

非规则结构表面多声源近场声全息方法^{*}

宋玉来¹, 胡红生^{1,2}

(1. 嘉兴学院机电工程学院 嘉兴 314001; 2. 嘉兴嘉嘉汽车零部件制造有限公司 嘉兴 314005)

摘要:为了提高非规则结构表面多声源声场的全息精度,提出基于目标深度识别与球面波叠加逼近的非规则表面多声源近场声全息方法。该方法使用声源空间深度识别理论,确定结构体上各声源的空间位置,在各声源处分别使用球面波的叠加描述空间声场分布,然后结合现有单原点球面波叠加近场声全息法重构声场。为了验证方法的可行性,首先使用所述方法和现有单原点球面波叠加声全息法,分别对径向脉动球与横向振动球组成的不同声场进行全息重构。结果表明,当声源集聚分布时,所述方法与现有方法均能有效全息重构声压分布,重构误差在5%以下;当声源离散分布时,现有方法失效,所述方法能够较准确地给出重构面的声压分布,主要频段内的全息重构误差小于20%。进一步的对比实验表明,在全息重构多扬声器非规则空间分布声场时,使用所述全息方法的重构误差平均下降14.08%,显著提升了多声源非规则空间分布声场的全息精度。

关键词:多声源声场;球面波叠加;声源深度识别;近场声全息

中图分类号: TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.20

Near-field acoustic holography for multiple sound sources on irregular structure surface

Song Yulai¹, Hu Hongsheng^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China;

2. Jiaxing Jiajia Automobile parts Manufacturing Co. Ltd., Jiaxing 314005, China)

Abstract: In order to improve the holography accuracy of multiple sources on irregular structure surface, a Near-field Acoustic Holography for multiple sources on irregular structure surface is presented based on spherical harmonic wave superposition and sound source identification. The positions of the sound sources are determined by the theory of sound source depth identification and localization, the 3D sound field distributions are described by spherical harmonic wave superposition from different sound sources location. Then the sound fields are reconstructed by the existing theory of spherical harmonic wave superposition from the same point. The methodology is validated and the accuracy of acoustic field reconstruction is examined numerically in the crowded sound field and the discrete sound field, respectively, and it is compared with the existing method which depict sound field with spherical waves from one local coordinate origin. The results show that when the sound sources are crowded together, the results of sound field reconstruction by the two methods are all satisfied and the reconstruction error is less than 5%. When the sound sources are discrete, the result of the existing method is failed, but the proposed method can generate sound pressure distribution precisely, and the reconstruction error is almost less than 20%. Further comparative experiments are carried out with three loudspeakers in anechoic box, the results show that the reconstruction error can be reduced by 14.08% averagely, and the holography accuracy of the multiple sources in irregular spatial position is improved significantly.

Keywords: multi-source acoustic field; spherical wave superposition; sound source depth identification; near-field acoustic holography

1 引言

近场声全息方法 (near-field acoustic holography, NAH) 最初由文献[1]提出,该方法以空间 Fourier 变换为基本原理,可以实现高精度的三维声场各声学量的重构^[2-3]。但是,基于空间傅里叶变换的 NAH 要求全息测量面必须为规则的平面、柱面或球面,限制了其工业应用范围^[4]。于是,研究人员提出了适应范围更广的 NAH,主要有边界元法^[5-6]、等效源法^[7-8]、统计最优法^[9-10]、Helmholtz 方程最小二乘法^[11-12]。Helmholtz 方程最小二乘法使用不同阶次正交球面波的叠加描述被测声场,再根据阵列面上的测量值匹配各正交球面波的系数,由于所得系数向量反映的是整个声场的分布特征,不会随着测量位置的变化而改变^[11],故可用于全息重构声场其他位置的声学量分布。该方法实施过程中所需测点数量少于边界元法,但需要根据具体的声源特征选择合适的球面波函数坐标原点的位置,该坐标原点的选择直接影响到全息重构的精度和收敛速度。对于近似球形的声源,该坐标原点应选在声源最小外接球的球心处,对于近似方形的板形声源,所用球面波函数的坐标原点应选在板后距离振动板几何中心约为对角线均值的位置^[13]。但是,当不规则结构体表面存在多个离散分布的声源时,重构声场时误差时常较大。为了对不规则结构表面存在多个连续或离散声源分布的声场进行近场声全息,Veronesi W. A. 等人^[5]提出将具有不规则外形的声源表面进行离散化,把不规则表面离散为很多小三角形板,同一个三角形板上不同位置的粒子振速都视为相同的,然后分别对每块三角形板实施基于傅里叶变换的 NAH,求解过程中所有小三角形板同时进行 NAH;针对同样的任意外形三维声源的 NAH 问题,Bai M. R. 等人^[6]基于边界元法 (boundary element method, BEM) 对 Veronesi W. A. 等人^[5]提出的分块处理方法做了进一步发展,较为系统地提出了基于 BEM 的近场声全息,使用该方法对柱形声源、部分振动球等声源进行了重构验证,解析解与重构结果能够很好的保持一致,而且在对更为复杂的声场进行全息重建时也得到了高精度的结果。但是,在实施 BEM 法 NAH 时,为了满足实施条件,相同情况下需要比 Helmholtz 方程最小二乘法、空间傅里叶变换法多很多的测点,当测点很多时,数据采集的工作量太大,BEM 法 NAH 会变得非常难以实施^[14]。

针对上述问题,提出一种基于球面波叠加逼近与目标深度识别的空间多声源近场声全息方法。该方法根据目标深度识别理论,确定相应球面波函数坐标原点的空间位置,使得所建立的数学模型与声场中声源的实际分布更加接近,从而可以提升空间多声源声场的描述精度,

