单层传声器阵列重建相干声场的

近场声全息方法研究*

宋玉来1 卢奂采11 金江明2 李春晓1 岳 磊1

(1 浙江工业大学机械工程学院 特种装备制造与先进加工技术教育部 / 浙江省重点实验室 杭州 310014)

(2 浙江省信号处理重点实验室 杭州 310014)

2013 年 8 月 29 日收到 2014 年 5 月 9 日定稿

摘要 针对传声器阵列两侧存在相干声源的非自由声场重建问题,提出基于球面谐波函数扩展近场声全息理论的相干声场重 建方法。该方法在已知测量面两侧声源几何位置时,使用单层传声器阵列获取测量面处的声压分布,通过最小二乘法获得与目 标声源和干扰噪声源响应对应的最优球波函数扩展项数和最优系数向量,结合测点位置的空间坐标进行声波分解,并分别重 建出各声源在测量面上的声压分布。为了验证方法的有效性,分别给出了相干噪声源为球形声源和非球形声源的仿真验证, 并在全消声室内对双扬声器产生的相干声场的重建进行了实验验证。结果表明:该方法对球形声源和非球形声源干扰下的声 场重建都具有较好的效果,球形声源干扰下的重建精度更高。

PACS 数: 43.60

Near-field acoustic holography based reconstruction of sound field with coherent sound sources by single layer microphone array

SONG Yulai¹ LU Huancai¹ JIN Jiangming² LI Chunxiao¹ YUE Lei¹

(1 Key Lab. of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology Hangzhou 310014)

(2 Key Laboratory of Signal Processing of Zhejiang Province Hangzhou 310014)

Received Aug. 29, 2013

Revised May 9, 2014

Abstract A methodology of separation and reconstruction on holography surface of sound field caused by coherent sound sources based on spherical wave expansion based near-field acoustic holography is presented. A single layer microphone array is used to obtain the sound pressure on the measurement plane, the least-square method is applied to solve the coefficient vectors corresponding to the coherent sound sources. With the coordinates of the measurement points and the position information of the sound sources, the sound pressure on the measurement points sound source can be reconstructed, respectively. The methodology is validated and the accuracy of wave separation and sound field reconstruction is examined numerically in sound field with coherent spherical source and non-spherical source. The accuracy of reconstruction is also examined in anechoic chamber with two coherent speakers. The results of experiment show that the accuracy of reconstruction of sound field with spherical sources is higher than that with non-spherical source.

引言

近场声全息方法通过传声器阵列在声学近场采

* 国家自然科学基金 (51275469, 51205354, 61101231) 资助

† 通讯作者: 卢奂采, huancailu@zjut.edu.cn

集得到声源发出倏逝波,经声场变换算法,可以重构 出不受声波波长限制的高精度三维声学图像,现已 被广泛应用于中低频范围内的声源识别和声场重建 中^[1]。但在工厂流水线等嘈杂环境中进行传声器阵 列现场原位测试时,由于在传声器后面存在与测量 目标声源相干的背景噪声源,此时现有近场声全息 方法将不再适用。

鉴于以上问题,于飞等^[2]提出基于波场外推法和 Fourier 逆变换的声场分离方法,使用双层声压测量 面获取声场信息, 对测量面两侧的相干声场进行了分 离重建研究。李卫兵等^[3]基于统计最优近场声全息 (Statistically Optimised Near Field Acoustic Holography, SONAH) 方法, 使用双层声压测量面获取声 场信息, 实现了测量面同一侧相干声源的分离和重 建。由于等效源声全息方法对声源形状具有较好的 适应性, Bi 等^[4] 提出了基于等效源近场声全息的声 场分离重建方法,即通过两个距离较近且相互平行 的测量面获取声场信息,在空间域内对测量面两侧 的相干声源进行分离。Bi^[5]等还对球面波声源的分 离做了仿真研究。为了减少基于傅里叶变换的分离方 法对声源形状的限制,张海滨等^[6]基于 Helmholtz 方 程最小二乘法并结合循环迭代及奇异值分解方法, 用以估计测量面同侧多个相干声源对声场的贡献,

并根据所提方法做了仿真验证。由于双层测量面所 用测点相对较多,为了简化采集设备前端, Jacobsen 等^[7] 在 SONAH 的基础上,同时采集测点处的声压 和空气粒子振度,提出了具有抑制测量面一侧相干 声源声场分离方法; 随后, Zhang 等^[8]针对 Jacobsen 等 [7] 所提出方法在目标声源与干扰声源对称分布时 不能有效分离的问题,仍然使用声压-速度传感器阵 列,提出了相应的改进方法。为进一步研究单测量面 的分离特性。毕传兴等^[9]使用声压-粒子振速传感器 构建的单测量面,基于欧拉公式和有限差分近似原 理,提出了一种新的可分离重建相干声源的声场分 离方法。王冉等^[10]提出了基于波叠加法与 SONAH 相结合的单测量面声场分解方法,对球形声源具有 较好的分离效果。由上可知, 在相干声场的分解重建 过程中, 声场信息的获取多采用双层声压测量面或 采用单测量面同时获取测点处的声压和空气粒子振 速。对于采用单测量面仅获取声压信息的相干声场分 解方法的研究相对较少。

