

麦克风阵列安装偏差引起的 旋转声源定位误差

鲍欢^{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: 对旋转声源定位中3种常见阵列安装偏差即角度偏差、 x 轴向偏移偏差、 z 轴向偏移偏差导致的定位误差进行了详细研究。结果表明:当角度偏差在 $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 范围内,声源定位位置误差随角度偏差呈近似线性变化,最大定位位置误差为0.089 m,定位强度误差呈随机变化,其中最小定位强度误差为0.97 dB,最大为4.69 dB;当 x 轴向偏移偏差在 $-0.1 \sim 0.1$ m范围内,声源定位位置误差随 x 轴向偏移偏差呈近似线性变化,最大定位位置误差为0.098 m,定位强度误差呈随机变化,其中最小定位强度误差为0.91 dB,最大为4.94 dB;当 z 轴向偏移偏差在 $-0.1 \sim 0.1$ m范围内,最大定位位置误差为0.01 m,正偏移偏差引起的定位强度误差总体小于负偏移偏差,其中最小定位强度误差为0.81 dB,最大为4.51 dB。研究结果可为麦克风阵列在实际应用中控制测量误差提供指导。

关键词: 麦克风阵列; 声源定位; 安装偏差; 定位误差; 旋转声源

中图分类号: V211.71

文献标志码: A

Error in rotating sound source localization caused by installation deviation of microphone array

BAO Huan^{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 localization error caused by three types of common array installation deviation, namely angular deviation, x -axis offset deviation and z -axis offset deviation was studied in detail in the rotating sound source localization. Research showed that when angular de-

收稿日期: 2019-01-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 鲍欢(1993—),男,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: 鲍欢,杨明绥,马威. 麦克风阵列安装偏差引起的旋转声源定位误差[J]. 航空动力学报,2019,34(8):1708-1716. BAO Huan, YANG Mingsui, MA Wei. Error in rotating sound source localization caused by installation deviation of microphone array[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(8): 1708-1716.

viation was within the range from -10° to 10° , the position error varied approximately linearly with the angular deviation, the maximum positioning error was 0.089 m, the strength error was randomly distributed, the minimum strength error was 0.97 dB and the maximum strength error was 4.69 dB; when x -axis offset deviation was within the range from -0.1 m to 0.1 m, the position error varied approximately linearly with x -axis offset deviation, the maximum positioning error was 0.098 m, the strength error was randomly distributed, the minimum strength error was 0.91 dB and the maximum strength errors was 4.94 dB; when z -axis offset deviation was within the range from -0.1 m to 0.1 m, the maximum positioning error was 0.01 m, strength error caused by the positive z -axis offset deviation was smaller than the negative z -axis offset deviation generally, the minimum strength error was 0.81 dB and the maximum strength error was 4.51 dB. Research results can provide guidance for controlling the localization error of microphone arrays in practical applications.

Key words: microphone array; sound source localization; installation deviation; localization error; rotating sound source

随着社会的发展,噪声对身体健康的危害越来越受到重视,环境的舒适度变得越来越重要,相应地声源定位对减噪显得越发重要。麦克风阵列测量技术,是一种声源定位实验测试技术。多个麦克风组成一个阵列,实验中记录放置在远场的麦克风声压信号,通过麦克风阵列算法得到扫描网格面上的声源位置和强度分布^[1]。

声源定位精度是麦克风阵列声源定位的重要指标之一。为了提高声源定位精度,学术界进行了大量的研究,其中大部分的研究都是建立在对麦克风阵列算法改进和麦克风阵型优化基础之上。

对于静止声源,麦克风阵列的基于延迟叠加的传统波束成形算法,可以分辨出不相干声源并具有一定鲁棒性,但空间分辨率较低特别是在低频情况下。为了提高空间分辨率,波束成形后处理反卷积算法和高级波束成形算法孕育而生。著名的有 DAMAS(deconvolution approach for the mapping of acoustic sources)算法^[2-3]和 CLEAN-SC(CLEAN based on source coherence)算法^[4]。为了进一步提高 DAMAS 运算效率, Ma 和 Liu^[5-7]使用压缩网格技术极大地提升了 DAMAS 的计算效率,增强了 DAMAS 算法在较多网格下的可实用性。著名的高级波束成形算法包括正交波束成形算法^[8]和函数波数成形算法^[9],在特定工况下,它们所能达到的声源分辨率水平几乎可以与反卷积技术相媲美。对于静止声源,麦克风阵型优化目前主要基于波束成形算法,优化后的阵型包括螺旋阵型^[10]和随机阵型^[11]。

对于旋转声源,目前的麦克风阵列算法都是

构建一个与噪声源同步旋转的虚拟旋转阵列,并且对声源旋转时产生的多普勒效应进行运动补偿,整体上可分为时域旋转波束成形算法^[12]、频域旋转波束成形算法^[13-14]。频域算法拥有较高的分辨率和计算效率,因此受到了广泛关注,本文也将其作为首选;频域算法适用的阵形一般仅限于等距分布的环形阵列,为了便于构建算法中需要的与噪声源同步旋转的虚拟旋转阵列。

在实际应用中,声源定位精度还受麦克风阵列安装偏差的影响。麦克风阵列安装时会存在各式各样的不可避免的安裝偏差,而这些安装偏差会引起声源定位误差。目前工程界和学术界对麦克风安装偏差引起的声源定位误差已经进行了一些研究。例如, Toth 等^[15]研究了非均匀分布环形阵列来提升旋转噪声测量精度,发现相邻麦克风之间间隔角度偏差会产生较大的声源定位强度误差。

