

少量测点条件下提高结构法向振速重建精度和分辨率的方法

聂永发^{1,2}, 朱海潮³

(1. 海军潜艇学院作战指挥系, 山东 青岛 266071; 2. 中国人民解放军 92771 部队, 山东 青岛 266404;
3. 船舶振动噪声重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为了解决少量测点条件下利用近场声全息技术重建结构表面法向振速精度和分辨率不高甚至失效的问题, 提出了一种基于声压声辐射模态的全息面插值算法, 可有效提高结构法向振速重建精度和分辨率。计算全息面声压声辐射模态向量; 根据声压声辐射模态收敛性, 求取截断声压声辐射模态展开系数的最小二乘解或 Tikhonov 正则化解, 由此计算出插值点处的声压值; 利用插值后的全息面数据重建结构表面法向振速。简支平板激励仿真和音箱实验均表明, 少量测点条件下利用该方法能够有效提高结构法向振速重建精度和分辨率, 验证了方法的有效性。同时音箱实验验证了方法的可行性。

关键词: 声压声辐射模态; 近场声全息; 重建精度; 插值

中图分类号: O422.6; TB532 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)01-0150-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.01.017

引言

近场声全息 (Near Field Acoustic Holography, NAH) 的概念是 Maynard 等^[1]于 20 世纪 80 年代首次提出, 随后基于边界元法、波叠加法、等效源法、亥姆霍兹方程最小二乘法、分布点源法等^[2-7]方法的 NAH 算法也得到了快速发展。NAH 技术具有识别精度高、定位准确的独特优势, 现已广泛应用于结构振动辐射声场的重构, 噪声源识别定位等领域^[8]。

在利用 NAH 技术分析大型结构时, 为了获得足够的倏逝波信息, 需要足够多的测量点, 以获得更高的精度和分辨率。测量点的增多不仅增加了测量工作量和测量成本, 而且也会对识别精度产生不利影响。因此, 利用尽可能少的测量点声场数据获得较高分辨率的 NAH 图像和足够精度的重建结果, 具有十分重要的意义。数据外推技术^[9]通过在全息面外侧补零并在实空间加窗的方式来扩充全息面并减少边缘处的不连续性。Saijyou 等^[10]通过一种基于空间声场变换的数据外推技术平滑地扩展了全息面外侧的数据, 该方法需要源的先验信息及全息面上声学量的最高波数。Williams 等^[11]引入正则化方法, 基于波数域的空间滤波技术提高了声全息的重建精度, 但同时也指出不能对全息面进行无限的拓

展。Lee 等^[12]通过求解采样-带限矩阵关系的最小二乘解, 克服了传统局部近场声全息方法需要迭代的缺点。Harris 等^[13]基于 Hermite 插值理论, 利用测得的声压和切向振速对全息面进行插值, 提高了 NAH 图像的分辨率和重建精度, 但该方法测量和计算的工作量比较大。徐亮等^[14]提出了一种加权范数外推方法, 该方法同时利用声压信号的波数域带宽和波数谱形状信息获得了优于传统带限外推方法的外推结果, 但算法需要多次的迭代计算。张小正等^[15]提出一种基于波叠加法的插值技术, 该方法通过布置在全息面附近的简单源源强实现对全息面的插值, 从而实现 NAH 图像分辨率的增强, 但算法需要预先确定虚源的位置数量。上述方法都等效地恢复了全息面上丢失的部分空间信息。

本文提出一种基于声压声辐射模态理论的全息面插值算法, 该方法在证明了声辐射模态 (Acoustic Radiation Modes, ARMs) 具有滤波性和收敛性的基础上, 以模态截断的方式, 利用全息面上较少测量值对全息面进行较高精度的插值, 在有效提高全息重建分辨率的同时大大提高了重建精度。该方法物理意义明确, 不需要处理理解的唯一性等问题, 由于利用了声辐射模态的滤波特性, 只滤除了全息面声压的高波数成分, 保留了全部传播波和部分低波数的倏逝波成分, 从而使得全息面插值的精度很高, 即使在

不满足采样定理的条件下,也能获得较高的重建精度,同时该方法可大大减少测量的工作量,并有效节约时间和经济成本,对促进近场声全息工程化应用有实际意义。

1 算法原理

根据声学参量的不同声辐射模态分为振速声辐射模态^[16],声压声辐射模态^[17]和源强密度声辐射模态^[18]。目前,对传统结构表面振速声辐射模态研究得比较深入,而对于声压声辐射模态研究得还远远不够。下面首先给出声压声辐射模态的基本算法,然后讨论其滤波性质和模态截断时的收敛性,最后构建基于该理论的全息面插值算法。

1.1 声压声辐射模态

假设振动结构置于密度为 ρ ,声速为 c 的介质当中,结构的辐射声功率可表示为结构表面的声压和法向振速的离散形式

$$W = \frac{s}{4} [p^T v^* + p^H v] \quad (1)$$

式中 p 和 v 分别为表面声压 p 和法向振速 v_n 的向量形式,分别表示离散单元面积中心的声压和法向振速值;上角标“T”,“H”,“*”分别表示转置、共轭转置和共轭; s 为等面积离散单元的面积,式(1)的推导详见文献[17]。结构表面声压与结构表面法向振速关系为

$$p = Zv \quad (2)$$

式中 Z 为结构表面阻抗矩阵,复杂结构表面阻抗矩阵计算复杂,无法得到解析解形式,但带有无限障板的平板结构表面阻抗矩阵是有确定形式的。将式(2)两侧同时左乘表面阻抗矩阵的逆有

$$v = Z^{-1}p = Yp \quad (3)$$

式中 Y 为表面阻抗矩阵的逆,具有导纳的意义。由互易原理可知表面阻抗矩阵是对称的,联立式(1)和(3)有

$$W = \frac{s}{4} p^H [Y^H + Y] p = p^H G p \quad (4)$$

式中 $G = s \text{Re}(Y)/2$ 。由于矩阵 Z 是良态的,通过直接求逆获得矩阵 Y 在数值计算上并没有任何困难,但由于分析域的截断,导致矩阵 G 的特征向量在计算域的边缘包含有空间高频成分,这种状况在低频尤甚,但在高频时声辐射模态的边缘效应要小得多。为了减小因截断产生的边缘效应影响并增加平滑性,文献[17]通过引入一个惩罚因子 γ 可使矩阵 G 的特征向量在边缘处得到平滑

$$G_\gamma = s \text{Re} \{ [(Y^H Y + \gamma I)^{-1} Y^H]^{-1} \} / 2 \quad (5)$$