间接降低声场的全息误差,同时也可以减少过多的测点布置工作给实施带来的困难。

2 空间非规则分布多声源近场声全息

2.1 三维空间内主要声源的定位

在近场声全息理论的研究过程中,简单声源声场的叠加已被广泛用于复杂声场空间分布的描述^[15],简单源位置的选取是全息重构精度的重要影响因素之一。为了获取主要声源的空间位置信息,采用文献[16]提出的三维声聚焦波束形成法,对可能的声源区域进行探测,即在 XYZ 坐标系内,对声源所在的空间区域使用立体网格进行划分,单个立体网格的尺寸为 Δx 、 Δy 、 Δz ,对立体网格上的每个节点计算归一化后波束形成声功率的相对输出 $|B(r, \omega)|^2$,即为各节点的声场响应,根据声场各位置的响应可判断空间非规则分布多声源的具体位置。

2.2 基于已知声源位置的声场全息重构

由多部件组成的结构总成设备,其主要发声区域多离散分布在设备的不同位置。在稳态声场中,如图 1(a)所示,振动结构体上主要由 3 个部件振动发声,由于 3 个部件振动时相对独立,故将其视为不同的声源,分别为声源 1、声源 2、声源 3,记为 S_1 、 S_2 、 S_3 。

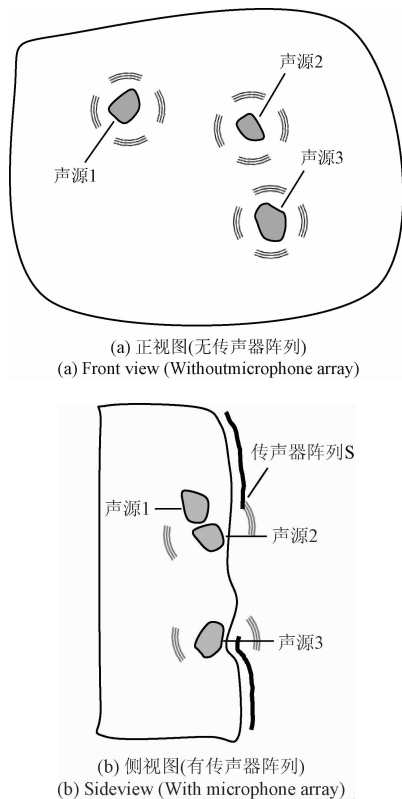


图1 振动结构体上声源分布示意图
Fig. 1 Schematic of sound sources distribution on the structure

为了获取不规则振动结构体附近准确的声压分布,使用共形传声器阵列在振动结构体的近场采集声场的声压信息,如图 1(b)所示。传声器阵列所在表面记为测量面 S ,该测量面上共有 N 个测点,所测得声压 $\mathbf{P}_{\text{meas}}$ 为:

$$\mathbf{P}_{\text{meas}} = [p_{\text{meas},1}, p_{\text{meas},2}, \dots, p_{\text{meas},i}]^T \quad (1)$$

使用 2.1 节所述三维声聚焦波束形成方法,对振动结构体声源所在空间区域进行探测,对所得声源位置的相对强度按照大小依次排序,找到主要声源 S_1, S_2, S_3 所在的位置,分别记为 $\mathbf{r}_{S_1}, \mathbf{r}_{S_2}, \mathbf{r}_{S_3}$ 。为了使所建立的球面波叠加逼近物理模型与声场分布更加相近,分别在 $\mathbf{r}_{S_1}, \mathbf{r}_{S_2}, \mathbf{r}_{S_3}$ 位置处建立局部坐标系,每个坐标系的坐标原点为球面谐波的中心点,使用各个坐标系内不同阶次球面谐波的叠加表达共形测量面上的声场分布,则测量面 S 上第 i 个测点处的测得声压可写为:

$$p_{\text{meas},i} = \sum_{j=1}^M c_{j,S_1} \psi_{S_1} + c_{j,S_2} \psi_{S_2} + c_{j,S_3} \psi_{S_3} \quad (2)$$

式中:分量 $\psi_{S_1} = h_n^{(1)}(kr_{S_1}) Y_n^m(\theta_{S_1}, \varphi_{S_1}), \psi_{S_2} = h_n^{(1)}(kr_{S_2}) Y_n^m(\theta_{S_2}, \varphi_{S_2}), \psi_{S_3} = h_n^{(1)}(kr_{S_3}) Y_n^m(\theta_{S_3}, \varphi_{S_3}), M$ 是最大球面谐波叠加项数, $h_n^{(1)}(kr)$ 是第一类 n 阶球 hankel 函数, $Y_n^m(\theta, \phi)$ 是 n 阶 m 次的球面谐波函数, k 为波数, $c_{j,S_1}, c_{j,S_2}, c_{j,S_3}$ 分别为声源 S_1, S_2, S_3 处各叠加球面谐波展开为第 j 个分量时的权重系数, j 是球面谐波由低阶次到高阶次的序号。

把测量面上 N 个测点的测量值均由式(2)表达,写成矩阵的形式,即:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_i \\ \vdots \\ p_N \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} \psi_{S_1,1}^1 & \psi_{S_2,1}^2 & \psi_{S_3,1}^3 & \cdots & \psi_{S_1,1}^{M-2} & \psi_{S_1,1}^{M-1} & \psi_{S_1,1}^M \\ \psi_{S_1,2}^1 & \psi_{S_2,2}^2 & \psi_{S_3,2}^3 & \cdots & \psi_{S_1,2}^{M-2} & \psi_{S_2,2}^{M-1} & \psi_{S_2,2}^M \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \psi_{S_1,i}^1 & \psi_{S_2,i}^2 & \psi_{S_3,i}^3 & \cdots & \psi_{S_1,i}^{M-2} & \psi_{S_2,i}^{M-1} & \psi_{S_3,i}^M \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \psi_{S_1,N}^1 & \psi_{S_2,N}^2 & \psi_{S_3,N}^3 & \cdots & \psi_{S_1,N}^{M-2} & \psi_{S_2,N}^{M-1} & \psi_{S_3,N}^M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{S_1,1}^1 \\ c_{S_2,1}^2 \\ c_{S_3,1}^3 \\ \vdots \\ c_{S_1,1}^{M-2} \\ c_{S_2,1}^{M-1} \\ c_{S_3,1}^M \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)简记为:

$$\mathbf{P}_{\text{meas}} = \boldsymbol{\Psi}_{S_1, S_2, S_3} \mathbf{C}_{S_1, S_2, S_3} \quad (4)$$