目前为了能够为降噪提供支持,麦克风阵列越来越多地应用于工程声源定位中,那么就需要对麦克风安装偏差引起的声源定位误差进行更详细全面的研究,以便为麦克风阵列实验提供指导。

本文将对常见的麦克风阵列安装偏差引起的旋转声源定位误差进行更详细研究。为了避免实验中阵列安装误差和测量误差对本研究的影响,本文研究方法采用数值模拟。本文首先梳理出实验中常见的 3 种麦克风阵列安装偏差,接着介绍误差分析方法,然后分析 3 种麦克风阵列安装偏差引起的声源定位误差,最后给出本文的讨论和结论。

1 阵列安装偏差类型

麦克风阵列测量时,理想的设置位置如图 1 中实线圆环所示,存在安装偏差用虚线圆环表示。笛卡尔坐标系下,原点 O 位于阵列中心, x - y 平面设置在阵列平面, z 轴设置为从阵列中心指向扫描面(scan plane)中心方向,测量距离为 z_0 。

本文考虑 3 种常见的阵列安装偏差类型。第 1 种,阵列面产生角度偏差 $\Delta\theta$,如图 1(a)。第 2 种,阵列平面出现 x 轴向偏移偏差 Δx ,如图 1(b),使得阵列平面中心法线与扫描面中心法线不重合。第 3 种,阵列安装发生靠近或者远离扫描面所产生的 z 轴向偏移偏差 Δz ,如图 1(c)。

本研究的影响,本文研究方法采用数值模拟方法。表 1 中列出了数值模拟信息。对于 3 种阵列安装偏差类型,数值模拟中的正负安装偏差定义为:以扫描平面上半面($y>0$)为基准,正角度偏差表示阵列倾倒向基准面;正 x 轴向偏移偏差表示阵列安装时发生向 x 轴正方向偏移;正 z 轴向偏移偏差表示阵列安装时发生向 z 轴正方向偏移,负号反之。误差分析流程如图 2 所示,一共分为 6 步。

表 1 仿真信息表
Table 1 Simulation information table

参数	数值及详情
声源类型	旋转声源
声速 $c/(\text{m/s})$	341
声源频率 f/kHz	3
声强度/ Pa	1(94 dB)
声源初始位置	$(0,0.1,z_0)$
旋转半径 r/m	0.1
旋转中心	$(0,0,z_0)$
转速/ (r/min)	2000
转向	逆时针
网格数目	5041(71×71)
网格尺寸/ m	0.01
DAMAS 迭代次数	2000
阵列形状	环形
麦克风个数	64
阵列孔径 D/m	1
角度偏差范围 $\Delta\theta/(\text{^\circ})$	$-10\sim10$
x 轴向偏移偏差范围 $\Delta x/\text{m}$	$-0.1\sim0.1$
z 轴向偏移偏差范围 $\Delta z/\text{m}$	$-0.1\sim0.1$
测量距离 z_0/m	0.5

- 第 1 步 设置不存在安装偏差的麦克风位置、扫描面位置、以及其他常数,计算相应的传播矢量矩阵、导向矢量矩阵、以及点扩散函数矩阵。
- 1) 设置不存在安装偏差的麦克风球坐标矢量 $\boldsymbol{x}(m)=(r_{xm},\theta_{xm},\varphi_{xm})$,其中 $m=1,2,3,\cdots,M$, M 为麦克风总数。
- 2) 设置扫描面网格点的球坐标矢量 $\boldsymbol{y}(s)=(r_{ys},\theta_{ys},\varphi_{ys})$,其中 $s=1,2,3,\cdots,S$, S 为网格点总数。
- 3) 设置声源旋转角频率 Ω ,声源频率 f ,声速 c 。
- 4) 计算传播矢量矩阵^[13]