式中 I 为单位矩阵, γ 的取值跟频率有关,频率越低 γ 取得越大。对矩阵 G_γ 进行特征值分解

$$G_\gamma = \Phi^T \Lambda \Phi \quad (6)$$

式中 Φ 为声压声辐射模态矩阵。结构表面声压可表示为声辐射模态叠加的形式

$$p = \sum_{i=1}^N \varphi_i \xi_i = \Phi \xi \quad (7)$$

式中 N 为声压声辐射模态阶数,由此得到声压声辐射模态展开系数计算公式为

$$\xi_i = p^T \varphi_i \quad (8)$$

1.2 声压声辐射模态的空间滤波特性及收敛性研究

取一带有无限障板的边长为 0.5 m 正方形简支平板为研究对象,将平板离散为 20×20 等面积单元,利用式(6)可以得到不同频率下平板的 400 阶声辐射模态。图 1 为 380 Hz 时未经正则化处理($\gamma=0$)的平板前 6 阶声压声辐射模态,图 2 为 380 Hz 时经正则化处理($\gamma=0.15$)后平板前 6 阶声压声辐射模态,很明显正则化处理后边缘效应已完全消除。

矩形平板频域的声压声辐射模态可以通过二维傅里叶变换转换到波数域。在较低频率下传播波成分主要集中在前几阶模态,如图 3 所示,即只有前几

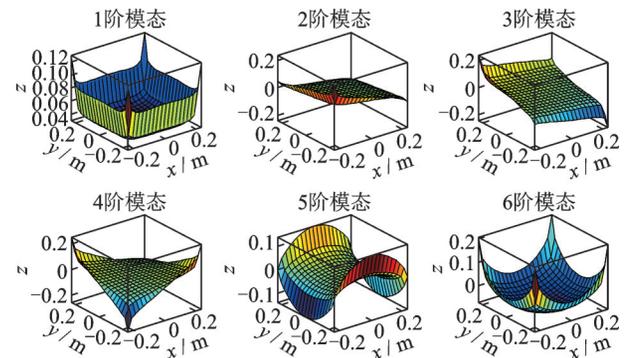


图1 380 Hz 未经正则化处理的平板前 6 阶声压声辐射模态
Fig. 1 The first six pressure ARMs of the plate at 380 Hz without regularization

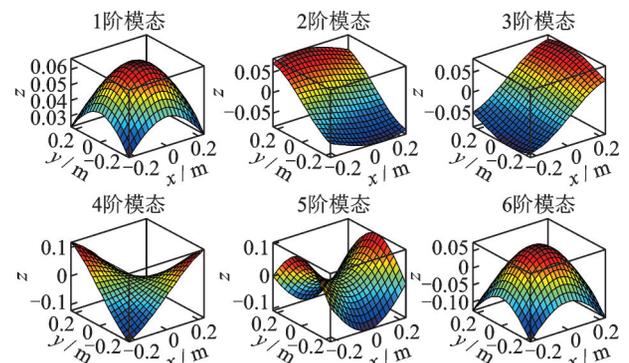


图2 380 Hz 经正则化处理的平板前 6 阶声压声辐射模态
Fig. 2 The first six pressure ARMs of the plate at 380 Hz after regularization

阶的声压声辐射模态对远场声场有贡献,高阶模态包含的主要是倏逝波成分,这些模态主要对近场的声场有作用。因此在低频时平板声压声辐射模态显示了明显的空间滤波特性,声压声辐射模态可以分为传播波模态和倏逝波模态,传播模态中包含有倏逝波的成分,但倏逝波模态几乎不包含有传播波成分。图4显示了平板在不同频率激励时利用模态截断表示的平板表面声压的收敛误差。从图4中可以看出低频时模态截断形式的表面声压收敛速度快,而随着频率的升高收敛速度放缓,因此模态截断形式的表面声压表达式在低频具有更好的适用性。

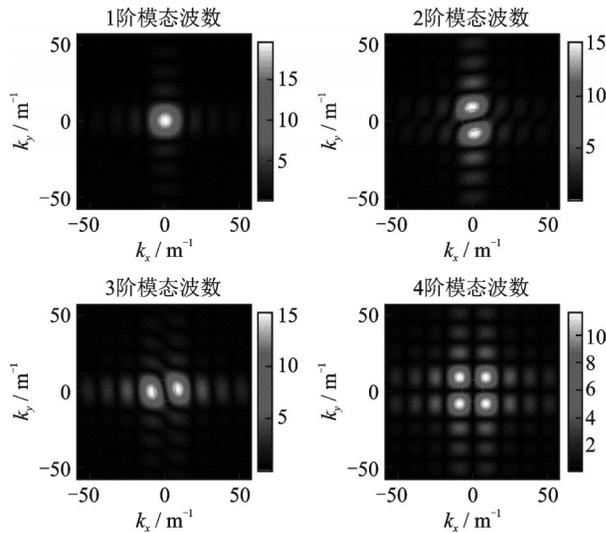


图3 380 Hz前4阶声压声辐射模态对应波数谱

Fig. 3 Wave number spectra corresponding to the first four pressure ARMs of the plate at 380 Hz