为了获得反映声场分布特征的系数向量 $\mathbf{C}_{S_1, S_2, S_3}$, 对式(4)两边同时乘以球面谐波所构成矩阵 $\boldsymbol{\Psi}_{S_1, S_2, S_3}$ 的伪逆, 可得:

$$\mathbf{C}_{S_1, S_2, S_3} = \boldsymbol{\Psi}_{S_1, S_2, S_3}^\dagger \mathbf{P}_{\text{meas}} \quad (5)$$

由文献[11]确定最优的球面谐波叠加项数。于是,根据系数向量 $\mathbf{C}_{S_1, S_2, S_3}$ 所具有的不随重构位置改变的特征,声场中任意位置一组场点的声压重构为:

$$\mathbf{P}_{\text{rec}} = \boldsymbol{\Psi}_{S_1, S_2, S_3}^{\text{opt}} \mathbf{C}_{S_1, S_2, S_3} = \boldsymbol{\Psi}_{S_1, S_2, S_3}^{\text{opt}} \boldsymbol{\Psi}_{S_1, S_2, S_3}^\dagger \mathbf{P}_{\text{meas}} \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\Psi}_{S_1, S_2, S_3}^{\text{opt}}$ 是由场点位置坐标所对应的最优球面谐波叠加矩阵。

一般情形下,在该方法的具体实施过程中,不同振动结构体上的声源数量是未知的,为了在准确表达声场分布的同时减少不必要的计算量,可以根据声源强度的排序,选择合适声源数量,并在对应位置放置不同阶次球面谐波的叠加源,用以全息重构声场的空间分布。

3 数值仿真

为了验证所提方法的可行性,如图 2 所示,空间中有一非规则结构体 V ,该结构体表面的几何尺寸约为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 。在该非规则结构体 V 上分布有 3 个声源,分别为径向脉动球 S_1 和 Z 向振动球 S_2, S_3 , 径向脉动球的半径为 0.05 m , 振动速度为 0.08 m/s ; 两个 Z 向振动球的半径均为 0.05 m , Z 向振动速度均为 0.06 m/s 。为了便于问题的说明,全息测量面 H_1 使用规则的方形平面,该测量面的尺寸为 $0.63 \text{ m} \times 0.63 \text{ m}$, 其上均布 8×8 个测点, 相邻测点间距为 0.09 m 。在 H_1 面与振动结构体之间是重构面 H_2 , 且 H_1 面与 H_2 面相互平行, 二者几何中心在同一条垂线上。全息测量面到声源 S_2, S_3 几何中心所在平行平面的垂直距离 $d_1 = 0.09 \text{ m}$, 重构面到声源 S_2, S_3 几何中心所在平面的垂直距离为 $d_2 = 0.06 \text{ m}$ 。3 个声源的几何中心点到测量面的垂直距离并不全部相等。空气密度取 1.29 kg/m^3 , 声在空气中的传播速度取 340 m/s 。

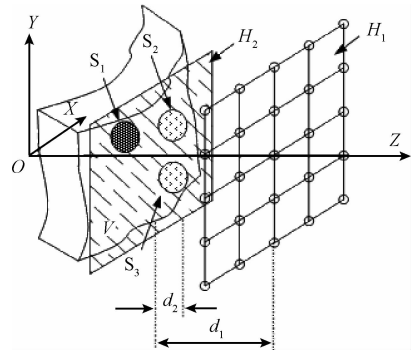


图 2 声场布置示意图

Fig. 2 Diagram of the acoustic field

3.1 声源集聚分布的声场重构

当结构体上的多个声源以相邻或叠加的形式集聚存在时,如图 3 所示,图中脉动球声源和 Z 向振动球声源分布在彼此相邻的位置,脉动球 S_1 的球心位于坐标点 $(-0.025 \text{ m}, 0, 0.03 \text{ m})$, Z 向振动球 S_2 的球心坐标是

(0.025 m, 0, 0.05 m), Z 向振动球 S_3 的球心坐标是 (0.025 m, -0.05 m, 0.05 m), 重构面 H_2 的尺寸为 0.6 m × 0.6 m, 其上均布 20 × 20 个重构点。声源的振动频率为 3 kHz。其他参数保持不变。

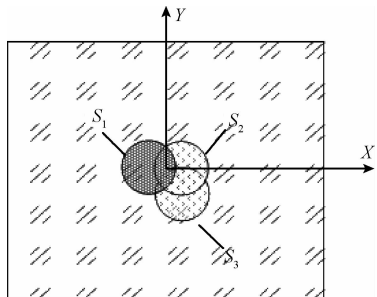


图3 结构表面声源集聚式分布示意图

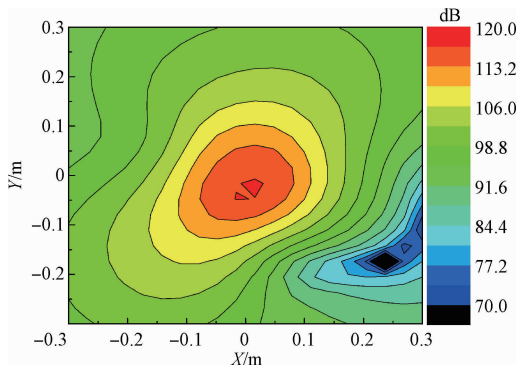
Fig. 3 Superposition distribution of sound sources on structure surface