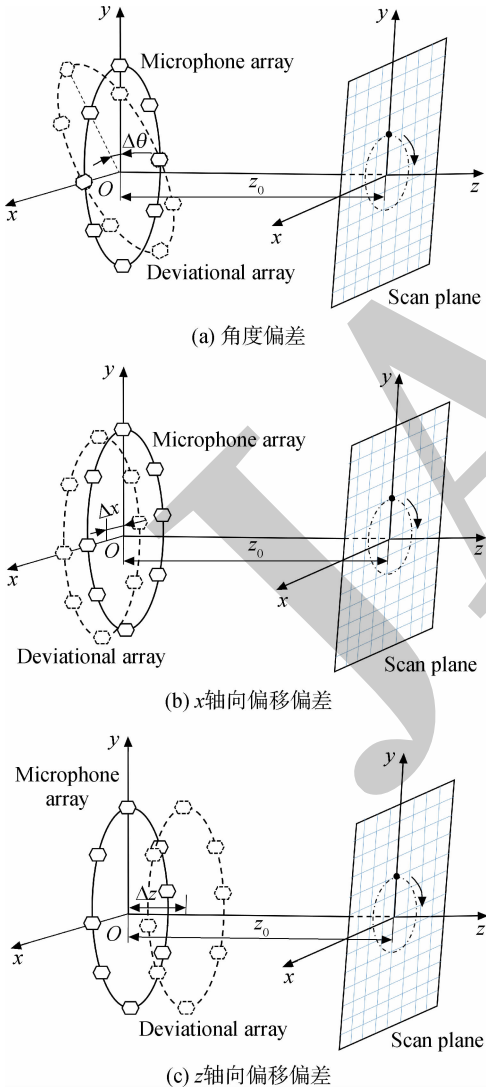


图 1 三种阵列安装偏差类型

Fig. 1 Three types of array installation deviation

2 误差分析方法

为了避免实验中阵列安装偏差和测量误差对

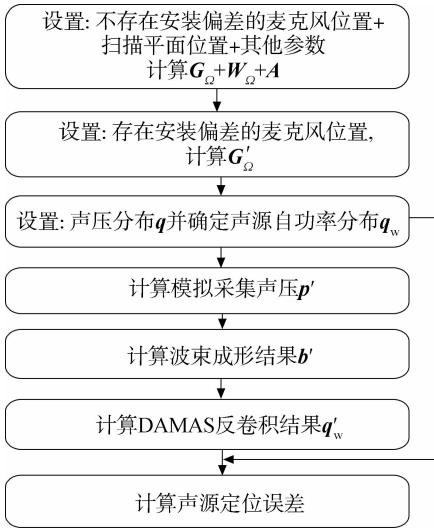


图 2 误差分析流程图

Fig. 2 Error analysis flow chart

$$G_{\Omega} = [G_{\Omega}^1 \cdots G_{\Omega}^s \cdots G_{\Omega}^S] =$$

$$\begin{bmatrix} G_{\Omega}(1,1) & \cdots & G_{\Omega}(1,s) & \cdots & G_{\Omega}(1,S) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{\Omega}(m,1) & \cdots & G_{\Omega}(m,s) & \cdots & G_{\Omega}(m,S) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{\Omega}(M,1) & \cdots & G_{\Omega}(M,s) & \cdots & G_{\Omega}(M,S) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中旋转坐标系下自由场的格林函数为

$$G_{\Omega}(m,s) = -i \sum_{m_0=-\infty}^{+\infty} e^{im_0(\varphi_{xm}-\varphi_{ys})} k_{m_0} \cdot$$

$$\sum_{n=|m_0|}^{+\infty} N_{m_0 n}^2 b_n(k_{m_0}, r_{xm}, r_{ys}) \cdots \quad (2)$$

$$P_n^{m_0}[\cos(\theta_{xm})] P_n^{m_0}[\cos(\theta_{ys})]$$

其中归一化因子

$$A = \begin{bmatrix} F_{ps}(\mathbf{y}(1)/\mathbf{y}(1)) & \cdots & F_{ps}(\mathbf{y}(1)/\mathbf{y}(s)) & \cdots & F_{ps}(\mathbf{y}(1)/\mathbf{y}(S)) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{ps}(\mathbf{y}(s)/\mathbf{y}(1)) & \cdots & F_{ps}(\mathbf{y}(s)/\mathbf{y}(s)) & \cdots & F_{ps}(\mathbf{y}(s)/\mathbf{y}(S)) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{ps}(\mathbf{y}(S)/\mathbf{y}(1)) & \cdots & F_{ps}(\mathbf{y}(S)/\mathbf{y}(s)) & \cdots & F_{ps}(\mathbf{y}(S)/\mathbf{y}(S)) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中

$$F_{ps}(\mathbf{y}(v)/\mathbf{y}(s)) = |(W_{\Omega}^v)^H G_{\Omega}^s|^2 \quad (14)$$

$$v = 1, 2, 3, \cdots, S \quad s = 1, 2, 3, \cdots, S$$

其中上标 H 表示共轭转置。

第 2 步 设置存在安装偏差的麦克风位置, 计算相应的传播矢量矩阵。

1) 根据阵列安装偏差类型和偏差量, 计算存在安装偏差的麦克风球坐标矢量。

$$N_{m_0 n} = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi} \cdot \frac{(n-m_0)!}{(n+m_0)!}} \quad (3)$$

旋转效应造成频移后的波数为

$$k_{m_0} = \frac{2\pi f + m_0 \Omega}{c} \quad (4)$$

$P_n^{m_0}(\cdot)$ 为 n 阶 m_0 次第一类勒让德函数

$$b_n(k_{m_0}, r_{xm}, r_{ys}) =$$

$$\begin{cases} j_n(k_{m_0} r_{ys}) h_n^{(\delta_{m_0})}(k_{m_0} r_{xm}) & r_{ys} \leq r_{xm} \\ j_n(k_{m_0} r_{xm}) h_n^{(\delta_{m_0})}(k_{m_0} r_{ys}) & r_{ys} > r_{xm} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $j_n(\cdot)$ 是 n 阶第一类球贝塞尔函数, $h_n^{(\delta_{m_0})}$ 是第 δ_{m_0} 类球汉克尔函数

$$\delta_{m_0} = \begin{cases} 2 & k_{m_0} \geq 0 \\ 1 & k_{m_0} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(2)中无穷级数展开项数范围, 在满足较小的截断误差下, 可近似取为 $m_0 \in [m_l, m_u]$, $n \in [m_0, n_{\max}]$ [16-17], 其中

$$m_l = \frac{-k_0 R}{1 + k_{m_0} R} \quad (7)$$

$$m_u = \frac{k_0 R}{1 - k_{m_0} R} \quad (8)$$

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} \quad (9)$$

$$n_{\max} = \max(\lfloor |k_0 + m_0 k_{m_0}| R \rfloor, |m_0|) \quad (10)$$

式中 R 表示声源旋转半径, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示下取整运算。

5) 计算导向矢量矩阵

$$W_{\Omega} = [W_{\Omega}^1 \cdots W_{\Omega}^s \cdots W_{\Omega}^S] \quad (11)$$

