

文章编号: 1000-8055(2023)02-0394-14

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210431

不同插值方法对残缺环阵声源定位的影响

李梦璇^{1,4}, 杨明绥², 马 威^{3,4}

- (1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;
2. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015;
3. 上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240;
4. 上海交通大学 燃气轮机与民用航空发动机教育部工程研究中心, 上海 200240)

摘 要: 研究了利用不完整麦克风阵列进行声源定位的算法, 通过修正傅里叶插值、B 样条插值和三次样条插值对残缺麦克风阵列的交叉互谱矩阵的插值补偿, 获得了声源定位算法。通过数值模拟对声源定位算法进行了验证, 发现在波束形成的声源强度上, 傅里叶插值模拟结果最大偏差达到 5.21 dB, B 样条插值为 1.17 dB, 三次样条插值为 0.80 dB; 在声源位置偏差上, 傅里叶插值为 0.04 m, B 样条插值为 0.01 m, 三次样条插值为 0.01 m。结果表明傅里叶插值计算得到的声源定位的强度、位置精度和动态性能最差, 三次样条插值最优, B 样条插值表现一般。实验验证也得出类似的结论, 因此利用三次样条插值计算不完整麦克风阵列的交叉互谱矩阵最佳。

关 键 词: 波束成形; 残缺麦克风阵列; 旋转声源; 声源定位; 虚拟旋转阵列

中图分类号: V211.71

文献标志码: A

Influence of different interpolation methods on sound source localization of incomplete microphone array

LI Mengxuan^{1,4}, YANG Mingsui², MA Wei^{3,4}

- (1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shenyang Engine Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;
3. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
4. Engineering Research Center of Gas Turbine and Civil Aero Engine,
Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The sound source localization algorithm using incomplete microphone arrays was studied, and the sound source localization algorithm was obtained through interpolation compensation of the cross spectral matrix of the incomplete microphone array by modified Fourier interpolation, B-spline interpolation and cubic spline interpolation. The sound source localization algorithm was verified by numerical simulation, and it was found that the maximum deviation of the Fourier interpolation simulation result was 5.21 dB, the B-spline interpolation was 1.17 dB, and the cubic spline interpolation was 0.80 dB on the beamforming sound source intensity; in the sound source position deviation, the Fourier interpolation value was 0.04 m, the B-spline interpolation value was 0.01 m, and the cubic spline

收稿日期: 2021-08-10

基金项目: 国家科技重大专项(2017-II-003-0015)

作者简介: 李梦璇(1995—), 女, 硕士生, 主要从事噪声测量研究。

通信作者: 马威(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事气动噪声测量研究。E-mail: mawei@sjtu.edu.cn

引用格式: 李梦璇, 杨明绥, 马威. 不同插值方法对残缺环阵声源定位的影响[J]. 航空动力学报, 2023, 38(2): 394-407. LI Mengxuan, YANG Mingsui, MA Wei. Influence of different interpolation methods on sound source localization of incomplete microphone array[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(2): 394-407.

interpolation value was 0.01 m. The results showed that the intensity, position accuracy and dynamic performance of the sound source localization calculated by Fourier interpolation were the worst, the cubic spline interpolation was the best, and the B-spline interpolation had the average performance. Experimental verification has also reached a similar conclusion, so it is best to use cubic spline interpolation to calculate the cross spectral matrix of an incomplete microphone array.

Keywords: beamforming; incomplete microphone array; rotating sound source; sound source localization; virtual rotating array

飞机噪声问题是目前航空界普遍关心的问题之一。飞机的主要噪声源是航空发动机气动噪声,其中风扇噪声是其重要的组成部分,因此对风扇的去噪工作显得格外重要。风扇噪声属于旋转噪声^[1],利用麦克风阵列进行旋转声源定位从而达到减噪也成为了研究的热点。在工程和实验中利用麦克风阵列获得声源声压的信息,经过算法处理得到扫描网格上的声源位置和强度分布从而重现声源^[2]。目前,学术界广泛应用基于波束成形的定位算法进行声源定位^[3],自由场旋转波束成形技术大致可以分为两类:时域法和频域法。时域波束成形(rotating source identifier, ROSI)是由 Sijtsma 等^[4]率先提出的,并由莫品西^[5]将其进一步完善。因为时域波束成形不能与反卷积技术如 DAMAS^[6](deconvolution approach for the mapping of acoustic sources)和 Clean-SC^[7](clean for spatial source coherence)等结合进一步提高声源的分辨率。所以 Pannert 和 Maier^[8]提出频域波束成形技术(virtual rotating acoustic, VRA)。它的核心是构建一个虚拟的和声源同步旋转的旋转框架,来让旋转声源与环形麦克风阵列之间达到一种相对静止,从而去除多普勒效应。其中虚拟旋转框架的构造是利用静止的麦克风获得的声压经过一系列的插值得到的。因为 VRA 算法可以与反卷积算法相结合并且计算时间比 ROSI 短,所以被广泛应用,本文也是利用该算法进行研究。

根据 Lowis 和 Joseph^[9-11]的工作,可以采用基于模态分解的真实静止的麦克风声压来计算 VRA 麦克风处的声压简称为 MD 方法。Herold 和 Saradj^[12-13]提出基于线性插值从实际相邻固定麦克风的声压来计算虚拟麦克风的声压简称为 LI 方法。Herold 等^[12]进一步得到了模态分解和线性插值都能进行声源定位的结论,但没有进行严格的数学证明。Ma 等^[14]证明了 MD 方法的实质是傅里叶插值,并在数学推导中证明了 MD 方法和 LI 线性插值方法两者是一致的。这为采用更加精确的插值方式构造交叉互谱矩阵打下了良好的

基础。在 VRA 算法中运用各种插值方法的前提都是麦克风阵列与旋转声源正对心放置。2020 年 Ma 等^[15-16]发现了 ROSI 算法并不能实现麦克风阵列在任意位置上去除多普勒,进行正确的旋转声源定位。只有当麦克风阵列的中心与旋转声源的中心对称时才能实现完全的去多普勒化。因此无论是 ROSI 算法还是 VRA 算法都必须保证麦克风阵列与声源旋转中心正对心放置。

Zhou 等^[17]研究了环形麦克风阵列的直径与数量对旋转声源定位的影响,得出麦克风阵列的直径与旋转声源的直径比接近于 1 时,声源定位有更好的动态范围和分辨率,因此在进行旋转声源定位时麦克风的阵列尺寸要尽量与声源尺寸相近。当遇到大直径声源时,比如大型螺旋桨旋转声源的定位,李晓东等^[18]选择缩比为 1/3 的模型来做实验。这种方法虽然简单,但是面对结构、工程实验条件比较复杂不好模拟的情况时就会受到局限。伍岳等^[19]在进行风力机旋转声源定位时,考虑到阵列结构的稳定性、来流影响和阵列高度的限制,将麦克风放在了地面。这时如果对阵列的相对位置不加优化,就会产生虚假声源。在工程实际中面对风力机、航空发动机的风扇等大型高速旋转的机械部件,麦克风阵列在对心位置时无法安装完整,对于不完整麦克风阵列对旋转声源定位的影响,目前学术界并没有给出一个比较明确的结论。麦克风阵列无法安装完整情况下的不完整麦克风阵列如何对声源进行定位,以及对声源性能的影响就需要进一步研究。

本文通过对完整麦克风阵列定位旋转声源算法进行改进使之可以利用傅里叶插值、B 样条插值和三次样条插值计算交叉互谱矩阵(cross spectral matrix, CSM),完成不完整麦克风阵列对声源的定位,得到以奇数 1、3、5、7 依次从下往上去除麦克风对声源定位的强度、位置、空间分辨率和动态性能的影响,并得出哪种插值方法更加适用的结论。

1 不完整麦克风阵列声源定位的误差分析

1.1 麦克风去除方式

当麦克风阵列的直径过大,超过阵列中心到地面距离的两倍时,环形麦克风阵列下方的麦克风就无法安装。如图 1 所示,本文以垂直于地面的环形阵列对称轴为中心,按照 1、2、3、4 的顺序从下往上依次去掉麦克风,去除麦克风的个数设为 α 。

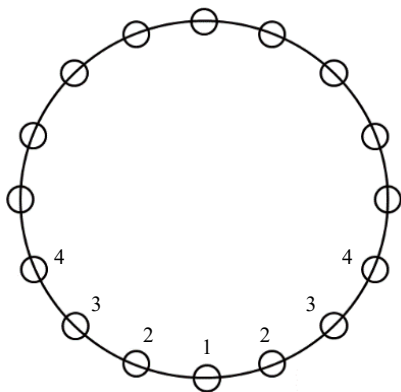


图 1 不完整麦克风阵列

Fig. 1 Incomplete microphone array

1.2 误差分析方法

当麦克风数目减少时,由声压插值得到的 CSM 就会不精准,此时就要采用更加精确的插值方法^[20]。本文采用以傅里叶插值、三次样条插值、B 样条插值在完整麦克风阵列时的计算结果作为参考,麦克风阵列不完整时 3 种插值方式计算 CSM 从而获得波束成形的声源定位结果的误差进行讨论。本文采用数值模拟和实验的方法进行分析。