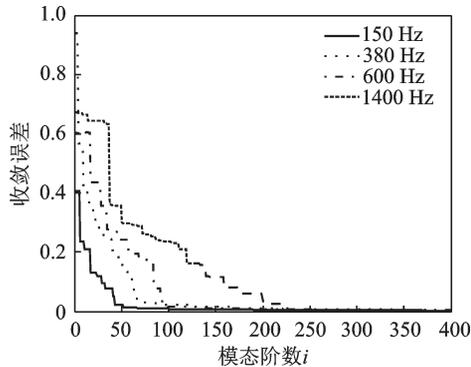


图4 模态叠加形式声压的截断误差

Fig. 4 Truncation error of pressure expressed by superposition of modes

1.3 基于声压声辐射模态的NAH插值技术

利用声压声辐射模态的空间滤波特性,结构表面均分为 N 个单元条件下,结构表面声压的模态截断表示形式为

$$p = \sum_{i=1}^M \varphi_i \xi_i \quad (9)$$

式中 M 为模态截断数, M 的选取与分析频率、结

构的形状、尺寸、材料、激励方式以及能够接受的收敛误差等因素有关, $M < N$ 。因此只要获得了结构前 M 阶的模态展开系数 ξ_i 就可以计算结构表面声压了。由结构表面阻抗可知声压声辐射模态只与结构的形状尺寸和分析频率有关,因此声场中任意测量面都可以看作一假想结构表面,并通过式(6)计算其声压声辐射模态,任意测量面上声压同样可通过式(7)表示。

将全息面看作假想的结构表面,将全息面平均分为若干个单元,其中有任意 N_1 个单元中心的声压是已知的(测量值)。全息面上声压可用式(9)模态截断形式表示,截断阶数 $M \leq N_1$ 。将包含 N_1 个已知点声压元素的方程提出来重新组成一组方程组

$$p' \approx \sum_{i=1}^M \xi_i \varphi_i' = \Phi'_{(N_1 \times M)} \xi_{(M \times 1)} \quad (10)$$

式中 p' 为全息面上已知的 N_1 个单元中心的声压; φ_i' 为声压声辐射模向量 φ_i 中对应 N_1 个单元的元素组成的向量; Φ' 为 M 个向量 φ_i' 组成的矩阵,这里不同向量 φ_i' 间不再正交。将式(10)的两端左乘 Φ' 的伪逆 $(\Phi')^+$ 就可以求得模态展开系数的最小二乘解

$$\xi_{(M \times 1)} = (\Phi')^+_{(M \times N_1)} p' \quad (11)$$

式中 上角标“+”表示伪逆; $(\Phi')^+ = ((\Phi')^H \Phi')^{-1} (\Phi')^H$ 。再将式(11)代入式(9)就得到了全息面声压的近似解,仍用 p 表示有

$$p \approx \Phi_{(N \times M)} (\Phi')^+_{(M \times N_1)} p' \quad (12)$$

式(12)即为利用全息面上少量测点对全息面进行插值的计算公式。由式(11)求解模态展开系数是一个典型的逆问题,由于测量误差不可避免,加之矩阵 Φ' 的条件数通常较大,求解式(11)带有典型“不适定”的特征,必须进行正则化处理才能获得有意义的解。针对不同的问题,正则化方法一般分为直接正则化方法、迭代正则化方法、带二次约束最小二乘法、最大熵正则化方法等^[19]。在声学反问题研究中常用的直接正则化方法有截断奇异值(Truncated Singular Value Decomposition, TSVD)法^[20]和Tikhonov正则化方法^[21]等。目前对于求解不适定性问题,仍没有一个通用的、适合所有模型的方法,只能根据不同的模型采用不同的正则化方法去试验,然后确定一种较好的方法应用于具体的模型^[19]。本文采用Tikhonov正则化方法求解式(11),其Tikhonov正则化解为

$$\xi_R = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + \lambda} \right) \frac{u_i^H \tilde{p}}{\sigma_i} v_i \quad (13)$$

式中 u_i 和 v_i 分别为矩阵 $(\Phi')^+$ 的右奇异向量和左奇异向量, \tilde{p} 为带有噪声的声压测量值, σ_i 为矩阵的从大到小排列的奇异值, λ 为正则化因子,可以通过

L-曲线法或交叉验证等方法得到,本文采用的是L-曲线法。利用少量测点值对全息面进行插值,等效于增加了全息面的测量数据,利用插值后的全息面声压就可以以较高重建精度和图像分辨率重建声压或质点振速值。

2 平板数值仿真研究

以一个四周为无限大障板的简支钢质平板受单点简谐激励产生的声场为数值研究对象。平板的长度、宽度和厚度为 $L_x \times L_y \times h = 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.008 \text{ m}$, 杨氏模量取 $E = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 取泊松比 $\nu = 0.28$, 材料密度 $\rho_0 = 7800 \text{ kg/m}^3$, 空气中声速 $c = 343 \text{ m/s}$ 。全息面与源面的理论值由基于FFT的瑞利积分方法获得^[22]。

分别用频率为 150, 380, 600 和 1400 Hz, 幅值为 1 N 的力激励平板, 选择合适激励点使平板以 (1, 1) 阶、(1, 2) 阶、(2, 2) 阶和 (3, 3) 阶模态振动, 激励点选择在各阶模态振型的波峰或波谷位置。取全息面距平板 0.1 m, 全息面面积取为平板面积的 4 倍, 全息面上均匀分布着的 25×25 个测量点的声压值作为全息面理论值, 在全息面理论值中每隔两个测量点均匀抽取 9 \times 9 个测点构成插值前全息面测量值, 其他测点作为声压插值点, 为了减小声压声辐射模态的边缘效应对插值结果的影响, 可扩展插值点数, 然后再从中截取需要的测量点值作为插值后的最终结果。

首先, 定义误差指标 *Error* 公式如下

$$Error = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |w_r - w_t|^2}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |w_t|^2}} \times 100\% \quad (14)$$

式中 w_r 和 w_t 分别为平板声压或振速重建值和理论值; m, n 分别为测量面上沿长和宽方向的测点编号。

分两种情况讨论利用插值后的全息面声压值重建源面的振速问题, 第一种是当抽取的全息面测量点间距 Δ 满足采样定理的情况, 即 $\Delta < \lambda/2$ (λ 为分析频率下的声波长); 第二种情况是抽取的全息面测量点间距 Δ 违反采样定理的情况, 即 $\Delta > \lambda/2$ 。本文中抽取的全息面测量点间距 $\Delta = 0.125 \text{ m}$, 当激励频率为 380 Hz 时抽取的全息面测量点间距满足采样定理。利用式 (11) 计算模态展开系数时的离散 Picard 图如图 5(a) 所示, 方程不满足离散 Picard 条件, 需要进行正则化处理。利用 L-曲线方法选取正则化参数, 如图 5(b) 所示, 正则化参数为 0.00083662。图 5 中 b 表示平板上已知测点的声压值。图 6 是该频率下全息面理论值、全息面插值前、全息面插值后平板表面法向振速重建图像。计算表