式中 [18]

$$W_{\Omega}^s = \frac{G_{\Omega}^s}{\|G_{\Omega}^s\|_2} \quad (12)$$

6) 计算点扩散函数 (PSF, 量符号记为 F_{ps})

矩阵

$$\mathbf{x}'(m) = (r'_{xm}, \theta'_{xm}, \varphi'_{xm}) \quad m = 1, 2, 3, \cdots, M \quad (15)$$

2) 将位置矢量 $\mathbf{x}'(m)$ 带入式(2), 进而计算出相应的传播矩阵 G'_{Ω} 。

第 3 步 设置声源分布

扫描面网格坐标 $\mathbf{y}(s)$, $s = 1, 2, 3, \cdots, S$ 中, 设置声压分布表示为

$$\mathbf{q} = [q_1 \cdots q_s \cdots q_S]^T \quad (16)$$

其中 T 表示转置,若声源之间互不相干,则声源自功率(source auto-power)^[18]分布为

$$\mathbf{q}_w = \text{diag}(\mathbf{q}\mathbf{q}^H) = \begin{bmatrix} |q_1|^2 & \cdots & |q_s|^2 & \cdots & |q_S|^2 \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

式中 $\text{diag}(\cdot)$ 表示取对角运算。

本文计算中,在扫描面位置为 $\mathbf{y}(s_0)$ 的网格点设置声压 $\mathbf{q}(s_0) = 1 \text{ Pa}$,其他网格点设置为零,那么

$$\mathbf{q} = [0 \quad \cdots \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]^T \quad (18)$$

$$\mathbf{q}_w = [0 \quad \cdots \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]^T \quad (19)$$

第 4 步 计算模拟采集声压

通过式(20)计算模拟采集声压。

$$\mathbf{p}' = \mathbf{G}'_a \mathbf{q} \quad (20)$$

第 5 步 计算波束成形结果

首先计算交叉互谱矩阵

$$\mathbf{C}' = \mathbf{p}'(\mathbf{p}')^H \quad (21)$$

然后计算波束成形结果^[19]

$$\mathbf{b}' =$$

$$[b'(\mathbf{y}(1)) \quad \cdots \quad b'(\mathbf{y}(s)) \quad \cdots \quad b'(\mathbf{y}(S))]^T \quad (22)$$

其中

$$b'(\mathbf{y}(s)) = (\mathbf{W}_\Omega^s)^H \mathbf{C}' \mathbf{W}_\Omega^s \quad (23)$$

第 6 步 计算 DAMAS 结果

通过 DAMAS 算法^[2]求解

$$\mathbf{A} \mathbf{q}'_w = \mathbf{b}' \quad (24)$$

获得干净的声源自功率分布 $\mathbf{q}'_w$ 。

第 7 步 计算声源定位误差

从 $\mathbf{q}'_w$ 中获得强度最大声源的位置 $\mathbf{y}(s'_0)$ 和幅值 $\mathbf{q}'_w(s'_0)$

1) 计算声源定位位置误差

$$\Delta d = |\mathbf{y}(s_0) - \mathbf{y}(s'_0)| \quad (25)$$

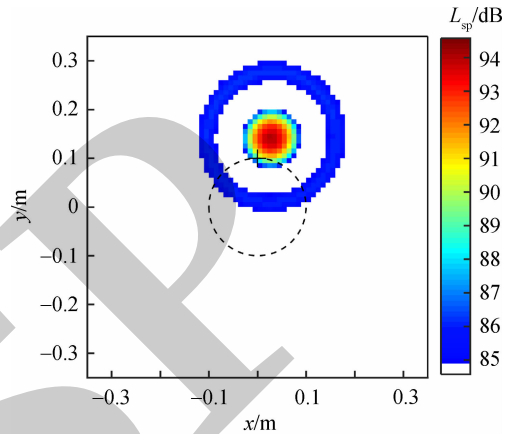
2) 计算声源定位强度误差

$$\Delta q_w = |\mathbf{q}_w(s_0) - \mathbf{q}'_w(s'_0)| \quad (26)$$

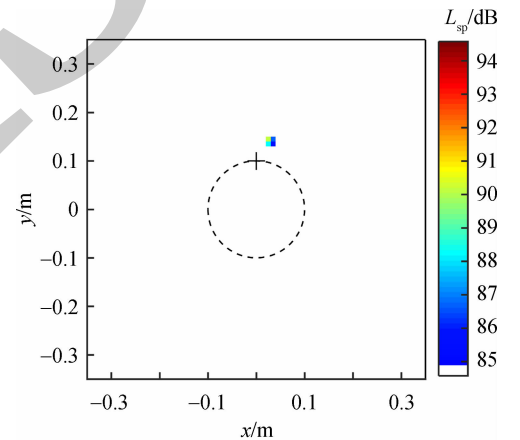
3 角度偏差引起的定位误差

图 3 为角度偏差为 3° 时的模拟计算结果。云图中反映强度分布物理量为声压级(SPL,量符号记为 L_{sp})。本文所有云图显示的动态范围都为 10 dB。为了便于分析对比定位位置误差,所有云图中的黑色“+”标记出了预先设定的声源位置,黑色圆形虚线是声源运动轨迹线。在图 3(a)的波束成形结果中,声源发生斜向右上偏移,这种