为了定量表达重构声压与直接测量声压的误差, 定义重构误差 Δ 的计算式为:

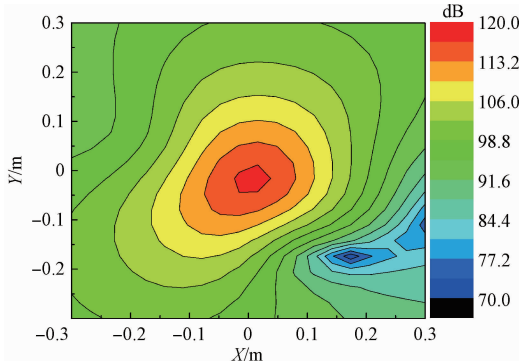
$$\Delta = \frac{\|\mathbf{P}_{\text{meas}} - \mathbf{P}_{\text{reco}}\|_2}{\|\mathbf{P}_{\text{meas}}\|_2} \times 100(\%) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{P}_{\text{meas}}$ 是重构面上直接测量的声压向量, $\mathbf{P}_{\text{reco}}$ 是由重构方法得到的重构面上的声压向量。需要注意的是, 由于此式是将测量面上所有测点的误差进行叠加, 得到综合性的单一误差量, 当测量面上的声压分布呈多次交替变化或单调趋势变化时, 该误差量化方法不能区分二者的不同。因此, 为了反映声场分布不同对误差量值的影响, 可使用部分测点进行局部误差量化或逐点误差量化, 得到准确的误差分布。

为了对比分析所述全息重构方法的精度, 在相同声场中分别使用所述方法和现有单原点球面波叠加逼近方法^[12]进行分析。全息重构过程中, 在全息测量面 H_1 处记录声压数据, 将此数据作为全息重构系统的输入, 先使用现有球面波叠加逼近方法计算重构面上的声压分布, 如图 4(b) 所示, 然后使用文中所述方法求解重构面上的声压分布, 如图 4(c) 所示。重构面上直接测量的声压分布如图 4(a) 所示。



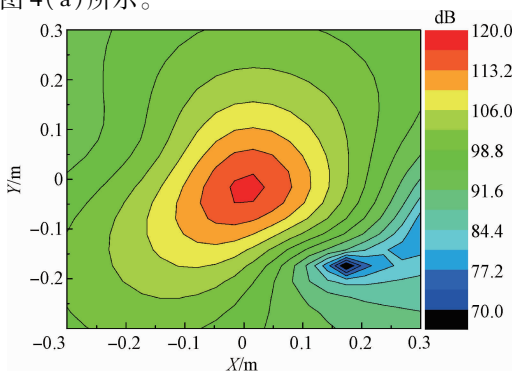
(b) 单原点球面波叠加法重构的声压分布
(b) Reconstructed sound pressure by single origin method



(c) 所述方法重构的声压分布
(c) Reconstructed sound pressure by pressure by proposed method

图4 3 kHz 时集聚声源声场重构面上声压分布对比图
Fig. 4 Comparison of sound pressure distribution for Superposition sources at 3 kHz

由图 4(a) 可知, 重构面上的实际声压分布因各声源距离较近, 声源间最大距离近似为所分析声波的波长, 所以尽管各个声源所发出的声波频率相同, 但声源集聚区域的声压分布与单个声源的声压分布十分相近, 仅在距离集聚区域较远的左下角区域产生干涉现象, 在该区域出现了声压最小值。图 4(b) 是使用现有单原点球面波叠加逼近方法重构的声压分布, 该声压分布与图 4(a) 所表示的直接测量声压分布相近, 声源集聚区域的声压分布一致, 从重构面几何中心到边缘的声压变化趋势相同, 在重构面右下角的干涉区域存在较明显的重构误差, 由式(7)量化可知整体重构误差为 2.60%。现有方法之所以具有很高的重构精度, 是因为当声源集聚分布时, 声场的空间分布近似于单个声源的辐射声场, 使用单原点不同阶次球面波叠加的模型与分析对象相近。当使用文中所述方法计算重构面上的声压分布, 得到图 4(c) 所示重构结果, 将该声压分布与重构面上直接测量的声压分布图 4(a) 对比可知, 所述方法的重构声压分布能够比较精确的反应重构面上的实际声压分布, 也能够较为准确地反应不同位置的声压变化趋势, 在部分干涉强烈的区域存在较为明显的重构偏差, 如重构面的右下角区域。



(a) 直接测量的声压分布

(a) Distribution of directly measured sound pressure

由式(7)量化可知整体重构误差为 4.55%。对比分析图 4(b)和(c)可知,所述多声源近场声全息方法的重构误差略大于现有方法,这是因为在使用相同的测点时,所述多声源方法各个声源位置所分配的叠加项数约为现有方法的 1/3,尽管物理模型上更加合适,但较少的叠加项数在描述声场时的精度会有一定程度的下降,进一步增加测点数量可以提升所述方法的重构精度。

为进一步观察不同频率时的重构精度,在充分体现声源相邻这一影响因素的情况下,即分析频率对应的最小波长大于声源最大间距,对 1~3 kHz 的声场分别使用现有的单原点球面波叠加法和所述多声源重构法进行重构,得到不同频率时的重构误差如图 5 所示。由图 5 可知,对于集聚声源分布的声场,所提出的多声源重构法的重构误差略大于现有的单原点球面波叠加法,随着频率的升高,重构误差有增大的趋势,这是因为较高频率的声波需要更多高阶项的球面波叠加描述,所以随着频率的升高准确描述声场的难度也随之增大。由图同时可知,两种方法的重构误差都在 5% 以下,都可作为对声场进一步分析研究的依据。