明: 在该频率下插值后全息面的声压值图像的分辨率明显提高, 几乎与全息面上的理论上声压值一致, 全息面声压插值误差仅为 0.95%; 在该频率下未插

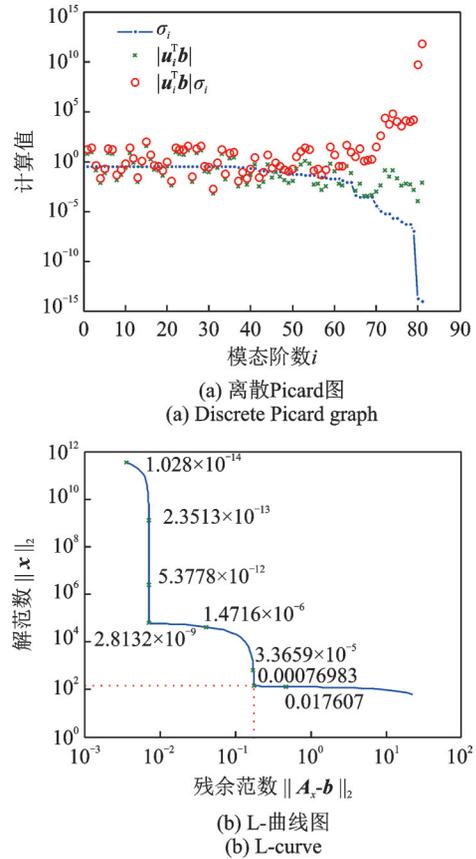
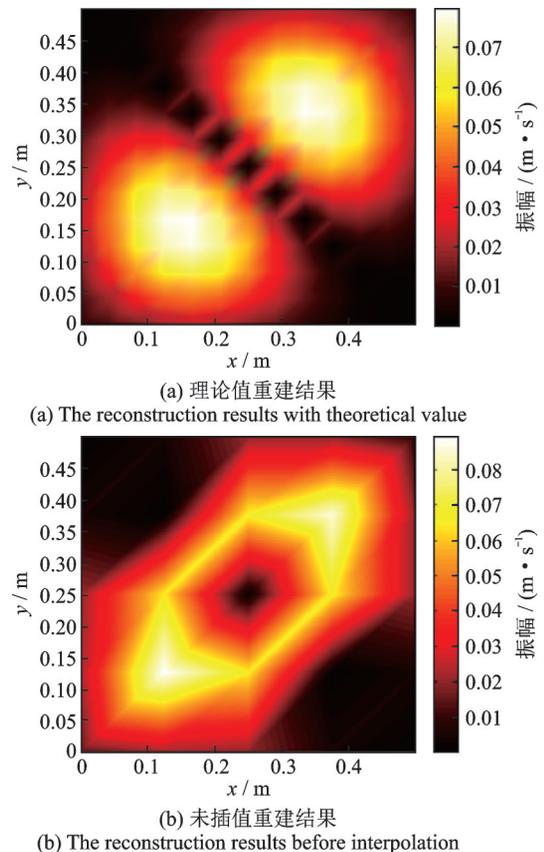
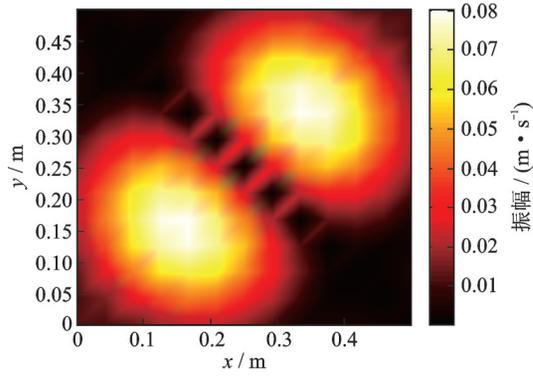


图5 380 Hz时, 离散 Picard 图和 L-曲线图

Fig. 5 Discrete Picard graph and L-curve at 380 Hz



(b) The reconstruction results before interpolation



(c) 插值重建结果

(c) The reconstruction results after interpolation

图6 频率380 Hz时重建面振速幅值

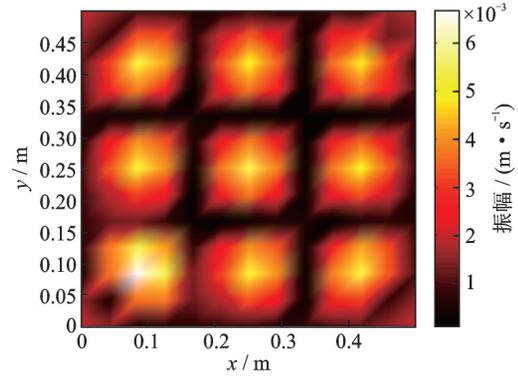
Fig. 6 Normal velocity amplitude on reconstruction plane at 380 Hz

值时重建图像模糊,细节信息丢失严重,与源面理论振速值相比重建误差为49.34%,而插值后的重建图像与理论值重建图像基本一致,与源面理论振速值相比重建误差分别为25.06%和24.57%,显然插值后重建结果不仅大大提高重建图像的分辨率,而且也获得了与理论值重建基本相当的精度,此时两者需要的传声器之比为: $(9 \times 9)/(25 \times 25) = 12.96\%$,减少了约87%的测量点数。

当激励频率为1400 Hz时,抽取的全息面测量点间距违反采样定理,此时平板主要以(3,3)阶模态振动,该模式下的结构表面振动更加复杂,包含更多的高波数成分。利用本文方法对全息面的声压进行插值处理,然后利用插值后的全息面声压值重建源面的振速。利用式(11)计算模态展开系数时不满足离散Picard条件,同样需要进行正则化处理。图7是该频率下全息面理论值、全息面插值前、全息面插值后平板表面法向振速重建图像。计算表明:插值后全息面的声压值与全息面上的理论声压值相比有所差异,全息面声压插值误差为28.36%,造成插值误差大的原因是模态截断的阶数不够多,丢失一些全息面的声压信息。在该频率下未插值的重建图像模糊不清,识别失败,重建误差为172.63%,而插值后的重建图像与理论重建图像比较一致,重建误差分别为57.51%和50.76%,虽然插值误差达到了28.36%,但误差主要是边缘重建声压数据产生的,中间部分声压的插值误差不大,所以重建误差与理论值重建误差相比不大。显然在不满足采样定理条件下,利用本文的方法也可以大大提高重建图像的分辨率和重建精度。