斜向位置偏移,是径向定位位置误差和周向定位位置误差的叠加结果。为了更加清晰的对比,对图 3(a)进行反卷积处理获得 DAMAS 结果,如图 3(b)所示,图中声源强度最高点附近出现虚假的噪声点源,分辨率显著下降;声源强度最高点位置已经明显偏离预先设定的声源位置,即产生了声源定位位置误差,并且在声源强度上发生明显的减弱。



(a) 波束成形结果



(b) DAMAS结果

图 3 角度偏差为 3° 时引起的声源定位误差

Fig. 3 Sound source localization error caused by 3° angle deviation

图 4 为声源定位误差随角度偏差 $\Delta\theta$ 的变化曲线,其中角度偏差设置范围为 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 。在图 4(a)中,声源定位位置误差随着角度偏差的绝对值增大而近似线性增长,最大定位位置误差为 0.089 m。并且,绝对值相同的正负角度偏差引起的声源定位位置误差基本相等。角度偏差为 $-3^\circ \sim -2^\circ$ 、 $2^\circ \sim 3^\circ$ 、 $8^\circ \sim 9^\circ$ 时,定位位置误差出现“零增长”,是因为定位位置误差的增长小于网格尺寸,进而 DAMAS 结果中最强点显示在同一个

网格点上。在图 4(b)中,声源定位强度误差随角度偏差随机变化,不过即使较小的角度偏差也会造成较大的定位强度误差。在角度偏差为 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 的范围内,最小的定位强度误差为 0.97 dB,最大为 4.69 dB。

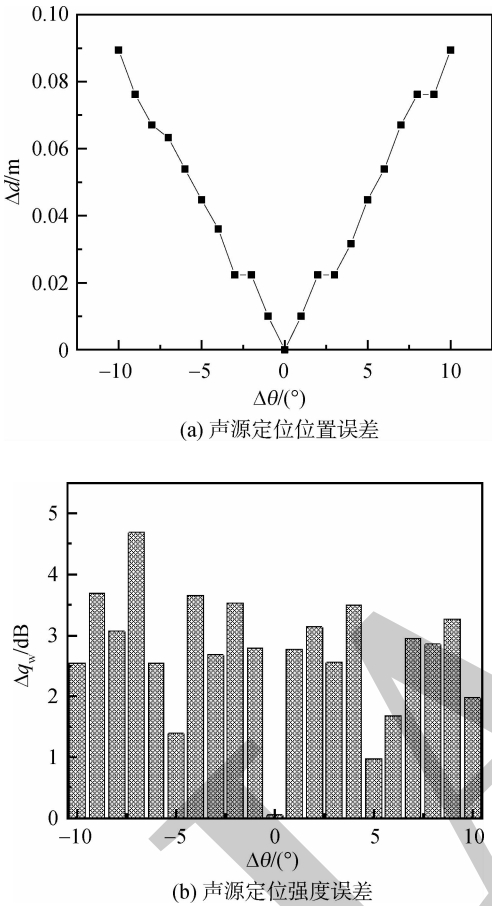


图 4 角度偏差引起的声源定位误差
Fig. 4 Sound source localization error caused by angle deviation

4 x 轴向偏移偏差引起的定位误差

图 5 为 x 轴向偏移偏差为 0.03 m 时的波束成形结果和 DAMAS 结果。在图 5(a)的波束成形结果中,声源发生斜向左上方偏移,其中包含径向定位位置误差和周向定位位置误差;声源定位位置偏移方向朝向 x 轴负方向,与阵列偏移方向相反。在图 5(b)的 DAMAS 结果中,阵列 x 轴向偏移偏差造成较大反卷积迭代残差,由此产生一定的定位强度误差。此现象是由于 x 轴向偏移偏差,造成使用无偏差阵列坐标计算得到的点扩散函数(PSF)与实际声源传播的点扩散函数产生较大差异。

图 6 为声源定位误差随 x 轴向偏移偏差的变

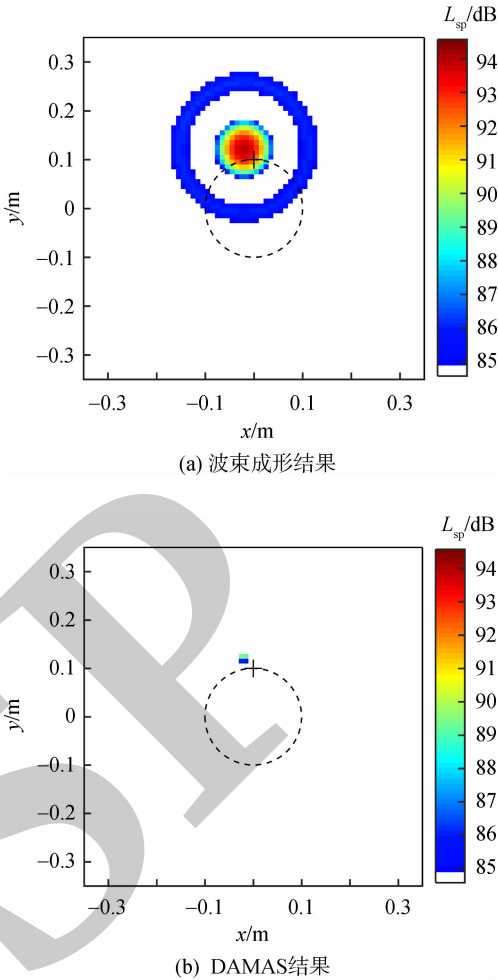
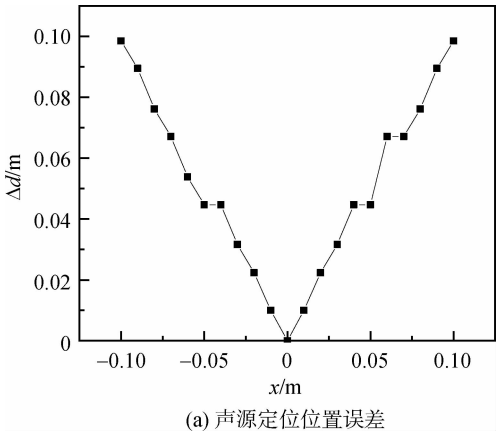