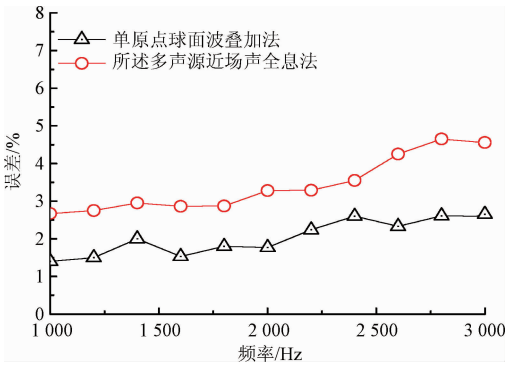


图 5 集聚声源声场重构误差随频率的变化

Fig. 5 Reconstruction error for superposition sources field at different frequencies

3.2 声源离散分布的声场重构

当不规则振动结构体上有多个声源离散分布时,如图 6 所示。为了体现离散分布对不同近场声全息方法的影响,在选择声源位置时使得彼此间最小距离大于分析声波的最长波长,故选取脉动球 S_1 的球心位于坐标点 $(0, 0.11\text{ m}, 0.03\text{ m})$, Z 向振动球 S_2 的球心坐标是 $(-0.11\text{ m}, -0.11\text{ m}, 0.05\text{ m})$, Z 向振动球 S_3 的球心坐标是 $(0.11\text{ m}, -0.11\text{ m}, 0.05\text{ m})$, 重构面的尺寸仍为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$, 其上均布 20×20 个重构点,所分析声波

的频率为 3 kHz。其他参数同 3.1 节。

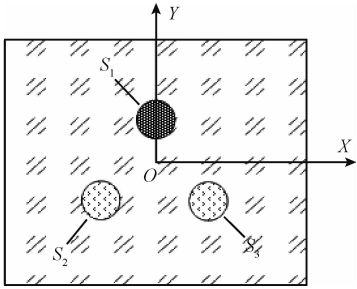
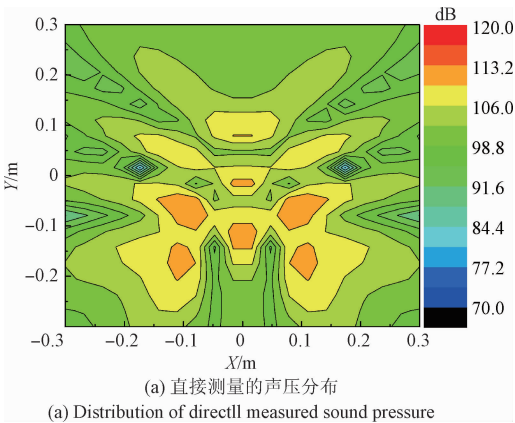


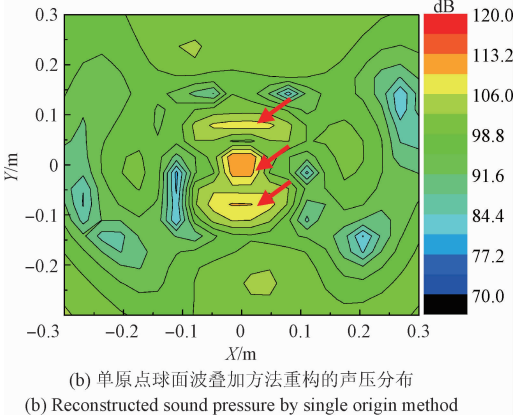
图 6 结构表面声源离散式分布示意图

Fig. 6 Discrete distribution of sound sources on structure surface

为了对比分析所述全息重构方法的精度,在相同声场中分别使用所述多声源重构方法和现有单原点叠加逼近方法进行分析。实施过程中,在全息测量面 H_1 处记录 8×8 测点的声压数据,将此数据作为全息重构系统的输入,由现有叠加逼近方法得到的重构面上的声压分布如图 7(b) 所示,由所述方法获得的重构面上的声压分布如图 7(c) 所示。重构面上直接测量的声压分布如图 7(a) 所示。