误差分析流程如图 2 所示。误差分析一共分为 5 步,第 1 步设置不缺少麦克风和缺少 α 个麦克风时各自的阵列坐标,分别计算傅里叶插值得到的 CSM。第 2 步设置不缺少麦克风和缺少 α 个麦克风时各自的阵列坐标,分别计算 B 样条插值得到的 CSM。第 3 步设置不缺少麦克风和缺少 α 个麦克风时各自的阵列坐标,分别计算三次样条插值得到的 CSM。第 4 步分别计算不缺少麦克风和缺少 α 个麦克风时的导向矢量。第 5 步得到 3 种插值各自在完整麦克风阵列和不完整麦克风阵列下的波束形成结果,将结果进行对比,得到误差分析。

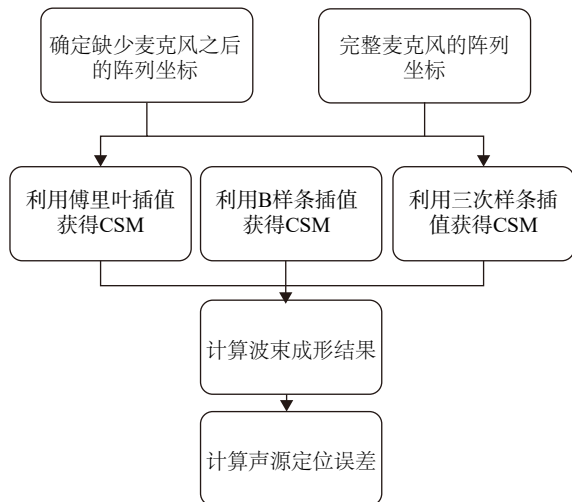


图 2 误差分析流程

Fig. 2 Error analysis process

1.3 数值模拟和实验参数设置

其中数值模拟的信息如表 1 所示。

为进一步验证本文对缺失麦克风时算法的工程应用性,在上海交通大学航空发动机研究院的消声室中进行了实验验证,整个实验是在半消声室环境下进行的。实验装置如图 3 所示,两个固定在旋转绝缘板上的可播放白噪声的蓝牙音箱生成旋转声源。两只蓝牙音箱的中心距为 0.76 m。用扎带将它们固定在黄色的绝缘板上并由电动机驱动按逆时针 800 r/min 的速度进行旋转,直流电动机功率为 500 W,电动机转速可由电动机驱动器精确控制。数据采集机箱型号为 NI PXle-1082,采集板卡为 NI PXle-4499。孔径为 0.80 m 的环形麦克风阵列上布置 40 个等间距分布的麦克风传

表 1 声源位置和强度设置

Table 1 Sound source localization and intensity settings

参数	数值及说明
麦克风总数	40
网格点总数	61×61
扫描平面边长/m	0.50
阵列孔径/m	0.50
阵列到扫描平面距离/m	1.0
声源转速/(r/min)	1 500
转向	顺时针
声源信号	白噪声
采样频率/kHz	48
采样时间/s	10
声源旋转半径/m	0.35
傅里叶分块	1 024
傅里叶重叠度/%	50

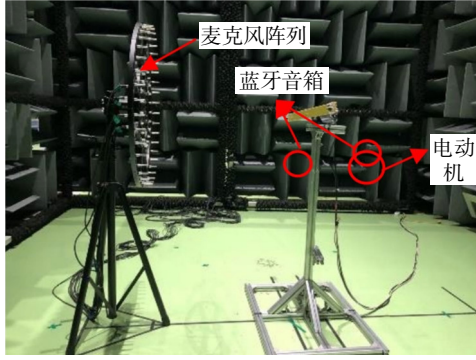


图3 实验装置

Fig. 3 Experiment setup

感器, 麦克风型号为 BK-4958。声源旋转平面距离麦克风阵列平面 1.00 m, 数据采样频率为 25.6 kHz, 采样时长为 10 s, 扫描平面上的网格尺寸为 0.02 m,

扫描平面长度为 1.00 m。

1.4 算法原理

如图 4 所示, 将麦克风阵列完整时的麦克风总数记为 M , 在阵列中麦克风的球坐标矢量为 $X_m = (r_{xm}, \varphi_{xm}, \theta_{xm})$, 其中麦克风缺少个数 α 和麦克风编号 m 的取值分别为 $\alpha = 0, 1, 3, 5, 7; m = 1, 2, \dots, \frac{M-\alpha+1}{2}, \frac{M+\alpha+3}{2}, \dots, M$ 。

记扫描平面上的网格点总数为 S , 则平面上网格点的球坐标矢量 $y_s = (r_{ys}, \varphi_{ys}, \theta_{ys})$, 其中 $s = 1, 2, \dots, S$ 。

设声源的旋转角频率为 Ω , 频率为 ω ^[21]。当麦克风阵列完整时 α 为 0, 阵列不完整时 α 可分别取 1、3、5、7。

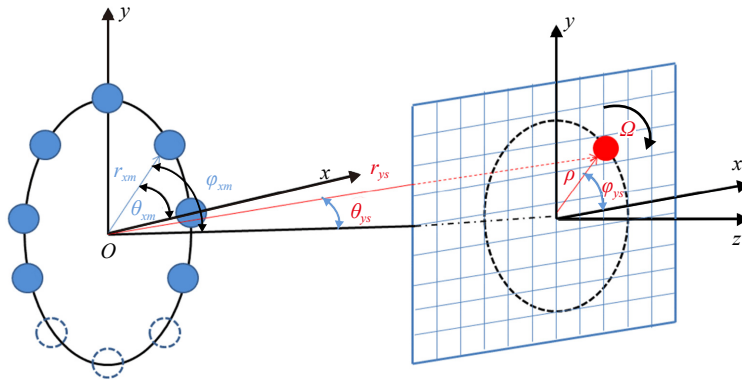


图4 算法原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of algorithm principle

1.4.1 由傅里叶插值方法得到 CSM

利用傅里叶插值得到虚拟声压的步骤如下:

1) 确定去除麦克风之后剩余麦克风的角 φ_{xm}

$$\varphi_{xm} = -m \frac{2\pi}{M} + \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

2) 将时域麦克风声压 p_{m_0} 进行傅里叶展开

$$p_{m_0}(t_n) = \sum_{m=1}^{M-\alpha} p(m, t_n) e^{im_0 \varphi_{xm}} \quad (2)$$

式中 t_n 为时刻, n 的取值为 $n=1, \dots, N_s$, N_s 是采样时刻。

展开项 m_0 范围为

$$-\frac{M-\alpha}{2} + 1 \leq m_0 \leq \frac{M-\alpha}{2}$$

在 t_n 时刻, 第 m 号麦克风旋转了 Ωt_n , 即第 m 号虚拟麦克风的相位角为 Ωt_n

$$\varphi_{xm}^{\Omega} = \varphi_{xm} - \Omega t_n \quad (3)$$

3) 进行傅里叶插值

利用式(3)中虚拟麦克风的相位角, 构造傅里叶插值因子 $\frac{1}{M} e^{im_0 \varphi_{xm}^{\Omega}}$, 通过插值可得 t_n 时刻第 m 号虚拟旋转麦克风的时域声压 $p_{\Omega}(m, t_n)$

$$p_{\Omega}(m, t_n) = \sum_{m_0=-\frac{M-\alpha}{2}+1}^{\frac{M-\alpha}{2}} p_{m_0}(t_n) \frac{e^{im_0 \varphi_{xm}^{\Omega}}}{M-\alpha} \quad (4)$$

将式(1)~式(3)代入式(4)可得

$$p_{\Omega}(m, t_n) = \frac{1}{M} \sum_{m_0=-\frac{M-\alpha}{2}+1}^{\frac{M-\alpha}{2}} \left[\sum_{m=1}^{M-\alpha} p(m, t_n) e^{-im_0 \varphi_{xm}} \right] e^{im_0 \varphi_{xm}^{\Omega}} = \frac{1}{M} \sum_{m_0=-\frac{M-\alpha}{2}+1}^{\frac{M-\alpha}{2}} \left[\sum_{m=1}^{M-\alpha} p(m, t_n) e^{-im_0 \varphi_{xm}} \right] e^{im_0 \varphi_{xm}} e^{-im_0 \Omega t_n} \quad (5)$$

将时域声压转化到频域, 并计算交叉互谱矩阵 $C_{\Omega} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 。

$$p_{\Omega} = \frac{e^{-i\Omega t_n}}{M} \sum_{n=1}^{N_s} \sum_{m_0=\frac{M-\alpha}{2}+1}^{\frac{M-\alpha}{2}} \sum_{m=1}^{M-\alpha} p e^{-im_0\varphi_{xm}} e^{im_0(\varphi_{xm}-\Omega t_n)} \quad (6)$$

