment of time-domain equivalent source method for acoustic scattering[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011, 49(19): 1897-1906.
- [29] Battista G. Inverse methods for three-dimensional volumetric acoustic mapping[D]. Ancona: Università Politecnica delle Marche, 2019.
- [30] Battista G, Chiariotti P, Martarelli M. Inverse methods in aeroacoustic three-dimensional volumetric noise source localization and quantification[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 473: 115208.
- [31] Battista G, Herold G, Sarradj E, et al. IRLS based inverse methods tailored to volumetric acoustic source mapping[J]. Applied Acoustics, 2021, 172: 107599.
- [32] Candès E J, Wakin M B, Boyd S P. Enhancing sparsity by reweighted L1 minimization[J]. Journal of Fourier Analysis and Applications, 2008, 14: 877-905.

The equivalent source method for identifying dipoles with unknown directivity in three-dimensional free space

XU Ying, ZHANG Xiao-zheng, WANG Shuai, DONG Guang-xu, BI Chuan-xing
(Institute of Sound and Vibration Research, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The source directivity is a crucial factor affecting the dipole source identification. At present, the identification methods of dipole sources are usually based on the prior directivity assumption. However, it is difficult to accurately obtain the directivity information of a dipole source in advance. Moreover, the assumption that sources are usually located on a single surface at a certain distance from the microphone array may be not suitable for the actual aeroacoustic system. In order to accurately identify the dipole source under the condition that the directivity of the source is unknown, the equivalent source method based on the reweighted iterative L1 minimization algorithm is proposed in this paper. In this method, the source directivity vector is treated as an unknown quantity and separated from the transfer function relating the measured pressures to the equivalent source strengths, which is solved together with the equivalent source strengths via the weighted iterative L1 minimization algorithm. Then the sound field can be predicted in term of the solved source information. Different from the previous dipole source identification methods, the proposed method can realize three-dimensional volumetric imaging for the dipole sources with unknown directivity. Numerical simulations with three cases of dipole sources with unknown directivities and experiments with the dipole-like sources examine the validity and robustness of the proposed method.

Key words: dipole source; directivity; three-dimensional volumetric imaging; equivalent source method

作者简介: 徐 滢(1994—),女,博士研究生。电话:18756524335;E-mail:xuying1218@mail.hfut.edu.cn。

通讯作者: 毕传兴(1978—),男,博士,教授。电话:13856904996;E-mail:cxbi@hfut.edu.cn。