鉴于在工程应用中, 声场中主要结构声源的几何 位置通常是已知的, 本文研究了在声源位置已知、声 源相干的情况下, 基于单全息声压面的相干声场分 解与重建方法。本文第1节简要介绍了基于球面谐 波函数叠加的近场声全息原理; 第2节介绍了基于 第1节原理用于相干声场分解的重建方法,并给出 仿真计算结果, 然后提出基于声源位置已知的相干 声场分解与重建方法; 第3节针对本文方法做了数 值仿真和消声室内的实验验证;第4节对研究结果进 行归纳并给出结论。

1 基于球面谐波函数叠加的声全息

原理

小振幅振动产生的声波在空气介质中的传播规 律可用波动方程加以描述,波动方程经 Fourier 变换 后可得到其在频域中的表达,称为 Helmholtz 方程。 在球坐标系下,用分离变量法解 Helmholtz 方程,可 得坐标点 (r, ϕ, θ) 处的复声压为:

$$p(r,\phi,\theta;\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=-n}^{n} (\boldsymbol{c}_{ln} \mathbf{h}_{n}^{(1)}(kr) \mathbf{Y}_{n}^{l}(\theta,\phi) + \mathbf{d}_{ln} \mathbf{h}_{n}^{(2)}(kr) \mathbf{Y}_{n}^{l}(\theta,\phi)),$$
(1)

其中, $h_n^{(1)}(kr)Y_n^l(\theta,\phi)$ 代表去波 (outgoing wave) 分 量, $h_n^{(2)}(kr)Y_n^l(\theta,\phi)$ 代表来波 (incoming wave)分量, $h_n^{(1)}(kr)$ 是第一类 *n* 阶球 hankel 函数, $h_n^{(2)}(kr)$ 是第 二类 *n* 阶球 hankel 函数, $Y_n^l(\theta,\phi)$ 是 *n* 阶 *l* 次的球 面谐波函数, *k* 为波数, c_{ln} 和 d_{ln} 代表权重系数。 在自由场中, 即式 (1) 中没有来波分量, 可写为:

$$p(r,\phi,\theta;\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=-n}^{n} \boldsymbol{c}_{ln} \mathbf{h}_{n}^{(1)}(kr) \mathbf{Y}_{n}^{l}(\theta,\phi).$$
(2)

根据上述声场表达方法, Wu 等^[11-12]提出使 用球面谐波函数的叠加逼近重建空间任意位置的声 场分布。当声场中的声源都位于测量面的一侧时,将 式 (2)所表达的测点声压写作向量形式 **P**(**X**),则:

$$\boldsymbol{P}(\boldsymbol{X}) = \boldsymbol{G}_p(\boldsymbol{X}|\boldsymbol{X}_m)\boldsymbol{P}(\boldsymbol{X}_m), \qquad (3)$$

式中, $G_p(X|X_m)$ 代表从测量声压向量 $P(X_m)$ 到声场任意重建面上声压向量 P(X) 的传递矩阵,其中:

$$\boldsymbol{G}_p(\boldsymbol{X}|\boldsymbol{X}_m) = \boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{X})\boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{X}_m)^+, \qquad (4)$$

式中, $\Psi(X_m)^+$ 是展开矩阵 $\Psi(X_m)$ 的伪逆。

$$\boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{X}_m)^+ = [\boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{X}_m)^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{X}_m)]^{-1}\boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{X}_m)^{\mathrm{H}}, \quad (5)$$

式中, 上标 H 表示展开矩阵 **Ψ** 的共轭转置。展开矩 阵 **Ψ** 的组成分量即为 Helmholtz 方程的特解:

$$\psi_j(r,\phi,\theta;\omega) \equiv \psi_{nl}(r,\phi,\theta;\omega) = \mathbf{h}_n^{(1)}(kr)\mathbf{Y}_n^l(\theta,\phi),$$
(6)

其中, $j = n^2 + n + l + 1$, 球面谐波函数 $Y_n^l(\theta, \phi)$ 的表达式为:

$$Y_{n}^{l}(\theta,\phi) = \sqrt{\frac{(2n+1)}{4\pi} \frac{(n-l)!}{(n+l)!}} p_{n}^{l}(\cos\theta) e^{il\phi}, \quad (7)$$