1.4.2 由B样条插值和三次样条插值得到的CSM

利用 B 样条插值和三次样条插值方法得到虚拟声压的步骤如下:

1) 确定去除麦克风之后剩余麦克风的角速度 φ , 并按顺时针对麦克风进行编号如式(1)所示。

剩余麦克风的角速度构成的矩阵 φ

$$\varphi = [\varphi_{x_1}, \dots, \varphi_{\frac{M-\alpha+1}{2}}, \varphi_{\frac{M+\alpha+3}{2}}, \dots, \varphi_{xm}] \quad (7)$$

2) 确定虚拟旋转麦克风在 t_n 时刻的相位角 φ'

经过 t_n 时刻, 每个麦克风都应旋转过 Ωt_n 角度, 那么就可得到虚拟旋转的麦克风阵列在 t_n 时刻的相位角 φ'

$$\varphi' = [\varphi_{x_1} + \Omega t_n, \varphi_{x_2} + \Omega t_n, \dots, \varphi_{xm} + \Omega t_n] \quad (8)$$

3) 找到 t_n 时刻每个麦克风对应的时域声压序列 $p(t_n)$

$$p(t_n) = \left[p(1, t_n), \dots, p\left(\frac{M-\alpha+1}{2}, t_n\right), p\left(\frac{M+\alpha+3}{2}, t_n\right), \dots, p(M, t_n) \right] \quad (9)$$

4) 在 t_n 时刻, 将式(7)得到的麦克风周向角与对应的编号, 与式(9)得到的声压序列建立函数关系, 即 $p(t_n) = f(\varphi)$ 。再利用三次样条函数和 B 样条函数算出在由式(8)得到的虚拟旋转麦克风处的虚拟声压值。

计算交叉互谱矩阵 C_{Ω}

$$C_{\Omega} = p_{\Omega}(\omega) [p_{\Omega}(\omega)]^H \quad (10)$$

式中

$$p_{\Omega}(\omega) = \left[p_{\Omega}(1, \omega), \dots, p_{\Omega}\left(\frac{M-\alpha+1}{2}, \omega\right), p_{\Omega}\left(\frac{M+\alpha+3}{2}, \omega\right), \dots, p_{\Omega}(M, \omega) \right] \quad (11)$$

1.4.3 导向矢量计算

插值方法的不同只影响虚拟麦克风声压的大小, 不会影响导向矢量的计算。接下来计算旋转坐标系下的导向矢量 SV(steering vector): 不考虑轴向来流影响, 旋转坐标系下下级子的自由场格林函数可由球谐函数展开获得^[21]

$$G_{\Omega} = -i \sum_{n=-\infty}^{+\infty} k_{m_0} e^{im_0(\varphi_{xm}-\varphi_{ys})} \sum_{n=|m_0|}^{+\infty} N_{m_0 n}^2 b_n P_n^{m_0}(\cos \theta_{xm}) P_n^{m_0}(\cos \theta_{ys}) \quad (12)$$

其中 $P_n^{m_0}$ 展示第 n 阶 $|m_0|$ 次的第 1 类缔合勒让德函数。

归一化因子为

$$N_{m_0 n} = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi} \cdot \frac{(n-m_0)!}{(n+m_0)!}} \quad (13)$$

旋转效应造成频移后的波数为

$$k_{m_0} = \frac{2\pi f + m_0 \Omega}{c} \quad (14)$$

式中 c 为声速。

球谐函数为

$$b_n(r_{xm}, r_{ys}) = \begin{cases} j_n(k_{m_0} r_{ys}) h_n^{(\delta_{m_0})}(k_{m_0} r_{xm}) r_{ys} \leq r_{xm} \\ j_n(k_{m_0} r_{xm}) h_n^{(\delta_{m_0})}(k_{m_0} r_{ys}) r_{ys} > r_{xm} \end{cases} \quad (15)$$

其中 j_n 是 n 阶第 1 类球贝塞尔函数, h_n 是第 δ_{m_0} 类球汉克尔函数。

$$\delta_{m_0} = \begin{cases} 2 & k_{m_0} \geq 0 \\ 1 & k_{m_0} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

声波传播格林函数矩阵 G_{Ω} 可表示为

$$G_{\Omega} = [G_{\Omega}(1) \cdots G_{\Omega}(s) \cdots G_{\Omega}(S)] = \begin{bmatrix} G_{\Omega}(1, 1) \cdots G_{\Omega}(1, s) \cdots G_{\Omega}(1, S) \\ \vdots \\ G_{\Omega}(m, 1) \cdots G_{\Omega}(m, s) \cdots G_{\Omega}(m, S) \\ \vdots \\ G_{\Omega}(M, 1) \cdots G_{\Omega}(M, s) \cdots G_{\Omega}(M, S) \end{bmatrix} \quad (17)$$

导向矢量矩阵 W_{Ω} 为

$$W_{\Omega} = [W_{\Omega}(1), \dots, W_{\Omega}(s), \dots, W_{\Omega}(S)] \quad (18)$$

式中 $W_{\Omega}(s)$ 的计算方法为

$$W_{\Omega}(s) = \frac{G_{\Omega}(s)}{\|G_{\Omega}(s)\|_2^2} \quad (19)$$

波束成形结果 b 的计算方法如下:

$$b = [b(1), \dots, b(s), \dots, b(S)] \quad (20)$$

式中

$$b(s) = (W_{\Omega}(s))^H C_{\Omega} W_{\Omega}(s) \quad (21)$$

2 数值模拟结果分析

数值模拟算例选用的是旋转声源标准算例 b11a, 该算例是利用 Python-acoular 软件数值模拟获得的^[22]。声源位置(S1、S2、S3)和强度设置如图 5 所示。

2.1 傅里叶插值数值模拟结果分析

图 6(a)~图 6(e)分别是麦克风减少个数为 0、1、3、5、7 时获得的波束成形结果, L_{sp} 为声源的声压级。由图中结果可知: 当减少 1 个麦克风时, 对旁瓣的抑制能力下降, 动态性能大幅下降。图 6 对应的声源的具体位置和声压大小如表 2 所示。

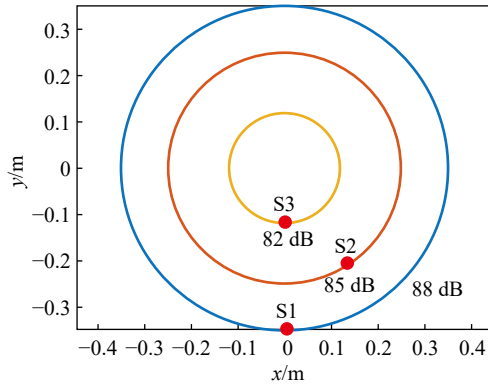


图5 声源分布

Fig. 5 Sound source distribution

由表2可知,由傅里叶插值计算得到的最大声压强度在减少1个麦克风时下降了4.36 dB,减少3个麦克风时下降了4.80 dB,减少5个麦克风时下降了5.10 dB,减少7个麦克风时下降了5.21 dB。减少第1个麦克风时声压强度下降幅度最大,之后减小幅度变小。由傅里叶插值计算得到的最大声源位置,在减少1个麦克风时之间的距离为0.040 m,在减少3个麦克风时之间的距离为0.040 m,在减少5个麦克风时之间的距离为0.0283 m,在减少7个麦克风时之间的距离为0.030 m。综上所述,傅里叶插值在对称减少麦克风数量进行声源定位时仍存在一定的不足。