(a) Distribution of directll measured sound pressure



(b) Reconstructed sound pressure by single origin method

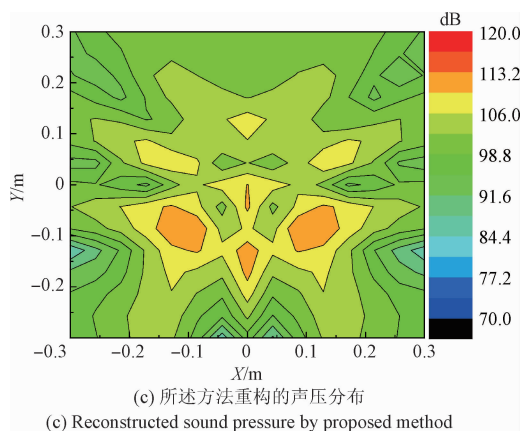


图7 3 kHz时离散声源声场重构面上声压分布对比图

Fig. 7 Comparison of sound pressure distribution for discrete sources at 3 kHz

由图7(a)可知,重构面上的实际声压分布十分复杂,因干涉现象的存在,不仅在重构面上与声源对应位置处出现局部最大值,而且在声源间及相邻区域有局部最大声压和局部最小声压出现,且声场变化趋势无明显规律。图7(b)是使用现有单原点叠加逼近方法的重构声压分布,由图7(b)可知,重构的声压分布与直接测量的声压分布存在明显误差,仅在图中箭头所示位置反映局部区域最大值的位置,但不能准确给出该区域的具体声压大小,而且在靠近重构面边缘处的误差进一步增大。这是因为该方法在建立物理模型时,只从单个原点位置应用不同阶次球面谐波函数的叠加描述声场,而实际声源分布的间距较大,应当视之为多声源的声场,单个原点的描述方法与实际声场分布不相符,所以重构精度较之集聚声源声场大幅下降,由式(7)可知,重构误差为64.77%。为了提升离散声源声场分布的重构精度,使用所述多声源近场声全息法获得重构面上的声压分布如图7(c)所示,由图7(c)可知,重构面上的声压分布趋势与直接测量值保持一致,能够准确表达各局部区域极大值和极小值的位置,这是因为建立物理模型时充分考虑到各声源的分布位置对描述精度的影响,在各声源处建立局部坐标系,分别使用不同球面波函数的叠加描述声场,所以能够更准确地描述测量面上声场的分布,从而提升了重构面上的重构精度。由图7(c)也可看出,各重构点处的具体声压值与实际测量值有偏差,这是因为尽管物理模型更加准确,同时也变得更加复杂,所需测点数也随之增加,而测量面上的测点数保持不变,所以使得重构的声场分布趋势准确,具体位置的声压大小不准确,增加测点数量可以提升所述方法的重构精度,由式(7)量化可知整体重构误差为8.91%。

频率是影响所提近场声全息方法的重要参数,为体现离散分布这一声源分布特点,选择分析频率时保证声波最大波长小于声源间最小间距,故选择3~5 kHz为分析频段。分别使用现有单原点球面波叠加法和所述多声源重构法进行重构,得到不同频率时的重构误差如图8所示。由图8可知,对于离散声源分布的相同声场,所提多声源全息重构法的重构误差保持在5%~22%,而基于单原点球面波叠加方法重构误差在61%以上,所述多声源重构方法明显优于现有方法。随着频率的升高,两种方法的重构误差都有增大的趋势,但所述多声源重构方法的误差随频率变化较小,而单原点球面波叠加法的重构误差则变化很大,这是因为所述多声源重构方法的物理模型与实际的声场分布一致,尽管频率升高重构难度随之增大,但误差变化相对稳定。相反,单原点球面波叠加法的物理模型与实际声场分布偏差大,不能准确描述声场,故重构误差变得不稳定并快速增大。

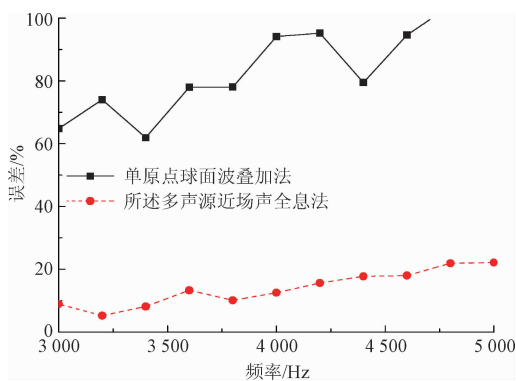


图8 离散声源声场重构误差随频率的变化

Fig. 8 Reconstruction error for discrete sources field at different frequencies

4 实验验证

为进一步验证所提方法的可行性,在消音箱内开展了实验研究。由于实验条件的限制,在传声器阵列的选取时使用现有的平面环形阵列BSWA SPS490,传声器所在最大圆直径为0.454 m,阵列上共有16个传声器,如图9所示。为使实验具有一般性,使用3个相似的普通扬声器作为目标声源,扬声器的纸盆直径约为7 cm,放置在传声器阵列的同一侧。各个扬声器到传声器阵列的距离不等,扬声器1到传声器阵列的垂直距离为0.03 m,扬声器2到传声器阵列的垂直距离为0.06 m,扬声器3到传声器阵列的垂直距离为0.05 m,扬声器相对于阵列的具体位置如图10所示。数据采集时使用DH5920动态信号测试分析系统,所用传声器型号为MPA416。