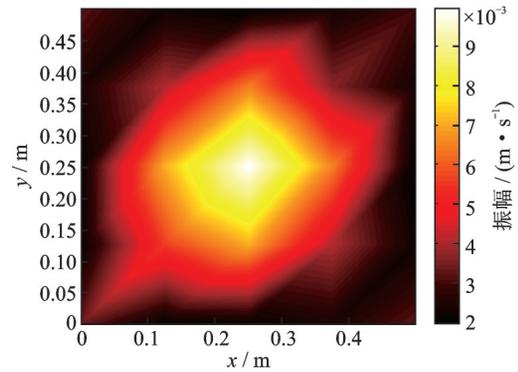
表1给出了4种激励频率下的插值误差,理论值重建误差、插值后重建误差和未插值重建误差。

由表1可以得出:插值误差随频率的增加而增加,当测量间距满足采样定理时,插值误差很小,小于5%;当测量间距违反采样定理时,插值误差比较



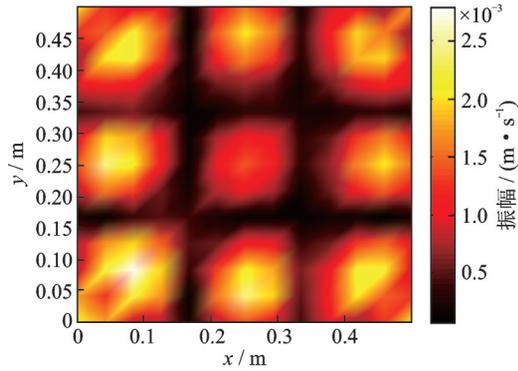
(a) 理论值重建结果

(a) The reconstruction results with theoretical value



(b) 未插值重建结果

(b) The reconstruction results before interpolation



(c) 插值重建结果

(c) The reconstruction results after interpolation

图7 频率1400 Hz时重建面振速幅值

Fig. 7 Normal velocity amplitude on reconstruction plane at 1400 Hz

表1 无噪声条件下4种激励频率下的插值误差和重建误差/%

Tab. 1 Interpolation error and reconstruction error without noise/%

误差	频率/Hz			
	150	380	600	1400
插值误差	0.13	0.95	2.9	28.36
理论值重建误差	28.70	24.57	29.60	50.76
插值重建误差	28.73	25.06	39.79	57.51
未插值重建误差	32.92	49.34	65.10	172.63

大。无论测量间距是否满足采样定理,插值重建误差都比插值前重建误差要小,尤其是随着频率的升

高,插值后的重建精度要比插值前的重建精度高得多,且与理论值重建精度相差不是太大。这充分说明本文方法的有效性。

声压声辐射模态具有的良好滤波和收敛特性是声压声辐射模态全息面插值后 NAH 重建精度的根本保证。声压声辐射模态各阶模态辐射声功率与其对应的特征值平方成正比,如图 8 所示为平板声压声辐射模态所对应的归一化特征值,对于 1400 Hz 的较高频率,也只有前 50 阶模态对辐射功率有贡献,即前 50 阶模态为传播波模态,而剩余的模态都为倏逝波模态,而且随着模态阶数的增大,模态的倏逝波成分的波数越高。高波数的倏逝波成分对 NAH 重建精度有很大影响,本文采用的模态截断方式恰好消除了高波数倏逝波对重建精度的影响。

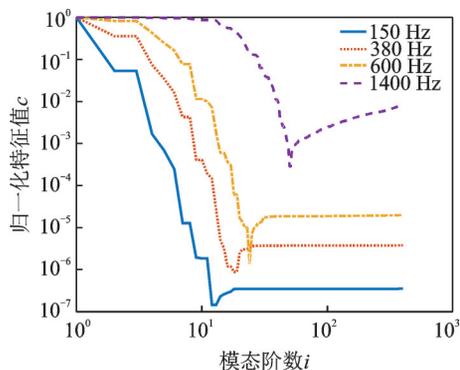


图 8 不同频率下声辐射模态对应的归一化特征值

Fig.8 The normalized eigenvalues of acoustic radiation modes at different frequencies

基于声压声辐射模态全息面插值技术的 NAH 重建精度还取决于插值精度。经计算,收敛误差分别小于 5%,10% 和 20% 所需的最少测点数如表 2 中所示。表 2 中不带括号的数值表示模态截断 M , 括号中的数值表示 N_1 , 即在一定频率和一定收敛误差下所需最少测量点数。由于算例中采用的最少测量点数为 $9 \times 9 = 81$ 个,显然在 150,380 Hz 频率下,从图 4 可以得出收敛误差远小于 5%,因此可以获得同理论值重建精度相当的结果;而在 1400 Hz 条件

表 2 不同收敛误差条件下的最少测点数

Tab.2 The minimum number of measurement points at different convergence error

收敛误差	频率/Hz			
	150	380	600	1400
<5%	43	64	92	200
	(49)	(64)	(100)	(225)
<10%	29	61	84	159
	(36)	(64)	(100)	(169)
<20%	17	46	58	119
	(25)	(49)	(64)	(121)

下,81 个测点对应收敛误差为 25.83%,插值误差为 28.36%,但重建误差只比理论重建误差高 7% 不到,而未插值重建基本失效,这正是因为声压声辐射模态的滤波和收敛特性的双重结果,滤波特性使模态截断过滤掉了影响 NAH 重建精度的高波数倏逝波成分,而收敛性却保留了全部的传播波成分和大部分低波数倏逝波成分。因此,所提出的基于声压声辐射模态全息面插值方法能够利用较少的测点实现较高精度的 NAH 重建。