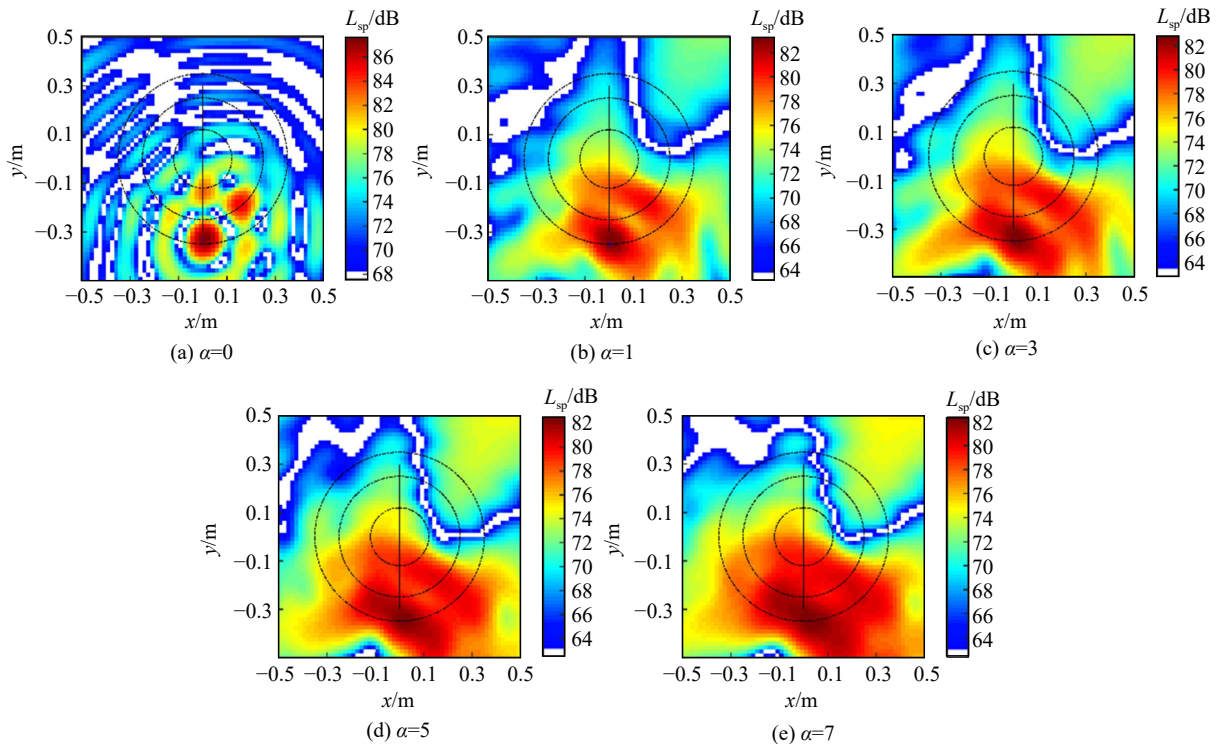


图6 由傅里叶插值得到的波束成形数值模拟结果

Fig. 6 Beamforming simulated results obtained by Fourier interpolation

表2 由傅里叶插值得到的声源位置坐标和声压大小变化的数值模拟结果

Table 2 Simulated results of variations in source position coordinates and sound pressure obtained by Fourier interpolation

减少麦克风个数	最大声源位置坐标/m	最大声压数值/dB
0	(0, -0.33, 1.0)	87.58
1	(0, -0.37, 1.0)	83.22
3	(0, -0.37, 1.0)	82.78
5	(-0.02, -0.35, 1.0)	82.48
7	(-0.03, -0.33, 1.0)	82.37

2.2 B样条插值数值模拟结果分析

图7(a)~图7(e)分别是麦克风减少个数为0、1、3、5、7时获得的波束成形结果。如图7所示,随着麦克风的减少,对旁瓣的抑制能力下降,定位和声压大小并没有明显的改变。图7对应的声源的具体位置和声压大小如表3所示。

由表3可知,由B样条插值计算得到的最大声压强度,在减少1个麦克风时下降了0 dB,减少3个麦克风时下降了0.15 dB,减少5个麦克风时下降了0.58 dB,减少7个麦克风时下降了1.17 dB。

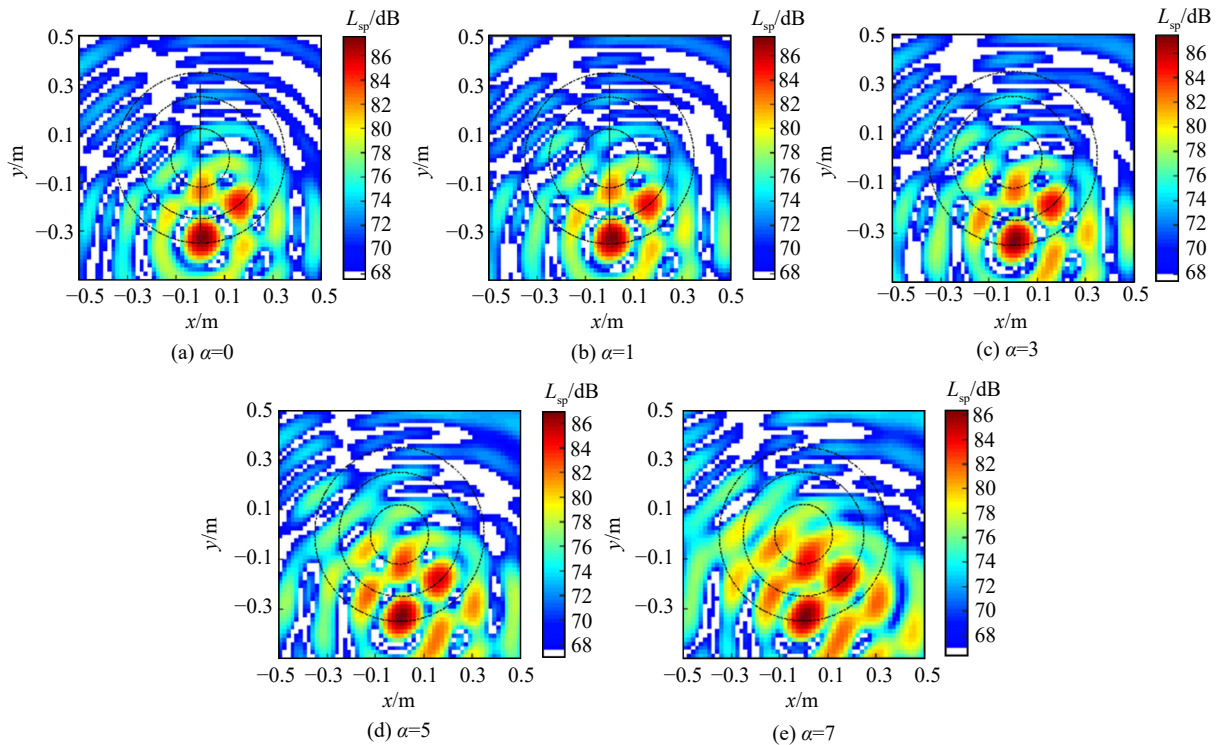


图 7 由 B 样条插值得到的波束形成数值模拟结果

Fig. 7 Beamforming simulated results obtained by B-spline interpolation

表 3 由 B 样条插值得到的声源位置坐标和声压大小变化的数值模拟结果

Table 3 Simulated results of variation of source position coordinates and sound pressure obtained by B-spline interpolation

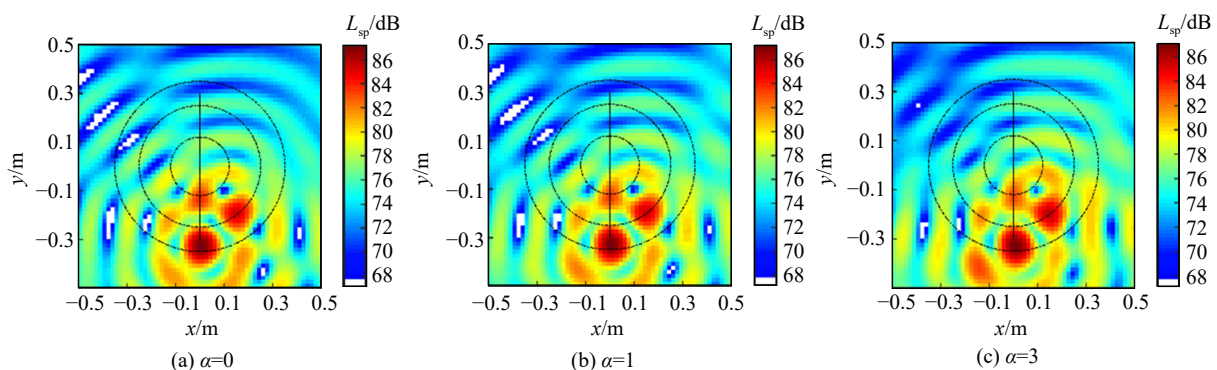
减少麦克风个数	最大声源位置坐标/m	最大声压数值/dB
0	(0, -0.33, 1.00)	87.55
1	(0, -0.33, 1.00)	87.55
3	(0, -0.34, 1.00)	87.40
5	(0, -0.34, 1.00)	86.97
7	(0, -0.34, 1.00)	86.38

当减少第 1 个麦克风时声压强度不变,之后随着麦克风数目的减小声压下降得越来越多。由 B

样条插值计算得到的最大声源位置,在减少 1 个麦克风时之间的距离为 0 m,在减少 3 个麦克风时之间的距离为 0.01 m,在减少 5 个麦克风时之间的距离为 0.01 m,在减少 7 个麦克风时之间的距离为 0.01 m。随着麦克风数目的减少,最大声源位置不变。综上 B 样条插值在对称减少麦克风时还是比较适用的。

2.3 三次样条插值数值模拟结果分析

图 8(a)~图 8(e)分别是麦克风减少个数为 0、1、3、5、7 时获得的波束成形结果。随着麦克风数目的减少,对旁瓣的抑制能力下降。定位和声压大小并没有明显的改变。图 8 对应的声源的具体位置和声压大小如表 4 所示。