式中, $p_n^l(\cos\theta)$ 为 Associated Legendre 函数。

从以上公式可知,上述方法能够根据测量面的 声压信息有效重建声源面上及声源面与测量面之间 的空间声压分布,也可以实现测量面外侧的声场预 测。但是,当阵列面的两侧都有声源存在时,该方法 不能够获得各声源在阵列面上的单独贡献量,使其 不适用于此声场的重建。

2 相干声场的分解与重建方法

2.1 现有基于谐波函数叠加的相干声场重建方法

为了重建目标声源单独在全息面上的声压贡献, 文献 13 提出一种改进的 Helmholtz 方程最小二 乘法重建测量面上目标声源的单独响应, 即在第 1 节 原有去波叠加重建的基础上加入来波分量的表达, 使用式 (1) 代替式 (2) 进行声场重建, 使用来波分量 的叠加表达干扰声源的声贡献。研究结果表明, 该方 法对于封闭空间内存在声反射现象的声场重建问题 具有较好的效果, 但不适用于自由声场中多源相干 声场的重建。下面用具体的仿真算例说明该方法存 在的局限。

如图 1 所示,在声场中同时存在目标声源和与 之相干的噪声源,径向脉动球视为目标声源, z方 向刚性振动球视为相干噪声源。径向脉动球的半径 为 0.05 m,振动速度为 0.05 m/s;刚性振动球的半 径也为 0.05 m,振动速度为 0.1 m/s。脉动球的球心 位于空间点 (0,0.06 m,0) 处,振动球的球心坐标是 (0,-0.05 m,0.5 m),振动频率都是 1 kHz。空气密度 取 1.29 kg/m³,声在空气中的传播速度取 340 m/s。 测量面为 0.2 m×0.2 m 的规则平面,其上均布 6×6 个测点,相邻测点距离为 0.04 m。测量面与 xOy 平 面平行,距离坐标原点 $d_1 = 0.12$ m,距离相干噪声 源所在平面 $d_2 = 0.38$ m。为了方便表达各测点的位置,将全息测量面上的测点从最上面一行开始从小 到大依次编号,然后逐行向下排列,则测量面右下角 (0.1 m, -0.1 m, 0.12 m)处的测点即为第 36 号测点。



声场重建结果如图 2 所示。图 2(a) 给出了目标 声源声压重建值和理论值及两声源共同值的声压幅 值在各测点的具体分布,图 2(b) 给出了目标声源声 压重建值和理论值及两声源共同作用值的声压相位 在各测点的大小。由图 2(a) 可以看出,由于声场中 声波干涉现象的存在,全息测量面上两声源共同作 用值比目标声源单独产生的声压幅值小。经算法分 解重建后,得到了目标声源单独在全息测量面上产 生的声压幅值,可见由分解重建得到的目标声源在 全息测量面上的声压幅值响应与理论值的分布趋势 保持一致,但不同测点的幅值相差较大,最大时约为 7 Pa,严重偏离了客观事实。由图 2(b) 可以看出,目 标声源声压相位响应的理论值与重建值的分布趋势 仍十分相似,少数测点处能够有效重建,总体上重建 效果较差。为了定量表达重建值与理论值的误差大



小, 定义重建误差 Δ 的计算公式为:

$$\Delta = \frac{\|\boldsymbol{P}_{\text{meas}}' - \boldsymbol{P}_{\text{reco}}\|_2}{\|\boldsymbol{P}_{\text{meas}}'\|_2} \times 100\%, \tag{8}$$

式中, **P**'_{meas} 是声源在全息测量面上产生的复声压向量, **P**_{reco} 是由算法重建后得到的声源在全息测量面上产生的复声压向量。

由式(8)可计算出重建值与理论值的误差为 64.2%。可见,该方法未能有效重建出目标声源的声 压幅值和相位在全息测量面上的单独响应。

2.2 基于声源位置已知的相干声场分解与重建方法

根据相干声场的分布特点,结合现有声场重建 方法,本文提出了一种基于声源位置已知的相干声 场分解与重建方法。如图 3 所示,在声场中有两个 相干声源,分别位于全息测量面 S 的两侧,全息面 上共有 N 个测点。在坐标系 xyz 内,由球面谐波函 数的叠加逼近对应声源的声场分布。模型分析步骤 如下:

分析目标声源 A 时, 声源 A 在全息测量面上各 测点的响应记为: $P^{A} = [P_{1}^{A}, P_{2}^{A}, \dots, P_{N}^{A}]^{T}$ 。全息面上 第 i 个测点处的声压可根据第 1 节中的理论分解为:

$$p_i^{\mathcal{A}}(r,\phi,\theta;\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=-n}^{n} \boldsymbol{c}_{ln}^{\mathcal{A}} \mathbf{h}_n^{(1)}(kr_{\mathcal{A}i}) \mathbf{Y}_n^l(\theta_{\mathcal{A}i},\phi_{\mathcal{A}i}),$$
(9)