为了检验算法的稳健性,在理论测量声压中加入了均值为 0,方差为 σ^2 的白噪声,模拟实际测量阵列系统中存在的各种噪声和误差。表 3 列出了加入高斯白噪声后,信噪比为 10 dB 时,4 种激励频率下的插值误差、理论值重建误差、插值后重建误差和未插值的重建误差。

表 3 信噪比为 10 dB 条件下的插值误差和重建误差/%

Tab.3 Interpolation error and reconstruction error with SNR being 10 dB/%

误差	频率/Hz			
	150	380	600	1400
插值误差	9.45	8.79	9.35	34.19
理论值重建误差	60.12	31.38	36.25	52.23
插值重建误差	66.33	33.43	41.20	56.83
未插值重建误差	78.19	59.60	71.68	188.15

对比表 1 和 3 的结果可以发现,基于声压声辐射模态的插值技术不会将误差放大,插值后的重建面上的振速重建精度仍然获得了显著的提高。因此证明本文方法在存在测量噪声的条件下也可取得较好效果,尤其是在中高频段具有较好的噪声鲁棒性,可以应用到实际的工程中。

3 音箱实验验证

实验是在空旷的厂房中完成的,图 9(a)所示为实验示意图。整个实验系统由音箱声源、信号发生器、信号采集装置等部分组成。实验测量采集装置以 NI 公司的 PXI 为平台,传声器采用声望公司的 MPA416 阵列传声器,数据采集卡采用 NI 的 PXI-4498 模块,是一款专为高通道数的声音和振动应用而设计的高精度数据采集模块,运动控制卡采用包括 16 位精确度的 8 通道模拟输入和 64 位的数字输出的 NI 的 PXI-7350 模块,平面声学扫描装置为船舶振动噪声重点实验室自行设计,如图 9(b)所示。实验中,由 pulse 软件设置信号频率分别为 50,100 和 200 Hz,经数据采集仪产生、功率放大器处理后传输

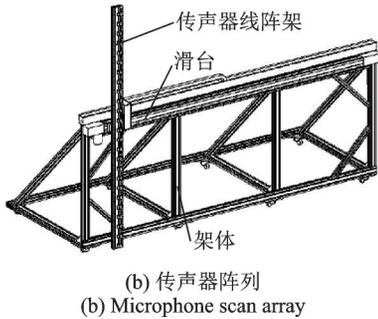
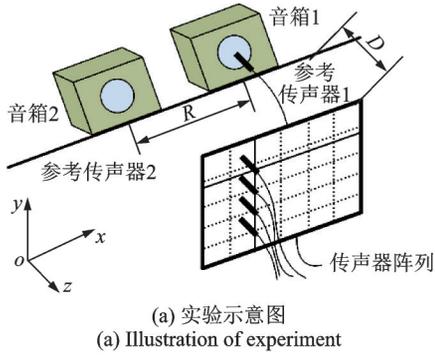


图9 实验及传声器阵列示意图

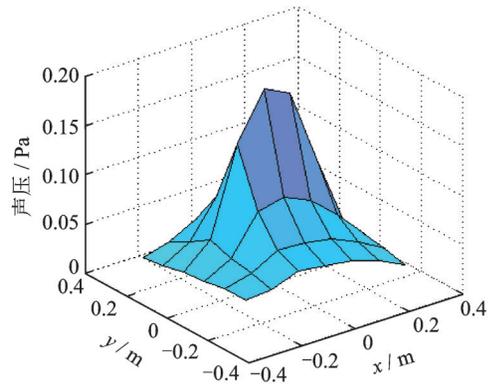
Fig. 9 Illustration of experiment and microphone scan array

到音箱使之发声。在不失真的情况下,尽量增大音箱的声压强度。声场中布置的参考传声器保持不动,传声器阵列上的11个测量传感器阵列沿着滑轨在全息面横向网格上逐次测量,为保证测点不受移动过程中产生的轻微晃动对测量准确性的影响,测量传感器在到达测点位置处停留5 s后开始测量。采样频率为2048 Hz,每次采样时长为5 s,各个测点复声压利用单参考源传递函数法计算得到。全息面大小为60 cm(x 向,即水平方向) \times 50 cm(y 向,即垂直方向),测量网格点数为 13×11 ,两个方向上的传声器之间的间距均为5 cm,参考传声器的数目为3个,其中两个分别贴近音箱纸盆,另一个布置在线阵架后中央,全息面距离音箱纸盆7 cm,既保证可以获得足够的声压信息,又可以减少噪声的干扰。取重建源面的面积与全息面相等,从测量的声压数据中间隔一个传声器均匀抽取 7×6 个数据作为插值前的全息面测量数据,利用本文方法对全息面进行插值。

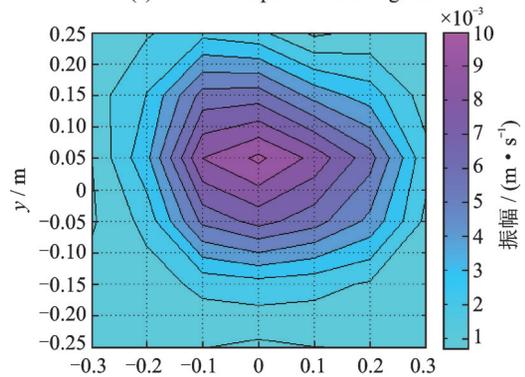
图10(a),11(a)和12(a)分别为声音频率为100 Hz时,未插值时全息面上的测量值,插值后全息面上的测量值,全息面上的实际测量值。对比图10(a)和12(a)可以发现未插值的全息面因为传声器的间隔较大丢失了大量的空间细节信息;对比图11(a)和12(a)可以发现利用本文插值方法得到的全息面测量值部分恢复了因为传声器间隔过大而丢失的空间细节信息,插值后的全息面声压值与实际测量值相比插值误差为15.26%。50 Hz时的插值误差为19.90%,200 Hz时的插值误差为11.08%。由于实验条件限制,不可避免地受到干扰噪声的影响,如