图 5 x 轴向偏移偏差为 0.03 m 时引起的声源定位误差
Fig. 5 Sound source localization error under x -axis offset deviation of 0.03 m

化曲线, x 轴向偏移偏差设置范围为 $-0.1\sim 0.1$ m。在图 6(a)中,声源定位位置误差随着 x 轴向偏移量绝对值的增加而近似线性增长,且增长的幅度大致与偏移偏差绝对值的增长的幅度大致相同,最大定位位置误差为 0.098 m。并且绝对值相同的正负 x 轴向偏移偏差引起相等的声源定



(a) 声源定位位置误差

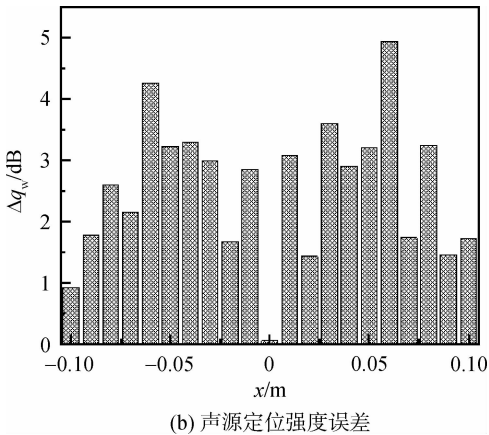


图 6 x 轴向偏移偏差引起的声源定位误差
Fig. 6 Sound source localization error caused by x -axis offset deviation

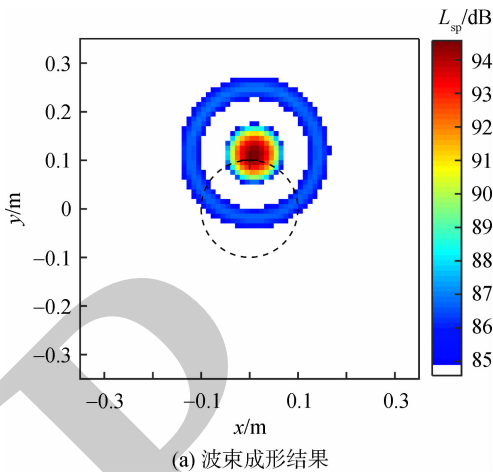
位位置误差。在图 6(b)中,声源定位强度误差随着 x 轴向偏移偏差随机变化,但是即使较小的 x 轴向偏移偏差也会造成较大强度误差。在 x 轴向偏移偏差为 $-0.1 \sim 0.1$ m 的范围内,最小定位强度误差为 0.91 dB,最大为 4.94 dB。

5 z 轴向偏移偏差引起的定位误差

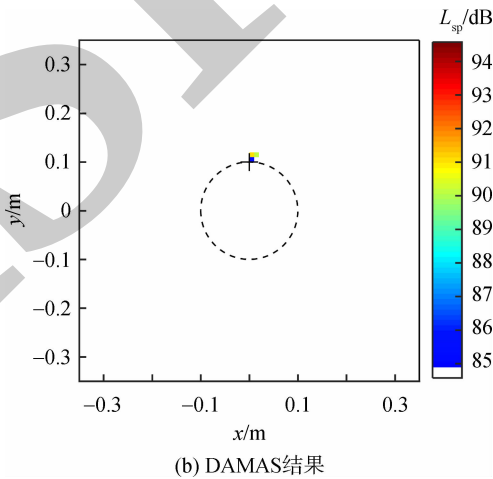
图 7 和图 8 分别为 z 轴向偏移偏差量为 0.08 m 和 -0.08 m 时对应的波束成形结果和 DAMAS 结果。在图 7(a)和图 8(a)波束成形结果中,正 z 轴向偏移偏差计算得到的强度大于预设的 94 dB,负 z 轴向偏移偏差计算得到的强度小于预设的 94 dB,这是因为正 z 轴向偏移偏差使得阵列更靠近声源,进而实际采集到的声源强度偏高。负 z 轴向偏移偏差使得阵列远离了声源,进而实际采集到的声源强度偏低。在图 7(b)和图 8(b)的 DAMAS 结果中,在绝对值相同的偏移偏差量下,正偏移偏差引起的定位强度误差小于负偏移偏差。