式中, r_{Ai} 表示第 i 个测点到声源 A 中心点 O₁ 的

距离。

分析相干噪声源 B 时, 声源 B 在全息测量面上 各测点的响应记为: $P^{B} = [P_{1}^{B}, P_{2}^{B}, \dots, P_{N}^{B}]^{T}$ 。全息面 上第 *i* 个测点处的声压可同理分解为:

$$p_i^{\mathrm{B}}(r,\phi,\theta;\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=-n}^{n} \boldsymbol{c}_{ln}^{\mathrm{B}} \mathbf{h}_n^{(1)}(kr_{\mathrm{B}i}) \mathbf{Y}_n^l(\theta_{\mathrm{B}i},\phi_{\mathrm{B}i}),$$
(10)

式中, *r*_{Bi} 表示第 *i* 个测点到声源 B 中心点 *O*₂ 的距离。



图 3 相干声场分布示意图

当同时考虑两个声源共同激励产生的声场时, 由声场叠加原理可得全息面上的声压为:

$$\boldsymbol{P}_{\text{meas}} = \boldsymbol{P}^{\text{A}} + \boldsymbol{P}^{\text{B}}, \qquad (11)$$

结合式 (9) 和式 (10), 并将声场中不同声源的去波都 展开为 *M* 项的球面谐波函数的叠加, 于是式 (11) 可 写成矩阵的形式:

$\begin{bmatrix} p_{\text{meas},1} \\ p_{\text{meas},2} \\ \vdots \\ p_{\text{meas},i} \\ \vdots \\ p_{\text{meas},N} \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} \psi_{11}^{\mathrm{A}} \\ \psi_{21}^{\mathrm{A}} \\ \vdots \\ \psi_{i1}^{\mathrm{A}} \\ \vdots \\ \psi_{N1}^{\mathrm{A}} \end{bmatrix}$	$\begin{array}{c} \psi^{\mathrm{B}}_{11} \\ \psi^{\mathrm{B}}_{21} \\ \vdots \\ \psi^{\mathrm{B}}_{i1} \\ \vdots \\ \psi^{\mathrm{B}}_{N1} \end{array}$	···· ····	$\begin{array}{c} \psi^{\mathrm{A}}_{1j} \\ \psi^{\mathrm{A}}_{2j} \\ \vdots \\ \psi^{\mathrm{A}}_{ij} \\ \vdots \\ \psi^{\mathrm{A}}_{Nj} \end{array}$	$\begin{array}{c} \psi^{\mathrm{B}}_{1j} \\ \psi^{\mathrm{B}}_{2j} \\ \vdots \\ \psi^{\mathrm{B}}_{ij} \\ \vdots \\ \psi^{\mathrm{B}}_{Nj} \end{array}$	···· ····	$\begin{array}{c} \psi^{\mathrm{A}}_{1M} \\ \psi^{\mathrm{A}}_{2M} \\ \vdots \\ \psi^{\mathrm{A}}_{iM} \\ \vdots \\ \psi^{\mathrm{A}}_{NM} \end{array}$	$ \begin{array}{c} \psi^{\mathrm{B}}_{1M} \\ \psi^{\mathrm{B}}_{2M} \\ \vdots \\ \psi^{\mathrm{B}}_{iM} \\ \vdots \\ \psi^{\mathrm{B}}_{NM} \end{array} $	$\left[\begin{array}{c} c_1^{\mathrm{A}} \\ c_1^{\mathrm{B}} \\ \vdots \\ c_M^{\mathrm{A}} \\ c_M^{\mathrm{B}} \end{array}\right]$,	(12)
--	--	--	---	--------------	---	---	--------------	---	---	--	---	------

式中, ψ_{ij}^{A} 和 ψ_{ij}^{B} 分别表示第 i 个测点处声压分别按式 (9) 和式 (10) 展开的第 j 个分量,即

$$\psi_{ij}^{A} \equiv \psi_{ij}^{A}(r_{Ai}, \phi_{Ai}, \theta_{Ai}; \omega) = h_{n}^{(1)}(kr_{Ai})Y_{n}^{l}(\theta_{Ai}, \phi_{Ai}),$$

$$\psi_{ij}^{B} \equiv \psi_{ij}^{B}(r_{Bi}, \phi_{Bi}, \theta_{Bi}; \omega) = h_{n}^{(1)}(kr_{Bi})Y_{n}^{l}(\theta_{Bi}, \phi_{Bi}),$$