在消声室条件下,插值误差应该可以更小。

图10(b),11(b)和12(b)分别为声音频率为100 Hz时,未插值的源面重建法向振速,插值后源面重建法向振速和实际测量值重建的源面法向振速,对比可以发现:利用未插值的全息面声压数据重建无法识别出两个音箱的位置,而利用插值后的全息面声压数据可以清楚地识别出两个音箱的位置,与实际音箱位置一致,在幅值上也与实际测量值的重建结果基本一致,误差为25.92%。在其他几个频率的实验结果与100 Hz时的实验结果相类似,音箱实验说明了本文方法在实际噪声源识别中有效性和可行性。



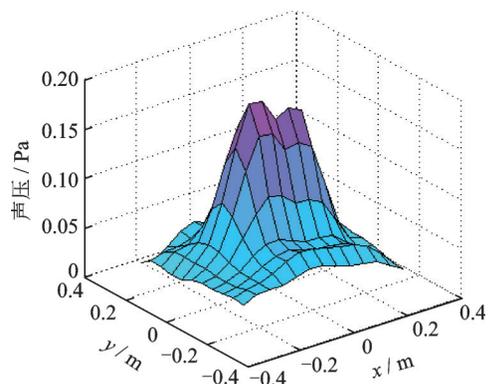
(a) 全息面声压幅值
(a) Pressure amplitude on hologram



(b) 重建面振速幅值
(b) Normal reconstruction velocity amplitude

图10 未插值时的全息面声压幅值和重建面振速幅值

Fig. 10 Pressure amplitude on hologram and normal reconstruction velocity amplitude before interpolation at 100 Hz



(a) 全息面声压幅值
(a) Pressure amplitude on hologram

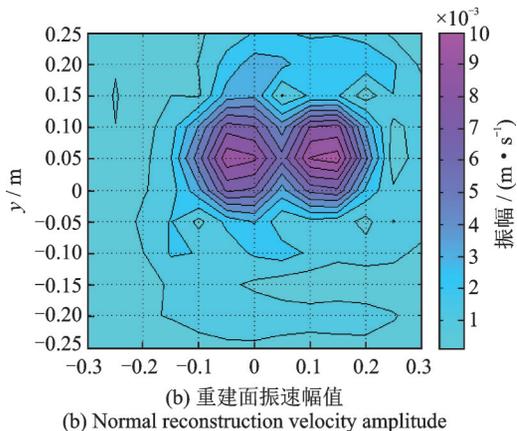


图11 插值后全息面声压幅值和重建面振速幅值

Fig. 11 Pressure amplitude on hologram and normal reconstruction velocity amplitude after interpolation at 100 Hz

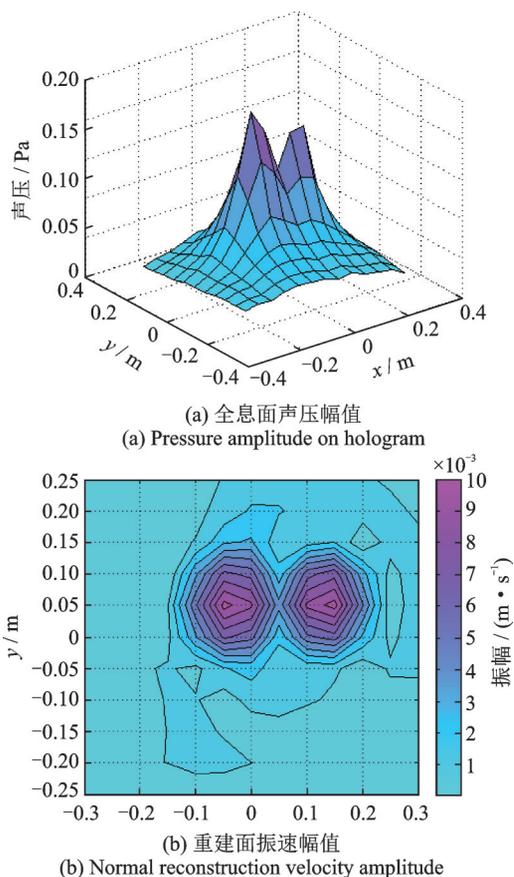


图12 全息面实测声压幅值和重建面振速幅值

Fig. 12 Theoretical measurement pressure amplitude on hologram and normal reconstruction velocity amplitude at 100 Hz

4 结论

将频域声压声辐射模态转换到波数域后,研究发现声压声辐射模态具有空间滤波特性,且在中低频用声压声辐射模态叠加形式表示的全息面声压具有较好的收敛性,频率越低收敛性越好,即利用前几

阶的模态叠加就能达到很高的精度。利用声压声辐射模态在波数域的滤波特性,提出了一种基于声压声辐射模态的全息面插值算法。该算法可利用较少的实际测量声压数据通过全息插值有效提高重建源面法向振速的重建精度和分辨率,并可简化测量过程,节约测量成本。研究表明该算法在满足采样定理条件下,插值误差非常小,重建精度和分辨率与理论重建相当;在违反采样定理条件下,虽然插值误差增大,但其重建精度与理论重建精度相比下降不是太多,远远高于插值前的重建精度和分辨率。矩形平板仿真结果表明了该方法的有效性,音箱实验表明了该方法在实际工程应用中的可行性。该算法只需要全息面的部分声压信息,不需要源的先验信息和处理虚拟源等问题,原理简单,计算方便,更适用于实际的工程应用。

致谢 感谢船舶振动噪声重点实验室在实验场所和器材上给予的保障,感谢毛荣富博士在实验方面给予的指导,感谢郭亮和苏俊博在实验过程中给予的帮助。

参考文献:

- [1] Maynard J D, Williams E G, Lee Y. Near field acoustic holography I. Theory of generalized holography and the development of NAH [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1985, 78(4):1395-1413.
- [2] Koopmann G H, Song L, Fahline J B. A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 86(6): 2433-2438.
- [3] Lu H C, Wu S F. Reconstruction of vibro-acoustic responses of a highly non-spherical structure using Helmholtz equation least squares method [J]. J. Acoust. Soc. Am., 2009, 125 (3):1538-1548.
- [4] 张海滨,蒋伟康,万泉.基于边界元法的循环平稳近场声全息理论研究 [J].声学学报, 2008, 33(3): 231-237.
Zhang Haibing, Jiang Weikang, Wan Quan. Research on the cyclostationary nearfield acoustic holography based on boundary element method [J]. Acta Acustica, 2008, 33(3): 231-237.
- [5] 陈志敏,朱海潮,毛荣富,等.循环谱密度组合切片分析在近场声全息中的应用研究 [J].声学学报, 2012, 37(2):164-169.
Chen Zhimin, Zhu Haichao, Mao Rongfu, et al. Application of cyclic spectral density gathering slice method to the near-field acoustic holography [J]. Acta Acustica, 2012, 37(2):164-169.
- [6] Wu S F, Lu H C, Bajwa M S. Reconstruction of transient acoustic radiation from a sphere [J]. J. Acoust. Soc. Am., 2005, 117(4):2065-2077.
- [7] 杨殿阁,郑四发,罗禹贡,等.运动声源的声全息识别方法 [J].声学学报, 2002, 27(4):357-362.

