

任意构型传声器阵列声源定位方法

贺谦^{1,2}, 韩凯^{1,2}, 冯建民^{1,2}, 樊俊铃^{1,2}

(1. 中国飞机强度研究所, 710068, 西安; 2. 全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室, 710068, 西安)

摘要: 针对飞机结构静力/疲劳试验中,通过准确定位结构异常声响及时发现结构损伤的实际需求,结合试验现场设备多、环境复杂的特点,提出了考虑复杂应用环境的任意构型传声器阵列声源定位方法。该方法首先通过任意布设传声器获取已知坐标的声源信号,建立传声器坐标标定方程组,采用优化算法进行方程组求解,确定任意布设传声器的空间坐标;随后,将广义互相关法和信号端点检测法相结合计算不同传声器之间的时差,实现声源定位。在此基础上,建立了一套声源定位流程。对该方法进行了试验验证,结果表明:该方法能够在传声器任意布设的情况下,实现声源的空间定位;传声器的空间坐标标定误差为毫米级,声源定位误差为厘米级,达到了飞机结构静力/疲劳试验中异常声源定位的精度要求;与现有的声源定位方法相比,该方法能够实现根据试验现场具体情况任意布设传声器,更加适用于飞机结构静力/疲劳试验复杂环境下的异常声响定位。

关键词: 声源定位;传声器阵列;任意构型;静力试验;疲劳试验

中图分类号: V216.5 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202004023 **文章编号:** 0253-987X(2020)04-0186-07



OSID 码

A Sound Source Localization Method for Microphone Array with Arbitrary Configuration

HE Qian^{1,2}, HAN Kai^{1,2}, FENG Jianmin^{1,2}, FAN Junling^{1,2}

(1. Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710068, China; 2. Key Laboratory of Aviation Science and Technology on Full Scale Aircraft Structure Static and Fatigue Strength, Xi'an 710068, China)

Abstract: It is significant to locate abnormal sound rapidly and accurately in aircraft structure static/fatigue test for structural damage detection. A sound source localization method for microphone array with arbitrary configuration is presented considering complicated environment of aircraft structure static/fatigue test. The method obtains a sound source signal with known coordinates by microphones with arbitrary configuration, and the calibration equations of microphone coordinates are established and solved by an optimization method to determine microphone positions with arbitrary configuration. A generalized cross-correlation method combined with the signal endpoint detection method on the basis of the time delay of arrival (TDOA) algorithm is employed to reduce TDOA error from different microphones, and a sound source localization technological process is built. The method is validated by locating three sound sources in laboratory environment. Results show that sound source localization is realized by the method even when microphones are arrayed arbitrarily. The calibration accuracy of microphone position coordinates is at millimeter-level, and the accuracy of sound source localization is at centimeter-level. The results meet the accuracy level requirement of sound source localization in

complex environment of aircraft structure static/fatigue test. Compared with the existing sound source localization method, the proposed method can realize arbitrary configuration of microphones according to the environment, and is more suitable to sound source localization in complicated environment of aircraft structure static/fatigue test.

Keywords: sound source localization; microphone array; arbitrary configuration; static test; fatigue test

在飞机结构静力/疲劳试验中,可能会出现铆钉断裂、蒙皮撕裂等结构损伤。伴随这些损伤,飞机结构会发出异常的响声。试验中能够准确、快速定位异常声响位置,在提供试验决策支持、及时发现试验风险等方面具有非常重要的意义。

采用阵元坐标相对固定传声器阵列确定声源位置是目前工程常用的声源定位方法。国内外科研人员已经在阵列构型设计、定位算法等方面取得了大量的研究成果^[1-5]。但对于飞机结构静力/疲劳试验而言,由于现场大量的试验设备,常规传声器阵列很难布设到靠近考核部位的位置,加上试验现场背景噪声和混响的影响,造成采集到的声音信号信噪比低,异常声源的定位精度不高^[6-7]。根据试验现场具体情况布设传声器的方式具有更强的适用性,但这种传声器布设方式具有明显的任意性。针对任意构型传声器阵列声源定位方法,国内外的相关研究还不多见^[8-9],因此以任意构型传声器阵列为对象,开展声源定位方法研究,对于实现飞机结构静力/疲劳试验中的异常声源快速定位,以及提高传声器阵列适用性方面具有显著的工程意义。

本文根据飞机结构静力/疲劳试验的环境特点,从声学定位的基本原理出发,形成一种任意构型传声器阵列声源定位方法,以满足飞机结构静力/疲劳试验复杂环境下传声器阵列应用的特殊需求,为实现飞机结构静力/疲劳试验中的异常声源准确、快速定位提供技术支持。

1 任意构型传声器坐标标定

采用阵元分布具有明显任意性特征的传声器阵列实现声源准确定位,首先需要确定任意布设传声器的空间坐标。

对于飞机结构静力/疲劳试验中的异常声源定位,其误差达到厘米级是可以接受的。考虑声源定位过程中阵元坐标标定误差的传递,以及背景噪声、混响等因素引起的定位误差,传声器阵列的阵元坐标标定误差应达到毫米级。