 $j = n^2 + n + l + 1, l$ 为 [-n, n] 内递增的整数。 $[c_1^A, c_1^B, \cdots, c_M^A, c_M^B]^T$ 是系数向量,即为式 (9) 和式 (10) 中 c_{ln}^A 和 c_{ln}^B 从低阶到高阶构成的向量。 式 (12) 简记为:

$$\boldsymbol{P}_{\text{meas}} = \boldsymbol{\Psi}^{\text{AB}} \boldsymbol{C}^{\text{AB}}, \qquad (13)$$

于是,可得系数向量:

$$\boldsymbol{C}^{AB} = (\boldsymbol{\Psi}^{AB})^+ \boldsymbol{P}_{meas},$$
 (14)

式中, $(\Psi^{AB})^+$ 是展开矩阵 Ψ^{AB} 的伪逆。 C^{AB} 包括 $[c_1^A, c_2^A, \dots, c_M^A]^T$ 和 $[c_1^B, c_2^B, \dots, c_M^B]^T$ 两部分, 分别与 目标声源和相干噪声源对应。

由于使用不同阶球面谐波函数的叠加逼近全息 测量面上的测量值,理论上扩展项数趋于无穷多项 时才能准确逼近。但是,实际测量时由于测点是离散 分布且存在测量误差,扩展项数超过某一最优值后 会引入大量误差,使重建精度下降。为了确定最优展 开项数 $M_{optimal}$,由式 (8)计算重建声压向量 P_{reco} 与测量值 P_{meas} 的误差。在设定最大展开项数 M_{max} 后,从 M = 1开始遍历展开项数,并分别计算不同 展开项数对应的重建误差,遍历完成后可得到一条 重建误差随展开项数变化的曲线 ($M - \Delta$ 曲线)。 $M - \Delta$ 曲线上最小误差对应的展开项数即为最优展 开项数 $M_{optimal}$,与 $M_{optimal}$ 对应的最优权重系数向量为 $C_{optimal}^{AB}$ 。于是,可以得到与目标声源对应的最 优权重系数向量 $C_{optimal}^{A}$:

$$\boldsymbol{C}_{\text{optimal}}^{\text{A}} = [c_1^{\text{A}}, c_2^{\text{A}}, \cdots, c_{M_{\text{optimal}}}^{\text{A}}]^{\text{T}}$$
 (15)

同时可得到与相干噪声源对应的最优权重系数 向量 **C**^B_{optimal}:

$$\boldsymbol{C}_{\text{optimal}}^{\text{B}} = [\boldsymbol{c}_{1}^{\text{B}}, \boldsymbol{c}_{2}^{\text{B}}, \cdots, \boldsymbol{c}_{M_{\text{optimal}}}^{\text{B}}]^{\text{T}}.$$
 (16)

由声场重建原理,结合式 (9) 和式 (10) 可分别 得到目标声源和相干噪声源在全息测量面上的声压 贡献。

目标声源在全息面上的声压贡献为:

$$\boldsymbol{P}_{\text{reco}}^{A} = \boldsymbol{\Psi}_{\text{optimal}}^{A} \boldsymbol{C}_{\text{optimal}}^{A}, \qquad (17)$$

式中, $\Psi_{\text{optimal}}^{\text{A}}$ 是测点位置坐标按式 (9) 展开 M_{optimal} 项得到的传递矩阵。

相干噪声源在全息测量面上的声压贡献为:

$$\boldsymbol{P}_{\text{reco}}^{\text{B}} = \boldsymbol{\Psi}_{\text{optimal}}^{\text{B}} \boldsymbol{C}_{\text{optimal}}^{\text{B}}, \qquad (18)$$

式中, $\Psi_{\text{optimal}}^{\text{B}}$ 是测点位置坐标按式 (10) 展开 M_{optimal} 项得到的传递矩阵。

在选择球面谐波函数的中心点时,应通过实际 情况确定各声源的位置作为中心点,或结合现有声 源定位方法加以确定。在布置测量面时,虽然本节公 式推导是针对声源位于测量面的两侧,但所得结果 理论上适用于声源位于测量面同侧的布置,故可根 据实际选择布置方式和对应参数。