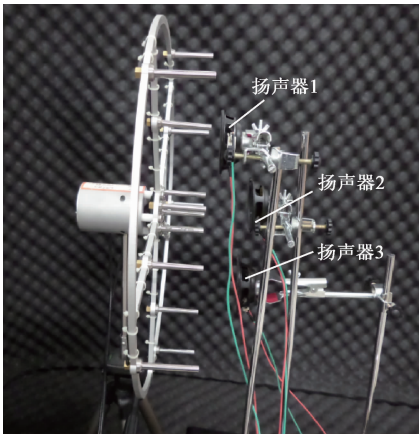


图 9 实验现场
Fig. 9 Photo of the experiment setup

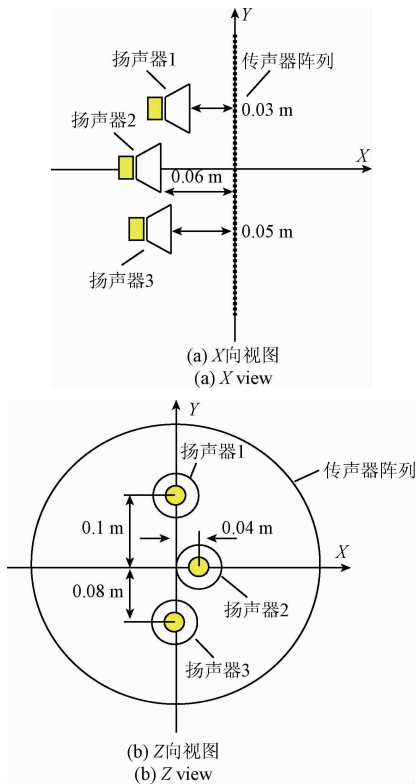
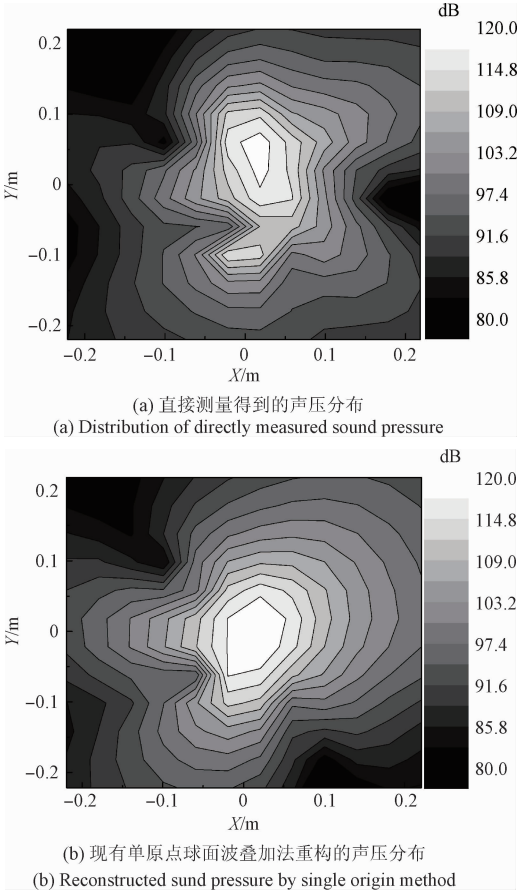


图 10 实验布置示意图
Fig. 10 Schematic of the experiment setup

实验过程中,为了对比相同工况下不同方法的全息重构精度,先在测量面位置使用 BSWA SPS490 阵列采集声场声压信息,然后将阵列移动到重构面位置,实测重构面上的声压分布,作为重构面上声压分布的参照值,重构面是在声源与传声器阵列之间且与传声器阵列平行的有限平面,其几何中心点的 Z 坐标为 $Z = -0.023 \text{ m}$,重构面大小为 $0.22 \text{ m} \times 0.22 \text{ m}$,扬声器的输出信号随机选择为 2 kHz 的正弦波信号。

分别使用所述方法和现有单原点球面波叠加方法,对重构面上的声压分布进行全息重构,得到重构结果如图 11 所示。图 11(a) 所示为使用传声器阵列在重构面上的直接测量值,图 11(b) 所示为使用现有单原点球面波叠加法重构的声压分布,图 11(c) 所示为使用文中所述基于球面波叠加与目标深度识别多声源声场全息方法得到的声压分布。将图 11(b) 所示的现有方法重构声压分布与 11(a) 所示的实际测量值相比较,可以看出现有方法的重构结果与实际分布存在较大误差,虽然能够反映声场的分布趋势,但不能反映声场中主要声源的具体分布位置,只能看出主要声源的分布区域,由式(7)可知整体重构误差为 36.77% 。将图 11(c) 所示的所述方法重构结果与 11(a) 所示的实际测量值相比较,可知所述方法的重构结果虽有一定误差,但能够准确表达声源的分布位置和声场干涉所产生的声压极小值位置,分别如图 11(c) 中虚线箭头和实线箭头所示,由式(7)可知整体重构误差为 16.03% 。可见,该频率时所述方法的重构精度明显提高,这是因为所述方法使用声源深度识别方法获取了主要声源的空间位置信息,然后再根据声源的位置选取不同阶次球面波的原点,使得声场的描述更加符合实际声场分布,所以能够获得更好的重构精度。需要说明的是,由于实验所用阵列测点较少,所获取的声场信息不足,改用多测点阵列可进一步提升全息重构的精度。



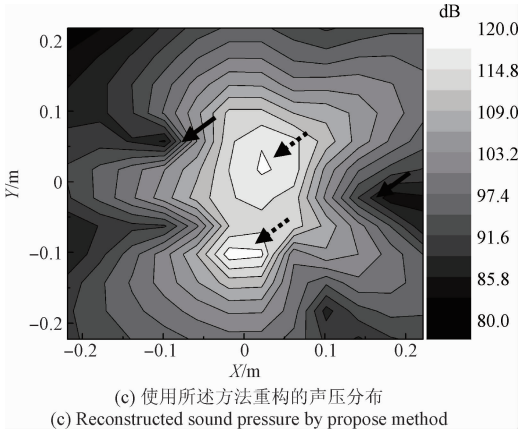


图 11 2 kHz 时不同方法得到的重构面上声压分布

Fig. 11 Comparison of reconstructed sound pressure distribution at 2 kHz

为了观察不同频率时所述方法的全息重构精度,选取若干频率时的声场作为全息重构系统的输入,分别使用所述近场声全息法和现有单原点球面波叠加方法对声场进行全息重构,并把所得到的全息重构结果与直接测量值进行比较,由式(7)量化重构误差的大小,得到不同频率时两种声场全息方法的误差,如表 1 所示,其中所述近场声全息法的全息重构误差为 Δ_1 ,现有单原点球面波叠加方法的全息重构误差为 Δ_2 。由表 1 可知,不同频率时所述方法的全息重构误差多在 16% ~ 22%,而此时现有方法的全息重构误差已大于 30%,使用所述方法后各频率时的声场全息重构误差平均下降 14.08%,显著提升了多声源非规则空间分布声场的全息重构精度。

表 1 不同频率时两种声场全息方法的全息重构误差

Table 1 Reconstruction error at different frequencies

误差/%	频率/kHz				
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Δ_1	32.50	33.01	36.77	30.12	34.08
Δ_2	21.34	17.32	16.03	19.67	21.71