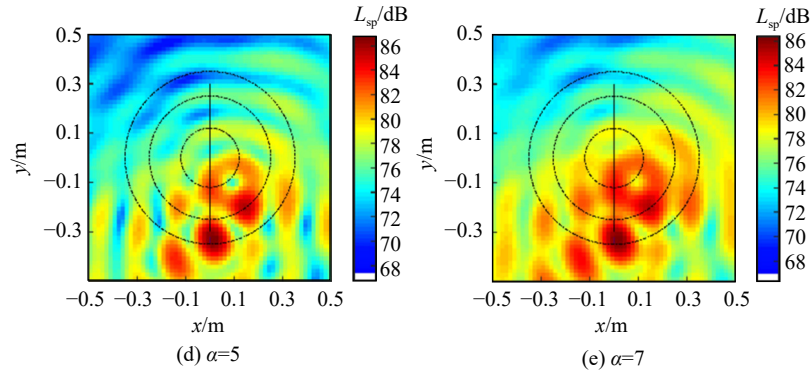


图8 由三次样条插值得到的波束成形数值模拟结果

Fig. 8 Beamforming simulated results obtained by cubic spline interpolation

表4 由三次样条插值得到的声源位置坐标和声压大小变化的数值模拟结果

Table 4 Simulated results of variations of source position coordinates and sound pressure obtained by cubic spline interpolation

减少麦克风个数	最大声源位置坐标/m	最大声压数值/dB
0	(0, -0.33, 1.00)	87.14
1	(0, -0.33, 1.00)	87.17
3	(0, -0.33, 1.00)	87.11
5	(0, -0.34, 1.00)	86.77
7	(0, -0.34, 1.00)	86.34

由表4可知,由三次样条插值计算得到的最大声压强度,在减少1个麦克风时增大了0.03 dB,减少3个麦克风时下降了0.03 dB,减少5个麦克风时下降了0.37 dB,减少7个麦克风时下降了0.80 dB。当减少第1个麦克风时声压强度略微增大几乎可以忽略不计,之后随着麦克风数目的减小声压下降得越来越多。由三次样条插值计算得到的最大声源位置,在减少1个麦克风时之间的距离为0 m,在减少3个麦克风时之间的距离为0 m,在减少5个麦克风时之间的距离为0.01 m,

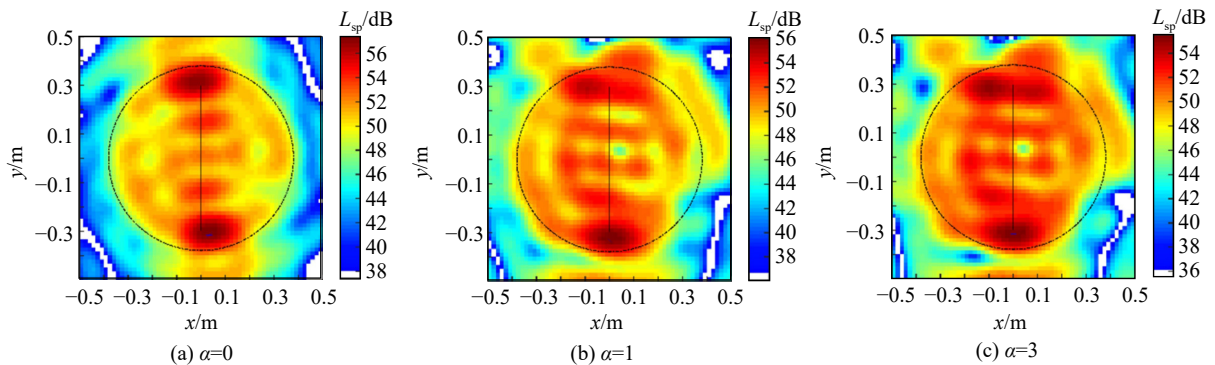
在减少7个麦克风时之间的距离为0.01 m。随着麦克风数目的减少,最大声源位置有略微变化,近乎不变。综上三次样条插值在对称减少麦克风时还是比较适用的。

3 实验结果分析

3.1 傅里叶插值实验结果分析

图9(a)~图9(e)分别是麦克风减少个数为0、1、3、5、7时获得的波束成形结果,当减少7个麦克风时定位失效。由波束成形结果可知,当减少1个麦克风时,对旁瓣的抑制能力下降,动态性能大幅下降。图9对应的声源具体位置和声压大小如表5所示。

由表5可知,由傅里叶插值计算得到的最大声压强度,在减少1个麦克风时下降了1.34 dB,减少3个麦克风时下降了1.90 dB,减少5个麦克风时下降了2.25 dB,减少7个麦克风时算法失效。当减少第1个麦克风时声压强度下降幅度最大,之后减小的幅度变小。由傅里叶插值计算得到的最大声源位置,在减少1个麦克风时之间的距离为0.032 m,在减少3个麦克风时之间的距离为0.030 m,在减少5个麦克风时之间的距离为0.030 m,在减少7个麦克风时算法失效。



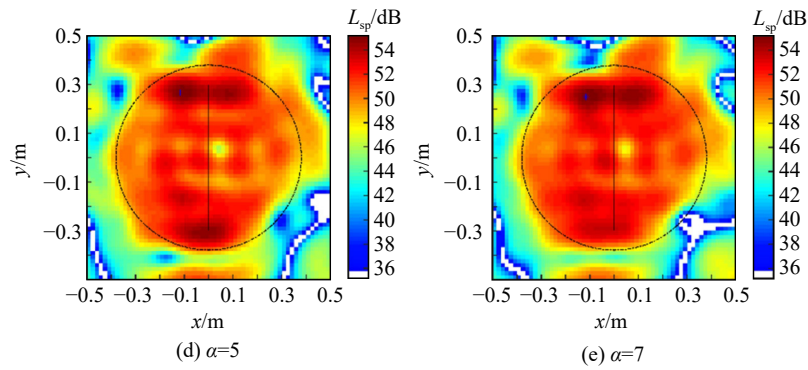


图 9 由傅里叶插值得到的波束成形实验结果

Fig. 9 Beamforming experimental results obtained by Fourier interpolation

表 5 由傅里叶插值得到声源位置坐标和声压大小变化的实验结果

Table 5 Experimental results of variations in source position coordinates and sound pressure obtained by Fourier interpolation

减少麦克风个数	最大声源位置坐标/m	最大声压数值/dB
0	(0.03, -0.32, 1.00)	57.41
1	(0, -0.33, 1.00)	56.07
3	(0, -0.32, 1.00)	55.51
5	(0, -0.32, 1.00)	55.16
7	定位失效	失效

综上所述, 傅里叶插值在对称减少麦克风数量进行声源定位时仍存在一定的不足。

3.2 B 样条插值实验结果分析

图 10(a)~图 10(e) 分别是麦克风减少个数为 0、1、3、5、7 时获得的波束成形结果, 当减少 7 个麦克风时定位失效。如图 10 所示, 随着麦克风的减少, 对旁瓣的抑制能力下降。随着减少麦克风数目的增加, 定位和声压大小在减少 3 个以内时没有明显的改变, 当减少 5 个时性能恶化。图 10 中对应的声源具体的位置和声压的大小如表 6 所示。