综上可知,式(17)即为目标声源的声场重建公 式,能够用于存在相干背景噪声情况下重建目标声 源的声压贡献。也可由式(18)获得相干噪声源在空 间声场中的分布。

3 仿真计算与实验结果分析

3.1 仿真算例 1

为了验证上述相干声场分解重建方法的有效 性,现在通过数值仿真算例进行验证。声场模型仍 如图 1 所示,声源相关参数和测量面的参数都保持 不变。

使用本方法对该相干声场进行分解和重建, 球 波函数最优展开项数为 7, 重建的目标声源的声场分 布结果为:图 4(a)和图 4(b)是全息测量面两侧声源 共同在测量面上产生的声压幅值分布和声压相位分 布;图 5(a) 和图 5(b) 为理论上径向脉动球单独在全 息测量面上产生的声压幅值和声压相位分布;图 6(a) 和图 6(b) 是采用所述改进方法重建后的目标声源在 测量面上产生的声压幅值分布和声压相位分布。由 图 4(a) 和图 5(a) 可以看出,由于目标声源与相干噪 声源产生了相干声场,目标声源单独在全息测量面 上产生的声压幅值响应比两声源共同产生的声压幅 值响应大,而当测点处于波峰与波谷相遇位置时便 会出现测量值比目标声源和干扰声源都小;在一般 测量和计算分析中, 全息测量面距离目标声源比干 扰声源近,这样做使得目标声源对测量面上测点的 声压幅值贡献比噪声源大,提高了信噪比,也间接的 提高了重建精度。对比图 5 和图 6 可知,目标声源







在全息测量面上的声压响应的重建值与理论值十分 相近,由式(8)可计算出二者的重建误差为 $\Delta =$ 5.18×10⁻⁷。这么小的误差一方面是因为仿真计算中 所模拟的声场环境比较简单,有助于方法的有效实 施;同时也说明所提方法对该模拟声场环境下具有 很好的分解重建能力。

3.2 仿真算例 2

仿真算例1中,由于所用声源的外形与物理模型中所用球面谐波的波阵面十分相似,使得声压的分离重建精度非常高。为进一步说明所述方法的重构效果,现给出另一个更为逼近现场应用的仿真算例。

在具体实施中,所提出方法主要是针对尺寸较小的类球形声源,所以目标声源选用振动方向垂直 于测量面的振动球。现场环境中噪声源比较复杂, 选用单点激励的受迫振动简支薄钢板表示,如图 7 所示。在计算时,振动球的半径也为 0.05 m,振动速 度为 0.05 m/s,振动球的球心位于 (0.08 m,0,0) 处。 受迫振动简支薄钢板的尺寸为 0.2 m×0.15 m, 泊松 比为 0.3, 弹性模量为 2.06×10^{11} Pa, 板厚 0.001 m, 钢板密度为 7850 kg/m³, 激励力 20 N, 激励点坐标 是 (0.04 m, 0.035 m, 0.5 m), 板位于 z = 0.5 m 处。 振动球和钢板的激振频率均为 1 kHz 。测量面仍为 0.2 m×0.2 m 的规则平面,其上均布 6×6 个测点。 空气密度取 1.29 kg/m³, 声在空气中的传播速度 取 340 m/s 。测量面的位置和测量面上的测点编号 与 2.1 节相同。选取用于表达板辐射声场的球波函 数中心时,在原有几何中心位置处再往板后移动板 边长平均值的一半,所以该球波函数的中心坐标是 (0,0,0.5875 m)。板在全息测量面上产生的声压由 Ralyiegh 积分计算得到。

使用本方法对该相干声场进行分解和重建, 球波 函数最优展开项数为 11, 重建的目标声源的声场分 布结果为:图 8(a) 是全息测量面上目标声源声压重 建值和理论值及两声源共同作用值的幅值对比图; 图 8(b) 为全息测量面上目标声源声压重建值和实测 值及两声源共同作用值的相位对比图。由图 8(a) 可以 看出,尽管测量面距离受迫振动简支板相对较远,但 简支板对目标声源产生的声场具有很明显的贡献,目 标声源在各测点产生的平均声压幅值为 2.27 Pa,两 声源共同在各测点产生的平均声压幅值为 3.64 Pa, 且振动球和简支板共同作用的声压幅值在测量面上 的分布规律发生较大变化。由图 8(a)中目标声源理 论值和重建值的对比发现,各测点处目标声源重建 值比理论值偏大,各测点处的平均偏差为0.23 Pa,但



图 8 全息测量面上目标声源声压重建值和实测值比较

是两声源共同作用值与目标声源理论值的平均偏差 为 1.37 Pa, 远远大于目标声源单独的贡献, 且重建 值与理论值的声压幅值分布趋势基本一致; 观察 图 8(b)发现, 两声源声场叠加后的相位分布受简支 板影响明显, 对比图 8(b)中声压相位的重建值和理 论值,发现重建值相对于理论值略偏小,各测点的 平均偏差为 0.12 rad,然而各测点处两声源共同作用 相位与理论值的平均偏差值为 1.33 rad,同样远远大 于目标声源单独的贡献。由上述分析可知,本方法对 目标声源在测量面上的声场分布实现了重建,根据 式 (8),重建的复声压误差为 13.8%。

3.3 实验结果分析

为进一步验证所述相干声场分解与重建方法的 有效性,在本底噪声小于 18 dB 的全消声室内开展了 实验研究。实验所用到的主要设备有: 64 通道平面 阵列 (型号:WA-1536-W-017),该阵列尺寸为 0.21 m× 0.21 m,均匀分布 8×8 个测点; 1/4 英寸传声器 64 支; 1/2 英寸传声器 1 支; PULSE Lan- XI 16 数据 采集系统;纸盆直径约为 7 cm 的扬声器两个。实验 中所用扬声器为市场上普通家用产品,其余设备均 采购自丹麦 B&K 公司。