5 结 论

当不规则结构体上有多个离散声源时,提出基于球面波叠加逼近与目标深度识别的空间多声源近场声全息方法。该方法根据目标深度识别理论,确定相应球面波函数坐标原点的空间位置,使得所建立的物理模型更加准确,从而提升空间多声源声场的全息精度。为了验证该方法的可行性,分别使用所述方法和现有单原点球面波叠加法进行了仿真分析与实验研究,得到如下

结论:

1) 仿真分析中,当结构体上声源集聚分布时,所述方法的重构误差与单原点球面波叠加法相近,分析频段内各频率声场全息重构误差在 5% 以下,能较为准确地反映实际声场分布。

2) 仿真分析中,当结构体上声源离散分布时,所述方法在分析频段内各频率的全息重构误差介于 5% ~ 22%,而此时单原点球面波叠加法的误差已大于 61%,不能准确表达重构面上的声压分布和变化趋势。

3) 实验研究中,所述方法的全息重构精度优于现有单原点球面波叠加法,分析频段内的声场全息重构误差平均下降约 14.08%,显著提升了多声源非规则空间分布声场的全息重构精度。

参考文献

[1] VERONESI W A, MAYNARD J D. Nearfield acoustic holography (NAH) II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 81 (5) : 1307-1322.

[2] 尚建华,张明敏. 近场声全息测量研究[J]. 电子测量与仪器学报,2006, 20(4):1-4.

SHANG J H, ZHANG M M. Research on near field acoustical holography measurement [J]. Journal of electronic Measurement and Instrument, 2006, 20 (4) : 1-4.

[3] 周东旺,李舜酩,江星星,等. 基于传递函数估计的近场声全息的噪声源识别[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12):2874-2880.

ZHOU D W, LI SH M, WAGN X X, et al. Noise source identification of near-field acoustical holography based on transfer function estimation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (12) : 2874-2880.

[4] 周福强,王少红,于梅,等. 卡车胎近场噪声实验及仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报,2016, 30 (5) : 669-675.

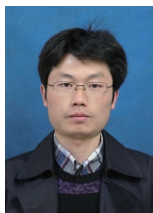
ZHOU F Q, WAGN SH H, YU M, et al. Study on the near field noise of truck tire with test and simulation[J]. Journal of electronic Measurement and Instrument, 2016, 30(5):669-675.

[5] VERONESI W A, MAYNARD J D. Digital holographic reconstruction of sources with arbitrarily shaped surfaces[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1989, 85 (2) : 588-598.

[6] BAI M R. Application of BEM (boundary element method) -based acoustic holography to radiation analysis of sound sources with arbitrarily shaped geometries [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1992,

- 92 (1): 533-549.
- [7] SARKISSIAN A. Extension of measurement surface in near-field acoustic holography [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 115 (4): 1593-1596.
- [8] 贺岩松, 魏晓博, 徐中明, 等. 基于等效源法的双测量面相干声源分离方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2109-2115.
HE Y S, WEI X B, XU ZH M, et al. Sound field separation of coherent sources using double plane measurements based on equivalent source method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9): 2109-2115.
- [9] HALD J. Patch near-field acoustical holography using a new statistically optimal method[J]. American Journal of Machine, 2003, 125(12): 1151-1152.
- [10] JACOBSEN F, JAUD V. Statistically optimized near field acoustic holography using an array of pressure-velocity probes[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 121(3): 1550-1558.
- [11] WU S F. On reconstruction of acoustic pressure fields using the Helmholtz equation least squares method[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 107(5): 2511-2522.
- [12] WANG Z, WU S F. Helmholtz equation - least-squares method for reconstructing the acoustic pressure field[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102(4): 2020-2032.
- [13] NATARAJAN L K, WU S F. Reconstructing the vibro-acoustic quantities on a highly non-spherical surface using the Helmholtz equation least squares method [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(6): 4570-4583.
- [14] VALDIVIA N P, WILLIAMS E G. Study of the comparison of the methods of equivalent sources and boundary element methods for near-field acoustic holography[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 120 (6): 3694-3705.
- [15] 毕传兴, 胡定玉, 张永斌, 等. 基于等效源法和双面质点振速测量的声场分离方法[J]. 物理学报, 2013, 62(8): 084301.
BI CH X, HU D Y, ZHANG Y B, et al. Sound field separation technique based on equivalent source method and double-layer particle velocity measurements [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(8): 084301.
- [16] 丁浩, 李春晓, 金江明, 等. 可识别声源深度的三维声聚焦波束形成方法[J]. 传感技术学报, 2013, 26(2): 175-181.
DING H, LI CH X, JIN J M, et al. Sound source depth identifiable three-dimensional focused beamforming [J]. Chinese Journal of Sensors, 2013, 26(2): 175-181.

作者简介



宋玉来, 2009 年于皖西学院获得学士学位, 2015 年于浙江工业大学获得博士学位, 现为嘉兴学院讲师, 主要研究方向为噪声振动控制和阵列信号处理。

E-mail: songyulai_svlab@163.com

Song Yulai received his B. Sc. degree in 2009 from West Anhui university, and received his Ph. D. degree in 2015 from Zhejiang University of Technology, he is now a lecturer in Jiaxing University. His main research interests include noise and vibration control, array signal processing.



胡红生 (通讯作者), 分别在 1999 年和 2002 年于安徽农业大学获得学士学位和硕士学位, 2006 年于南京理工大学获得博士学位, 现为嘉兴学院教授, 主要研究方向为振动噪声控制、检测与信号处理、汽车零部件关键技术。

E-mail: hhs999@mail. zjxu. edu. cn

Hu Hongsheng (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Anhui Agriculture University in 1999 and 2002, respectively, and received his Ph. D. degree in 2006 from Nanjing University of Science and Technology. Now he is a professor in Jiaxing University. His main research interests include vibration & noise control, measuring and signal processing, and key technologies on auto parts.