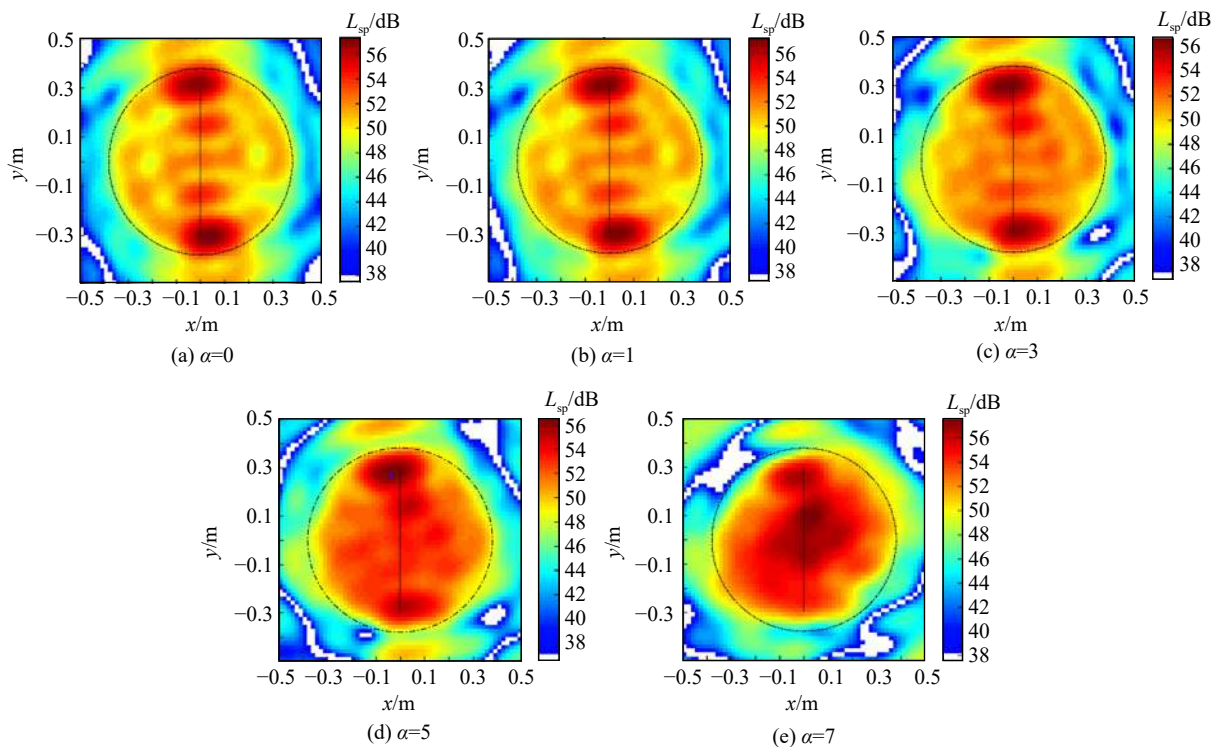


图 10 由 B 样条插值得到的波束成形的实验结果

Fig. 10 Beamforming experimental results obtained by B-spline interpolation

表6 由B样条插值得到声源位置坐标和声压大小变化的实验结果

Table 6 Experimental results of variation of source position coordinates and sound pressure obtained by B-spline interpolation

减少麦克风个数	最大声源位置坐标/m	最大声压数值/dB
0	(-0.03, 0.32, 1.0)	57.41
1	(-0.02, 0.30, 1.0)	57.08
3	(-0.03, 0.28, 1.0)	56.75
5	(-0.03, 0.26, 1.0)	56.60
7	定位失效	失效

由表6可知, 由B样条插值计算得到的最大声压强度, 在减少1个麦克风时下降了0.33 dB, 减少3个麦克风时下降了0.66 dB, 减少5个麦克风时下降了0.81 dB, 减少7个麦克风时算法失效。随着麦克风数目的减小, 声压下降得越来越多, 下降的趋势越来越小。由B样条插值计算得到的最大声源位置, 在减少1个麦克风时之间的距离为0.022 m, 在减少3个麦克风时之间的距离为0.040 m, 在减少5个麦克风时之间的距离为0.060 m, 在减少7个麦克风时算法失效。随着麦克风数目的减少, 定位偏差越来越大。综上B样条插值在对称减少麦克风时还是比较适用的。

3.3 三次样条插值实验结果分析

图11(a)~图11(e)分别是麦克风减少个数为0、1、3、5、7时获得的波束成形结果, 当减少7个麦克风时定位失效。随着减少麦克风数目的增加, 定位和声压大小在减少3个以内时没有明显的改变, 当减少5个时性能恶化。图11对应的声源具体的位置和声压的大小如表7所示。

图11(a)~图11(e)分别是麦克风减少个数为0、1、3、5、7时获得的波束成形结果, 当减少7个麦克风时定位失效。随着减少麦克风数目的增加, 定位和声压大小在减少3个以内时没有明显的改变, 当减少5个时性能恶化。图11对应的声源具体的位置和声压的大小如表7所示。

从表7可知, 由三次样条插值计算得到的最大声压强度, 在减少1个麦克风时增大了0.17 dB, 减少3个麦克风时下降了0.59 dB, 减少5个麦克风时下降了0.88 dB, 减少7个麦克风时算法失效。由三次样条插值计算得到的最大声源位置, 在减少1个麦克风时之间的距离为0.010 m, 在减少3个麦克风时之间的距离为0.022 m, 在减少5个麦克风时之间的距离为0.045 m, 在减少7个麦克风时算法失效。随着麦克风数目的减少, 最大声源位置偏差加大。

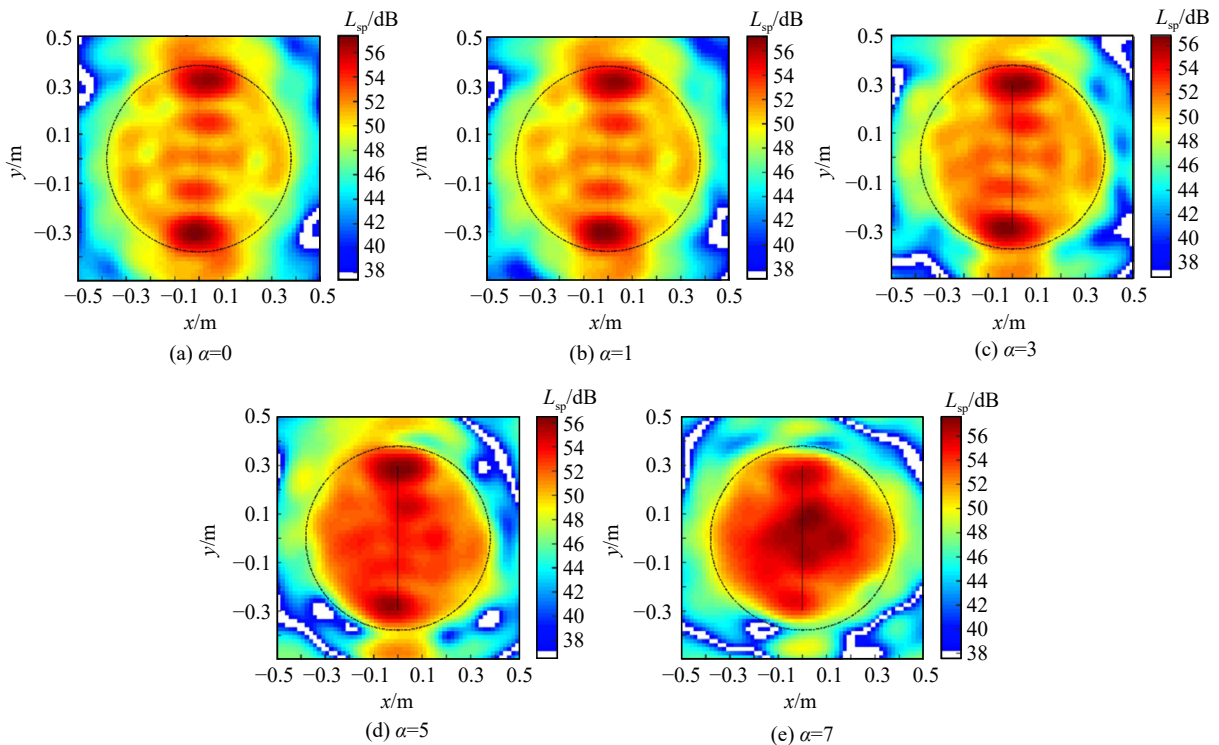


图11 由三次样条插值得到的波束成形的实验结果

Fig. 11 Beamforming experimental results obtained by cubic spline interpolation

表 7 由三次样条插值得到声源位置坐标和声压大小变化的实验结果

Table 7 Experimental results of variations of source position coordinates and sound pressure obtained by cubic spline interpolation

减少麦克风个数	最大声源位置坐标/m	最大声压数值/dB
0	(-0.02, 0.32, 1.00)	57.38
1	(-0.03, 0.32, 1.00)	57.21
3	(-0.03, 0.30, 1.00)	56.79
5	(0, 0.28, 1.00)	56.50
7	定位失效	失效

综上三次样条插值在对称减少麦克风时还是比较适用的。

4 误差分析

4.1 声源的强度误差

计算声源定位强度误差 Δq_w

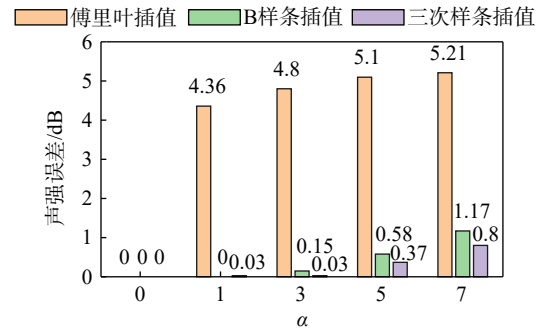
$$\Delta q_w = |q_w(s_0) - q_w(s'_0)| \quad (22)$$

其中 $q_w(s_0)$ 是麦克风阵列完整时各个插值方法各自获得的最大声源强度, $q_w(s'_0)$ 是麦克风阵列在不完整时各个插值方法各自获得的最大声源强度。在对称减少麦克风数为 0、1、3、5、7 时利用傅里叶插值、三次样条插值、B 样条插值获得 CSM, 并由此得到波束成形的声压变化。将麦克风阵列完整时作为标准, 计算减少不同的麦克风数目时, 各自得到的声压与麦克风阵列完整声压的差的绝对值, 得到声源定位强度误差。数值模拟和实验得到的声强误差与麦克风减少个数之间的关系如图 12(a) 和图 12(b) 所示。