实验准备时,由于全消声室地网具有较大的弹 性,测试人员的走动会影响声源与平面阵列的相对 位置。所以,在地网上放置了一块平整的厚木板,作 为传声器阵列和声源的固定基础,并在木板上铺上 海绵以减少木板表面引起的声反射。再分别把两扬 声器放置在平面阵列的两侧,将扬声器 A 视为目标 声源, 将扬声器 B 视为噪声源。使扬声器 A 的纸盆 中心处在 (0,0,0) 附近, 阵列面与 xOy 平面平行, 阵 列的几何中心在 (0,0,0.01 m) 处附近, 扬声器 B 的 纸盆中心位于 (0,0,0.5 m) 处附近。需要注意的是, 测量面上的总声压和目标声源单独存在时的声压不 可能在同一时刻测量,所以相同参量下不同时刻所 测复声压的幅值虽然相等,但存在唯一却未知的相 位差,即目标声源在测量面上声压响应的重建值与 目标声源声压响应的实测值存在唯一却未知的相位 差。因此,在声场中放置一支 1/2 英寸传声器,用以 纠正不同时刻采集带来的相位改变。全消声室内的 实验布置如图 9 所示。

数据采集时, 先将两个扬声器打开, 并由 PULSE 系统输出两个频率均为 1 kHz 的正弦信号, 再由数 据采集系统采集信号 10 s。然后将噪声源移去, 在 相同参数下采集声压信号 10 s, 视为目标声源重建声 压的理论值。

数据处理时,先通过观察时域数据是否有明显

异常,然后针对有效数据使用参考传声器互谱法^[14] 获得测量面上的复声压。由于分离方法使用基于球 面谐波函数的叠加逼近测量面的声场分布,这与 文献 12 所用理论相似,由文献 12 可知,当测量面比 被测对象大很多时,即传声器阵列投影到被测对象 时有两圈或更多传声器处在被测对象外侧,如适当 减小测量面的尺寸可以提高重建精度。此外,由 2.2 节知测点的多少决定了球面谐波的最大展开项数, 较多的测点是有效重建的重要保证。所以,综合考虑 以上两个影响因素,在算法所用输入数据的选取时, 舍掉传声器阵列外侧测点,即舍去 2 行 2 列,只使 用阵列内侧的 6×6 个测点。



图 9 实验现场布置图

为了便于直观表达阵列表面重建结果与实测值 的差异,如图 10 所示,将 36 个测点依次编号:测量 面上 (-0.075 m,-0.075 m,0.01 m)处的测点记为第 1 号测点,然后由下到上依次编号,列数从右到左排 列,可知位于 (0.075 m,0.075 m,0.01 m)处的传声器 是第 36 号测点。为了减小重建过程的不适定性对重 建结果的影响,计算过程中使用了 L 曲线正则化方 法^[15]。



图 10 所用测点在平面阵列上的分布示意图 (正面视图)

在声场重构过程中,根据 2.2 节中的原理,确定 球波函数最优展开项数为 16,进行重建目标声源单 独在测量面上产生的声压。图 11(a) 是全息测量面上 目标声源声压重建值和理论值及两声源共同作用值的幅值对比图;图 11(b)为全息测量面上目标声源声 压重建值和实测值及两声源共同作用值的相位对比 图。由图 11(a)可以看出:多数测点处目标声源重建 值与理论值非常一致,只有少数测点的幅值偏差相 对较大,由测点在平面阵列上的分布可知,这部分测 点主要集中在阵列边缘的位置;同时可发现两声源共 同作用声压值比其中的两个分量的值都要小,这说明 阵列所处位置的声波干涉现象十分明显。在图 11(b) 中,计算结果表明目标声源的重建相位已明显从叠 加相位中分离出来,但与实测值还有一定的误差,这 是由于两声源共同叠加的相位分布已经比较复杂且 存在测量误差,使得相位的重建难度远大于幅值的 重建。由式(8)可以计算出复声压的整体重建误差为 7.19%。



为了进一步说明文中所提方法在相干声场噪声 抑制过程中的应用效果,选取图 10 中第一列上的 6 个测点,给出不同测点处目标信号的重建值和理论值 以及两声源共同作用值,如表 1 所示。可以看出重建 值与实测值能够较好的吻合。