- Yang Diange, Zheng Sifa, Luo Yugong, et al. Acoustic holography method for the identification of moving sound source[J]. *Acta Acustica*, 2002, 27(4):357-362.
- [8] 鲁文波, 蒋伟康, 潘思伟, 等. 基于近场声全息声像图纹理特征的机械故障诊断方法[J]. *振动工程学报*, 2013, 26(4):617-623.
- Lu Wenbo, Jiang Weikang, Pan Siwei, et al. Mechanical fault diagnosis based on texture features of acoustic images by near-field acoustic holography[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2013, 26(4):617-623.
- [9] Kwon H S, Kim Y H. Minimization of bias error due to windows in planar acoustic using a minimum error window[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, 98(4):2104-2111.
- [10] Saijyou K, Yoshikawa S. Reduction methods of the reconstruction error for large-scale implementation of near-field acoustical holography [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2001, 110(4):2007-2023.
- [11] Williams E G, Houston B H, Herdic P C. Fast Fourier transform and singular value decomposition formulations for patch nearfield acoustical holography [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003, 114(3):1322-1333.
- [12] Lee M, Bolton J S. Reconstruction of source distributions from sound pressures measured over discontinuous regions: Multipatch holography and interpolation[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, 121(4):2086-2096.
- [13] Harris M C, Blotter J D, Sommerfeldt S D. Obtaining the complex pressure field at the hologram surface for use in near-field acoustical holography when pressure and in plane velocities are measured[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2006, 119(2):808-816.
- [14] 徐 亮, 毕传兴, 王 慧, 等. 全息声压场的加权范数外推方法[J], *物理学报*, 2011, 60(11): 114304.
- Xu Liang, Bi Chuanxing, Wang Hui, et al. Hologram pressure field weighted norm extrapolation method[J]. *Acta Phycica Sinica*, 2011, 60(11): 114304.
- [15] 张小正, 毕传兴, 徐 亮, 等. 基于波叠加法的近场声全息空间分辨率增强方法[J], *物理学报*, 2010, 59(8), 5564-5571.
- Zhang Xiaozheng, Bi Chuanxing, Xu Liang, et al. Resolution enhancement of nearfield acoustic holography by the wave superposition approach[J]. *Acta Phycica Sinica*, 2010, 59(8): 5564-5571 .
- [16] 姜 哲. 声辐射问题中的模态分析: I. 理论[J]. *声学学报*, 2004, 29(4):343-378.
- Jiang Zhe. A modal analysis for the acoustic radiation problems: I . Theory[J]. *Acta Acustica*, 2004, 29(4): 343-378.
- [17] Berkhoff A P. Sensor scheme design for active structural acoustic control[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000, 108(3):1037-1045.
- [18] 聂永发, 朱海潮. 利用源强声辐射模态识别噪声源[J]. *振动工程学报*, 2014, 27(4):539-546.
- Nie Yongfa, Zhu Haichao. The method of identification of the planar noise source based on source strength acoustic radiation modes[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2014, 27(4):539-546.
- [19] Hansen P C. Regularization tools: A Matlab package for analysis and solution of discrete ill-posed problems [J]. *Numerical Algorithms*, 1994, 6:189-194.
- [20] Hansen P C, Sekii T, Shibahashi H. The modified truncated SVD method for regularization in general form [J]. *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, 1992, 13(5):1142-1150.
- [21] Rezaghi M, Hosseini S M. A new variant of L-curve for Tikhonov regularization [J]. *Journal of Computational & Applied Mathematics*, 2009, 231(2):914-924.
- [22] Williams E G, Maynard J D. Numerical evaluation of the rayleigh integral for planar radiators using the FFT [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, 72(6): 2020-2030.

Method of improving accuracy and spatial resolution of structure normal velocity reconstruction with a small amount of measurement points

NIE Yong-fa^{1,2}, ZHU Hai-chao³

(1.Department of Operation Command, Navy Submarine College, Qingdao 266071, China; 2.No.92771 Troop, PLA, Qingdao 266404, China; 3.National Key Laboratory on Ship Vibration & Noise, Wuhan 430033, China)

Abstract: Under condition of a small amount of measured pressure data, to solve the problem of low structure surface normal velocity reconstruction accuracy and resolution or even reconstruction failure using near field acoustic holography technology, a holographic surface interpolation algorithm based on the acoustic radiation modes that can effectively improve the structure normal velocity reconstruction accuracy and resolution is proposed. Firstly, the acoustic radiation modal vectors of holographic surface are calculated; Then, according to the convergence of pressure acoustic radiation modes, the least square solution or Tikhonov regularization solution of the truncated expansion coefficient of pressure radiation modes is obtained, and the pressure values of the interpolated point can be calculated; Finally, the structure surface normal velocity is reconstructed by the interpolated hologram data. Both the simple supported plate simulation and the speaker experiment show that the proposed method can effectively improve the reconstruction accuracy and resolution of the normal velocity of the structure surface with a small quantity of known pressure values, and the effectiveness of the proposed method is verified. Meanwhile, the feasibility of the method is verified by the speaker experiment.

Key words: pressure acoustic radiation modes; near-field holography; reconstruction accuracy; interpolation

作者简介: 聂永发(1978-),男,博士后,工程师。电话:13591749733;E-mail:Yongfnie@163.com