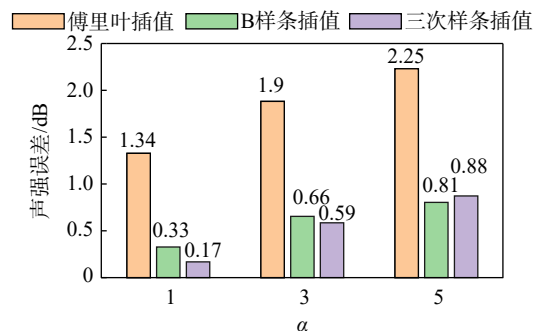
由图 12(a) 可知, 在数值模拟得到的结果中由傅里叶插值获得的声源声压随着麦克风数目的减少, 变化很大。三次样条的变化最接近真实声压, B 样条插值获得的声压比三次样条差, 但是也围绕在真实声压附近变化, 幅度不是很大。

由图 12(b) 可知, 在实验结果中由傅里叶插值获得的声源声压随着麦克风数目的减少, 变化很大。三次样条和 B 样条插值获得的声压变化差不多, 围绕真实声压附近变化不大, 三次样条略好。

因此在考虑声源强度误差时, 数值和实验的结果吻合较好, 其中三次样条插值获得的结果最好, 傅里叶插值效果最差。



(a) 数值模拟声强误差



(b) 实验声强误差

图 12 声强变化图

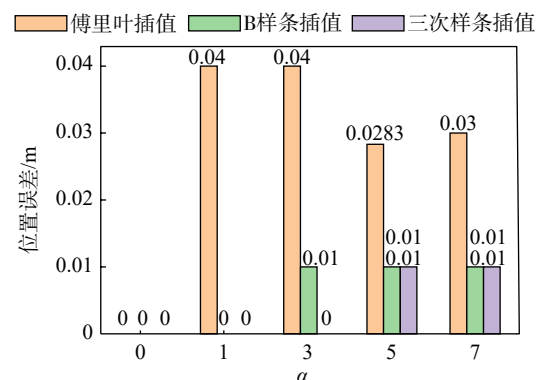
Fig. 12 Change of sound intensity

4.2 声源的位置误差

计算声源定位位置误差 Δd

$$\Delta d = |y(s_0) - y(s'_0)| \quad (23)$$

其中 $y(s_0)$ 是麦克风阵列完整时各个插值方法各自获得的最大声源位置, $y(s'_0)$ 是麦克风阵列在不完整时各个插值方法各自获得的最大声源位置。利用 3 种插值得到在减少不同麦克风个数时相对于不减少麦克风时最大声源的位置误差, 得到波束成形定位误差分析。数值模拟和实验得到的位置误差与麦克风减少个数之间的关系如图 13(a) 和图 13(b) 所示。



(a) 数值模拟位置误差

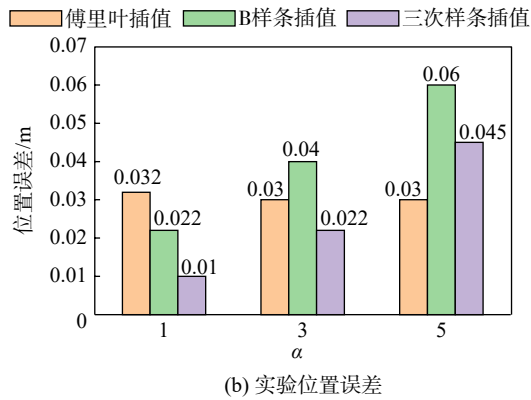


图13 声源定位误差图

Fig. 13 Sound source positioning error

由图13(a)所示,在数值模拟得到的结果中三次样条的定位误差始终保持不变,傅里叶插值和B样条插值的误差在减少麦克风数为3个以内时不变,之后就变化得比较明显。

由图13(b)所示,由实验得到的结果中傅里叶插值在去除两个以内的麦克风时误差明显大于B样条插值,在去除4个以内的麦克风时,误差明显大于三次样条。B样条的定位误差一直大于三次样条。

结合数值模拟和实验结果来看,三次样条表现出来的性能也是最好的。

4.3 空间分辨率和动态范围

空间分辨率由主瓣带宽决定,动态范围由旁瓣抑制能力决定。其中主瓣带宽为主瓣处的-3 dB带宽,旁瓣抑制能力为次峰值与主峰值之间的强度差,主瓣宽度越窄,旁瓣抑制能力越大,声源定位性能越好。

在分别减少0、1、3、5、7个麦克风时,利用3种插值方法得到波束成形二维中心剖面图。数值模拟的剖面图如图14所示,实验结果的剖面图如图15所示。

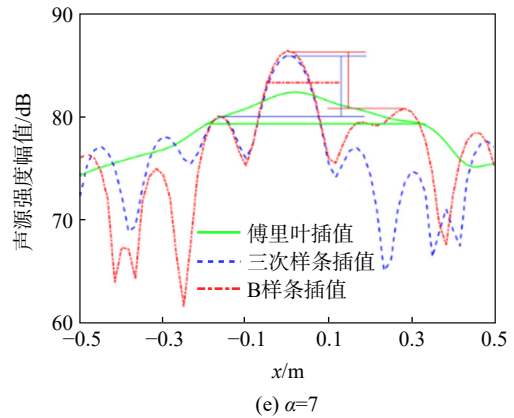
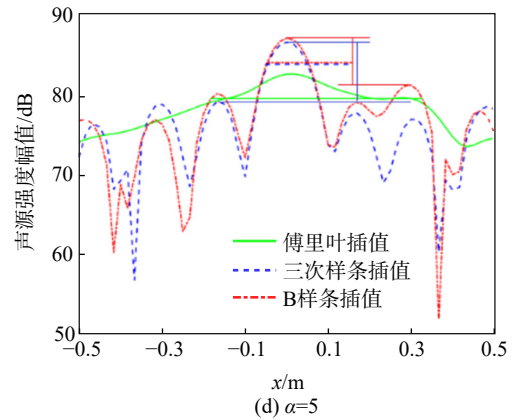
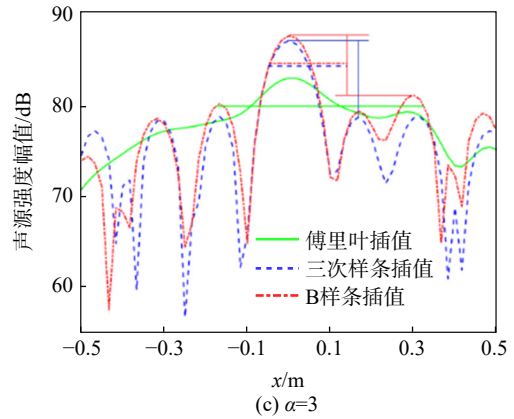
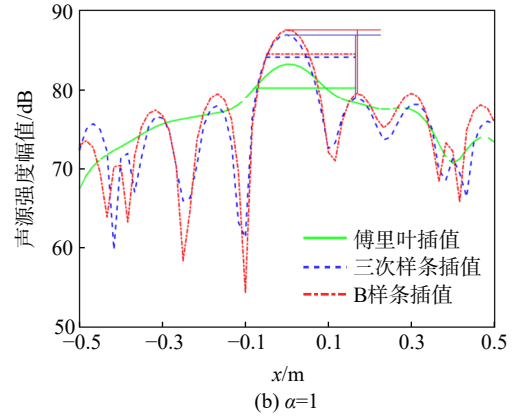
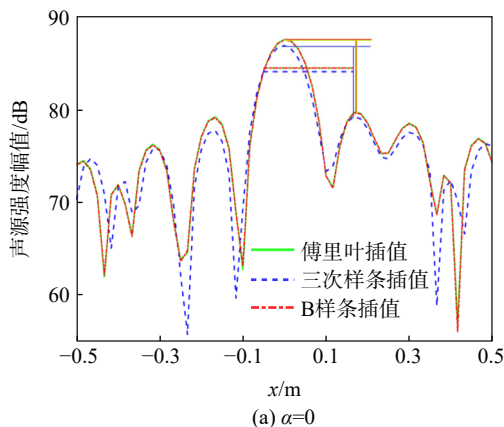


图14 三种插值方法的空间分辨率和动态范围的数值模拟结果比较

Fig. 14 Comparison of simulated results of spatial resolution and dynamic range with three interpolation methods