图 9 为声源定位误差随 z 轴向偏移偏差的变化曲线, z 轴向偏移偏差范围为 $-0.1 \sim 0.1$ m。在图 9(a)中,随着 z 轴向偏移偏差从零逐渐增加,声源定位位置误差先几乎为零,然后跳跃为一个固定值,最大定位位置误差为 0.01 m。并且,绝对值相同的正负 z 轴向偏移偏差引起相等的声源定位位置误差。在图 9(b)中,声源定位强度误差的变化趋势不是随机变化。当 z 轴向偏移偏差为正值时,随着 z 轴向偏移偏差的增加,声源定位强度误差先增加再减小。当 z 轴向偏移偏差为负值时,随着 z 轴向偏移偏差的减小,声源定位强度误差先增加再减小。绝对值相同的 z 轴向偏移偏

差,负 z 轴向偏移偏差比正 z 轴向偏移偏差引起更大的声源定位强度误差。在 z 轴向偏移偏差为 $-0.1 \sim 0.1$ m 的范围内,声源定位强度误差最小为 0.81 dB,最大为 4.51 dB。

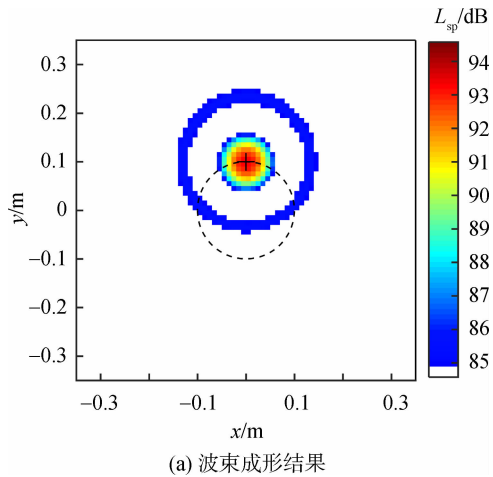


(a) 波束成形结果



(b) DAMAS结果

图 7 z 轴向偏移偏差为 0.08 m 时引起的声源定位误差
Fig. 7 Sound source localization error under z -axial installation offset of 0.08 m



(a) 波束成形结果

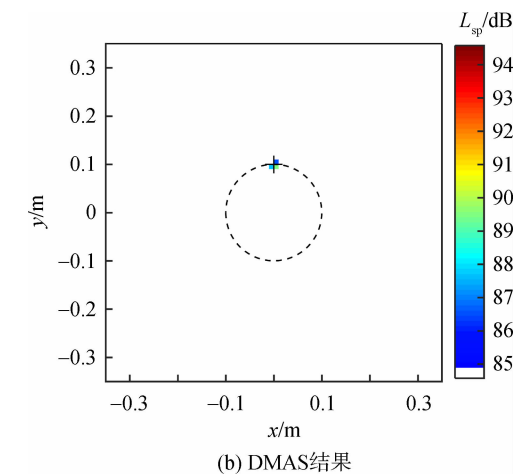


图 8 z 轴向偏移偏差为 -0.08 m 时引起的声源定位误差
Fig. 8 Sound source localization error under z -axis offset deviation of -0.08 m

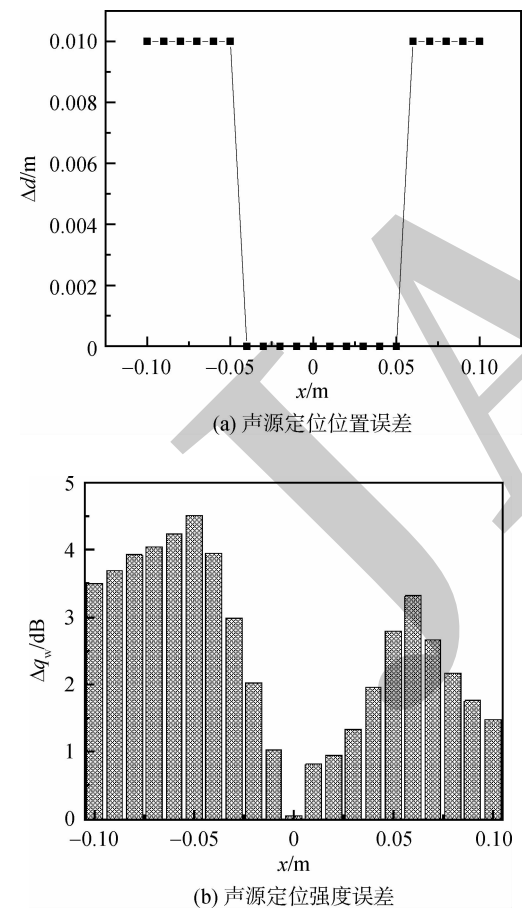


图 9 z 轴向偏移偏差引起的声源定位误差
Fig. 9 Sound source localization error caused by z -axis offset deviation

6 讨 论

本文探索了 3 种常见的阵列安装偏差类型引起的声源定位位置和强度误差。本文的出发点是

为学术界和工程界提供一种探索阵列安装偏差引起旋转声源定位误差的分析方法,进而为麦克风阵列在实际应用中控制测量误差提供指导。相关的一些问题将在本章中进行讨论。

本文研究对象是阵列安装过程中的各种安装偏差,这些安装偏差在实验过程中具有很大不确定性,无论是偏差类型还是偏差量的大小。如果进行实验研究,很难确保实验中只存在所研究的偏差类型,并且很难保证设置偏差量的精度,这些都会导致实验结果无法用于讨论阵列安装偏差引起的声源定位误差。为了避免这些实验中实际存在的困难,本文首先选用数值方法。