序号	目标声源重建值	目标声源理论值	现场实测值
1	-0.116 + 0.124i	-0.094 + 0.090i	-0.019 + 0.063i
2	-0.102 + 0.127i	-0.103 + 0.109i	-0.023 + 0.075i
3	-0.090+0.116i	-0.112 + 0.125i	-0.026 + 0.087i
4	-0.088 + 0.112i	-0.112 + 0.123i	-0.024 + 0.083i
5	-0.090+0.100i	-0.100 + 0.099i	-0.016 + 0.060i
6	-0.075 + 0.086i	-0.084 + 0.079i	-0.004 + 0.032i

表 1 测点处复声压对比 (单位: Pa)

以上计算结果表明,采用声源位置已知的相干 声场分解与重建方法能够有效重建目标声源在声场 内的单独声压分布,在具体实验中具有较好的适应 能力,提升了声全息方法在近场声源识别和声场全 息重建方面的能力。

4 结论

为了有效重建测量面两侧相干声源在测量面上 的声压响应,本文主要开展了基于球面谐波函数叠 加逼近方法的相干声场重建研究,即在现有近场声 全息理论的基础上,提出了基于声源位置信息的相 干声场重建方法。

由仿真算例分析可知,对于简单声源该方法能 够准确的重建出相干声场中脉动球声源在测量面上 的声压响应, 重建误差几乎可以忽略。但是考虑到 所模拟的声场比较简单,随后将目标声源和相干噪 声源分别换成振动球声源和非球形的板声源,目标 声源的重建误差增大,但仍然获得了有效的重建结 果。由重建原理和仿真验证过程可看出,所提方法在 球形声源干扰下的重建效果优于非球形声源干扰下 的重建效果。在实验验证过程中,对全消声室内由双 扬声器产生的相干声场做了重建。实验验证结果表 明:目标声源的声压幅值重建效果精度良好;但由于 实际的声源比仿真声源复杂且存在测量误差,声压 相位的重建精度相对于测量值有所下降;同时,研究 结果也表明在选择全息测量面时,为了减少测量面 过大产生的重建误差,应根据球面谐波函数叠加近 场声全息理论的应用特点,选择比声源面略大的测 量孔径。为了提高信噪比,方法的实施过程中测量面 应放在被测对象的较近处,并努力远离干扰声源。

该方法为测量面两侧的相干声场的重建问题提 供了解决办法,拓宽了复杂环境下声全息方法的应 用范围。下一步将针对具体工程应用中的参数最优化问题开展研究。

参考文献

- Wu S F. Methods for reconstructing acoustic quantities based on acoustic pressure measurements. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008; 124(5): 2680— 2697
- 2 于飞,陈剑,陈心昭.双全息面分离声场技术及其在声全息中的应用.声学学报,2003;28(5):385—389
- 3 李卫兵,陈剑,于飞等.统计最优平面近场声全息原理与声场分 离技术.物理学报,2005;54(3):1253—1260
- 4 Bi CX, Chen X Z, Chen J. Sound field separation technique based on equivalent source method and its application in nearfield acoustic holography. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2008; **123**(3): 1472—1478
- 5 Bi C X, Hu D Y, Xu L et al. Recovery of the free field in noisy environment by using the spherical wave superposition method. Chinese Journal of Acoustics, 2014; 33(1): 42-53
- 6 张海滨,蒋伟康,薛玮飞等.基于 HELS 法的多源相干声场重 建研究.振动与冲击,2008;27(1):93—96
- Jacobsen F, Jaud V. Statistically optimized near field acoustic holography using an array of pressure-velocity probes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2007; 121(3): 1550-1558
- Zhang Y B, Chen X Z, Jacobsen F. A sound field separation technique based on measurements with pressure-velocity probes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2009; 125(6): 3518—3521
- 9 毕传兴,张永斌,徐亮等.基于声压-振速测量的平面近场声全 息实验研究.物理学报,2010;59(2):1108—1115
- 10 王冉, 陈进, 贾文强等. 基于波叠加与统计最优近场声全息的单面声场分离技术. 振动与冲击, 2012; 31(22): 112—117
- 11 Wang Z X, Wu S F. Helmholtz equation least squares method for reconstructing the acoustic pressure field. Journal of the Acoustical Society of America, 1997; 102(4): 2020-2032
- 12 Lu H C, Wu S F. Reconstruction of vibroacoustic responses of a highly nonspherical structure using Helmholtz equation least-squares method. *Journal of the Acoustical Soci*ety of America, 2009; **125**(3): 1538—1548
- 13 Zhao X, Wu S F. Reconstruction of vibroacoustic fields in half-space by using hybrid near-field acoustical holography. Journal of the Acoustical Society of America, 2005; 117(2): 555—565
- 14 于飞,陈剑,毕传兴等.双全息面声场分离技术的实验研究.声
 学学报,2005;30(5):452-456
- 15 陈达亮, 舒歌群, 卫海桥. 近场声全息正则化方法比较. 天津大 学学报, 2008; 41(6): 696—702