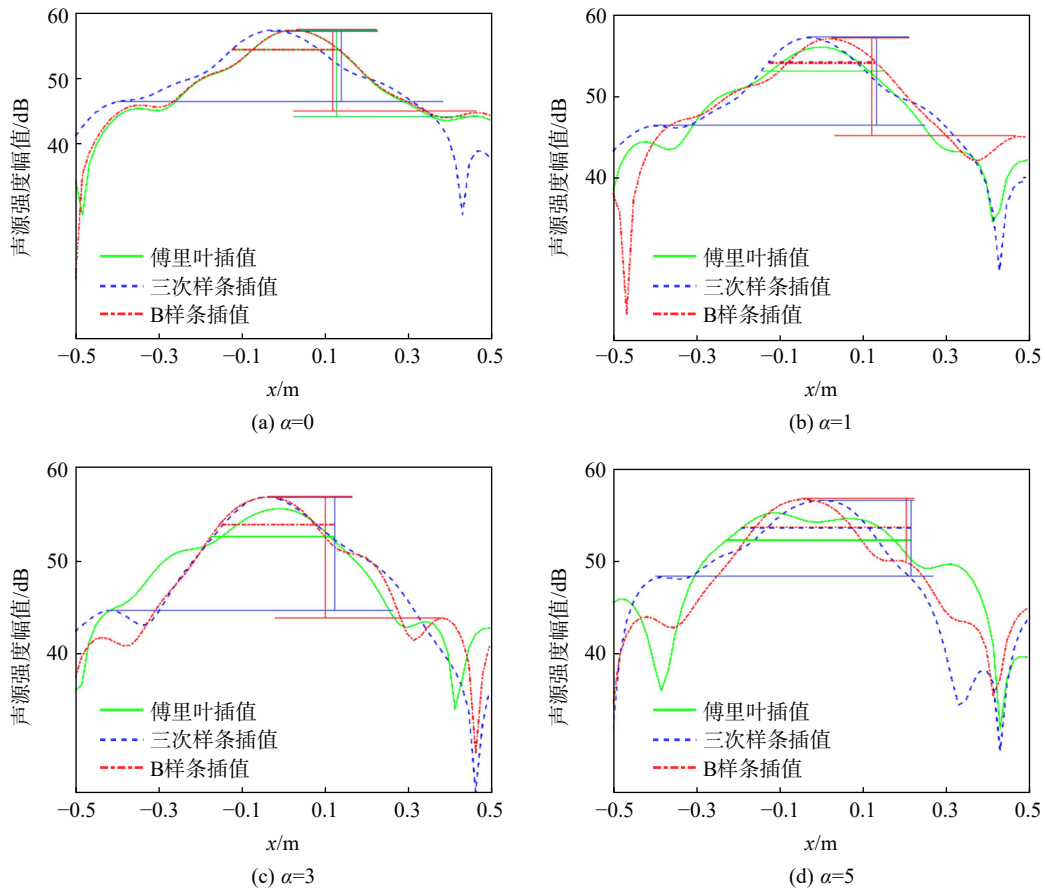


图 15 三种插值方法的空间分辨率和动态范围的实验值比较

Fig. 15 Comparison of experimental results of spatial resolution and dynamic range with three interpolation methods

图 14(a)~图 14(e)分别是在数值模拟时减少麦克风 0、1、3、5、7 时得到的 3 种插值的空间分辨率和动态范围的比较。可以看到随着麦克风数目的减少,傅里叶插值的空间分辨率和动态性能变差,三次样条和 B 样条有略微变差但是变化并不是很大。对于傅里叶插值、三次样条插值和 B 样条插值而言,傅里叶插值得到的波束成形结果的动态性能和分辨率明显比三次样条和 B 样条插值差很多,而三次样条和 B 样条的动态性能和分辨率差别不大。

图 15(a)~图 15(d)分别是在实验时减少麦克风 0、1、3、5 时得到的 3 种插值的空间分辨率和动态范围的比较。可以看到随着麦克风数目的减少,傅里叶插值的空间分辨率和动态性能变差,三次样条和 B 样条也有变差,但是相对于傅里叶插值的变化相对较好。三次样条和 B 样条在动态范围的变化上差不多,但是三次样条在相同的麦克风数目下,动态范围和空间分辨率都会优于 B 样条插值和傅里叶插值。

结合数值模拟和实验结果来看,三次样条在

空间分辨率和动态范围上表现出来的性能也是最好的。

5 结 论

本文对完整麦克风阵列定位旋转算法进行了改进,实现了不完整麦克风阵列对旋转声源的定位。利用数值模拟和实验获得了在对称以奇数依次从下往上减少麦克风时,由傅里叶插值、B 样条插值和三次样条插值获得 CSM 对波束成形结果在声源定位强度、位置、动态范围和空间分辨率的影响,得到如下结论:

- 1) 傅里叶插值获得的 CSM 计算得出的波束成形结果动态范围最差,声源定位的精度和声源的强度在 3 种插值中都是最差的。
- 2) 三次样条插值获得的 CSM 计算得出的波束成形结果动态范围较好,声源定位的精度和声源的强度在 3 种插值中都是最优的。
- 3) B 样条插值获得的 CSM 计算得出的波束成形结果动态范围较好,在声源定位的精度和声源的强度方面优于傅里叶插值,劣于三次样条插

值,表现一般。

参考文献:

- [1] 吴志刚. 直升机旋翼噪声实验室(全消声室)设计[J]. *噪声与振动控制*, 2020, 40(2): 207-209.
WU Zhigang. Design of helicopter rotor noise laboratory (full anechoic chamber)[J]. *Noise and Vibration Control*, 2020, 40(2): 207-209. (in Chinese)
- [2] MICHEL U. History of acoustic beamforming[C]//1st Berlin Beamforming Conference. Berlin: Springer, 2006: 1-17.
- [3] DOUGHERTY R P. Beamforming in acoustic testing[M]. Berlin: Springer, 2002.
- [4] SIJTSMA P, OERLEMANS S, HOLTHUSEN H. Location of rotating sources by phased array measurement[R]. AIAA-2001-2167, 2001.
- [5] 莫品西. 旋翼气动噪声的声成像理论与试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
MO Pinxi. Theoretical and experimental study on the imaging of rotor aerodynamic noise[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018. (in Chinese)
- [6] BROOKS T F, HUMPHREYS W M. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 294(4): 856-879.
- [7] SIJTSMA P. CLEAN based on spatial source coherence[J]. *International Journal of Aeroacoustics*, 2009, 6(4): 357-374.
- [8] PANNERT W, MAIER C. Rotating beamforming motion compensation in the frequency domain and application of high-resolution beamforming algorithms[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333(7): 1899-1912.
- [9] LOWIS C R, JOSEPH P F. Inversion technique for determining the strength of rotating broadband sources in ducts[R]. AIAA-2005-3018, 2005.
- [10] LOWIS C R, JOSEPH P F. A focused beam former technique for separating rotor and stator based broadband sources[R]. AIAA-2006-2710, 2006.
- [11] 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(3): 614-632.
- [12] HEROLD G, SARRADJ E. Microphone array method for the characterization of rotating sound sources in axial fans[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2015, 63(6): 546-551.
- [13] HEROLD G, SARRADJ E. Frequency domain deconvolution for rotating sources on an axial fan[C]// 6th Berlin Beamforming Conference. Berlin: Springer, 2016: BeBeC-2016-D18.1-BeBeC-2016-D18.8.
- [14] MA W, BAO H, ZHANG C, et al. Beamforming of phased microphone array for rotating sound source localization[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 467: 115064.1-115064.17.
- [15] MA W, ZHANG C. Doppler effect in the time-domain beamforming for rotating sound source identification[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 148(1): 430-443.
- [16] MA W, ZHANG C. A frequency-domain beamforming for rotating sound source identification[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 148(3): 1602-1613.
- [17] ZHOU W, BAO H, MA W, et al. Parameter investigation of ring microphone array for rotating sound source localization[R]. Beijing: Global Power and Propulsion Society Conference GPPS-BJ-2019-0007, 2019.
- [18] 李晓东, 孙晓峰, 胡宗安. 一种螺旋桨的气动声学设计与实验验证[J]. *航空动力学报*, 1991, 6(4): 317-319.
LI Xiaodong, SUN Xiaofeng, HU Zongan. Aeroacoustical modification of a propeller[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1991, 6(4): 317-319. (in Chinese)
- [19] 伍岳, 杨兵, 贾少红, 等. 基于波束形成方法的风力机叶片气动噪声定位研究[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(12): 2262-2265.
WU Yue, YANG Bing, JIA Shaohong, et al. Locating of acoustic sources on wind turbine blades based on beamforming[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(12): 2262-2265. (in Chinese)
- [20] 鲍欢. 麦克风阵列自由场旋转波束形成技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
BAO Huan. Research on free-field rotating beamforming of microphone array[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020. (in Chinese)
- [21] MA W, LIU X. DAMAS with compression computational grid for acoustic source mapping[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 410: 473-484.
- [22] SARRADJ E, HEROLD G. A Python framework for microphone array data processing[J]. *Applied Acoustics*, 2017, 116: 50-58.

(编辑: 陈 越)