本文算例结果给出的定位位置误差是绝对误差,为了更方便于工程使用,需要给出无量纲的绝对误差。但是目前还未找到比较合适的用于无量纲的位置和强度的特征距离和特征强度参数,这将是未来研究中的一个方向。

本文目前研究了单一的安装偏差类型引起的声源定位误差。在实际测量中,阵列偏差类型更多的是这些偏差类型的组合。关于组合偏差类型引起的声源定位误差,在将来的研究中可以深入进行。

7 结 论

本文研究了常见的 3 种阵列安装偏差引起的声源定位误差,得出以下结论:

1) 声源定位位置误差随着角度偏差的增大而线性增大,并且,绝对值相同的正负角度偏差引起声源定位位置误差基本相等。角度偏差引起的定位强度误差呈现随机分布,即使较小的角度偏差也会引起 DAMAS 迭代质量下降造成定位强度误差,在角度偏差为 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 范围内,最大定位位置误差为 0.089 m ,最小定位强度误差为 0.97 dB ,最大为 4.69 dB 。

2) x 轴向偏移偏差引起的定位位置误差随着偏移偏差的增大而近似线性增大,并且增长幅度大致与偏移偏差增长幅度相当。绝对值相同的正负 x 轴向偏移偏差引起声源定位位置误差基本相等; x 轴向偏移偏差引起的定位强度误差呈现随机分布,即使较小的偏移量也会引起较大的定位强度误差,在 x 轴向偏移偏差为 $-0.1\sim 0.1\text{ m}$ 范围内,最大定位位置误差为 0.098 m ,最小定位强度误差为 0.91 dB ,最大为 4.94 dB 。由于阵列的对称特性,以上结论同样适用于阵列存在 y 轴向偏移偏差情况。

3) z 轴向偏移偏差引起的定位误差随着偏移偏差的增大先几乎为零,然后跳跃为一个固定值。并且,绝对值相同的正负 z 轴向偏移偏差引起相等的声源定位位置误差。当 z 轴向偏移偏差为正值时,随着 z 轴向偏移偏差的增加,声源定位强度误差先增加再减小。当 z 轴向偏移偏差为负值时,随着 z 轴向偏移偏差的减小,声源定位强度误差先增加再减小。绝对值相同的 z 轴向偏移偏差,负 z 轴向偏移偏差比正 z 轴向偏移偏差引起更大的声源定位强度误差。在 z 轴向偏移偏差为 $-0.1\sim 0.1\text{ m}$ 范围内,最大定位位置误差为 0.01 m ,定位强度误差最小为 0.81 dB ,最大为 4.51 dB 。

本研究可为麦克风阵列在实际应用中控制测量误差提供指导。

参考文献:

[1] MICHEL U. History of acoustic beamforming[R]. Berlin: the 1st Berlin Beamforming Conference,2006.

[2] 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,2006,294(4/5):856-879.

[3] BROOKS T F,HUMPHREYS W M. Extension of DAMAS phased array processing for spatial coherence determination (DAMAS-C)[R]. AIAA-2006-2654,2006.

[4] SIJTSMA P. CLEAN based on spatial source coherence [J]. International Journal of Aeroacoustics,2007,6(4):357-374.

[5] MA Wei,LIU Xun. DAMAS with compression computational grid for acoustic source mapping [J]. Journal of Sound and Vibration,2017,410:473-484.

[6] MA Wei,LIU Xun. Improving the efficiency of DAMAS for sound source localization via wavelet compression computational grid[J]. Journal of Sound and Vibration,2017,395:341-353.

[7] MA Wei,LIU Xun. Compression computational grid based on functional beamforming for acoustic source localization

[J]. Applied Acoustics,2018,134:75-87.

[8] SARRAD E. A fast signal subspace approach for the determination of absolute levels from phased microphone array measurements[J]. Journal of Sound and Vibration,2010,329(9):1553-1569.

[9] DOUGHERTY R P. Functional beamforming for aeroacoustic source distributions[R]. AIAA-2014-3066,2014.

[10] HUMPHREYS W,BROOKS T,HUNTER W,et al. Design and use of microphone directional arrays for aeroacoustic measurements[R]. AIAA 98-0471,1998.

[11] ARCONDOULIS E,LIU Yu. An iterative microphone removal method for acoustic beamforming array design[J]. Journal of Sound and Vibration,2019,442:552-571.

[12] SIJTSMA P,OERLEMANS S,HOLTHUSEN H. Location of rotating sources by phased array measurements [R]. AIAA-2001-2167,2001.

[13] 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.

[14] 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.

[15] TOTTH B,KALMAR-NAGY T,VAD J. Rotating beamforming with uneven microphone placements[R]. Berlin: the 6th Berlin Beamforming Conference,2018.

[16] POLETTI M A. Series expansions of rotating two and three dimensional sound fields[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,2010,128(6):3363-3374.

[17] POLETTI M A,TEAL P D. Comparison of methods for calculating the sound field due to a rotating monopole[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,2011,129(6):3513-3520.

[18] SIJTSMA P. Phased array beamforming applied to wind tunnel and fly-over tests[R]. Society of Automotive Engineers,SAE Technical Paper 2010-36-0514,2010.

[19] DOUGHERTY R P. Beamforming in acoustic testing[M]. Berlin:Springer Berlin Heidelberg,2002.

(编辑:王碧珺)