考虑一个包括 n 个阵元的传声器阵列,各阵元

坐标分别为 $(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n$ 。首先固定第一个传声器作为参考传声器,该传声器的坐标可以通过测量设备精确标定。为了简单起见,可以将其作为坐标原点。有一个尺寸足够小但能够发出高声强的声源,将其近似为点声源。以标定第 2 个传声器的坐标 (x_2, y_2, z_2) 为例,为了确定坐标 (x_2, y_2, z_2) ,至少需要 3 个独立的方程。将声源放置在 3 个不同的位置,分别开展试验。可得如下方程组

$$\left. \begin{aligned} c\tau_{21}^{(1)} &= \sqrt{(x_2 - x_{s1})^2 + (y_2 - y_{s1})^2 + (z_2 - z_{s1})^2} - \sqrt{x_{s1}^2 + y_{s1}^2 + z_{s1}^2} \\ c\tau_{21}^{(2)} &= \sqrt{(x_2 - x_{s2})^2 + (y_2 - y_{s2})^2 + (z_2 - z_{s2})^2} - \sqrt{x_{s2}^2 + y_{s2}^2 + z_{s2}^2} \\ c\tau_{21}^{(3)} &= \sqrt{(x_2 - x_{s3})^2 + (y_2 - y_{s3})^2 + (z_2 - z_{s3})^2} - \sqrt{x_{s3}^2 + y_{s3}^2 + z_{s3}^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: (x_{si}, y_{si}, z_{si}) 表示第 i 个声源所处的位置; $\tau_{21}^{(i)}$ 表示声源处于位置 i 时,声音到达参考传声器与待标定传声器之间的时间差; c 为声速。求解方程组 (1),即可得到 (x_2, y_2, z_2) 。

在标定过程中,选择的声源位置越多,即开展标定试验的批次越多,标定结果就越准确。因此,可假定在 $p(p>3)$ 个位置开展了标定试验,可得如下的方程组

$$\left. \begin{aligned} c\tau_{21}^{(1)} &= \sqrt{(x_2 - x_{s1})^2 + (y_2 - y_{s1})^2 + (z_2 - z_{s1})^2} - \sqrt{x_{s1}^2 + y_{s1}^2 + z_{s1}^2} \\ c\tau_{21}^{(2)} &= \sqrt{(x_2 - x_{s2})^2 + (y_2 - y_{s2})^2 + (z_2 - z_{s2})^2} - \sqrt{x_{s2}^2 + y_{s2}^2 + z_{s2}^2} \\ c\tau_{21}^{(p)} &= \sqrt{(x_2 - x_{sp})^2 + (y_2 - y_{sp})^2 + (z_2 - z_{sp})^2} - \sqrt{x_{sp}^2 + y_{sp}^2 + z_{sp}^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

这是一个超定方程组,如何求解该方程组,是实现传声器坐标准确标定的核心。

对于超定方程组求解,常用的方法包括最小二乘法和优化方法。在前期的研究中发现,采用优化

方法的阵元坐标标定精度可以达到毫米级,而采用最小二乘法的标定精度仅为厘米级,无法满足飞机结构静力/疲劳试验复杂环境传声器坐标标定的精度要求^[10]。因此,本文采用优化方法进行阵元坐标标定方程组的求解。

坐标标定的优化方法是寻找能够使得时差计算值与时差真实值之间的误差达到最小的坐标。首先,构造目标函数

$$f(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p |\tau_{21}^{(i)} - \tau_{21}^{(i)}| \quad (3)$$

式中: $\tau_{21}^{(i)}$ 为时差的计算值; $\tau_{21}^{(i)}$ 是时差的真实值,是关于待标定传声器2坐标 (x_2, y_2, z_2) 的函数,即

$$\tau_{21}^{(i)} = (L_{i2} - L_{i1})/c \quad (4)$$

其中, L_{i1} 、 L_{i2} 分别为第*i*个声源到参考传声器和第2个传声器的距离,即

$$L_{i2} = \sqrt{(x_s^{(i)} - x_2)^2 + (y_s^{(i)} - y_2)^2 + (z_s^{(i)} - z_2)^2} \quad (5)$$

$$L_{i1} = \sqrt{(x_s^{(i)})^2 + (y_s^{(i)})^2 + (z_s^{(i)})^2} \quad (6)$$

考虑到时差计算值一般都非常小,因此,目标函数中时差之间的差值可以修改为距离之间的差值,即目标函数调整为

$$f(x) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p |\alpha \tau_{21}^{(i)} - \sqrt{(x_s^{(i)} - x_2)^2 + (y_s^{(i)} - y_2)^2 + (z_s^{(i)} - z_2)^2} + \sqrt{(x_s^{(i)})^2 + (y_s^{(i)})^2 + (z_s^{(i)})^2}|^2 \quad (7)$$

令函数 $f(x_2, y_2, z_2)$ 最小化,并求解这一优化问题即可。 $f(x_2, y_2, z_2)$ 在合适的边界约束下是凸函数,因此,存在全局最优解。求解这一优化问题的算法很多,常用的包括最速下降法等梯度方法^[11]。考虑到梯度方法求解过程需要计算目标函数的梯度,可能会导致一些不可预知的问题,本文采用单纯形替换法进行求解,避免复杂的梯度运算^[12]。

2 声源定位算法

常用的声源定位算法包括基于最大输出功率的可控波束形成方法、基于高分辨率谱估计的定位方法和基于时差的定位方法^[13-15]。其中,基于时差的定位方法运算量小,与前2种方法相比,更适用于音频信号持续时间短、信号强度高、有明显脉冲尖峰的声音定位^[16]。飞机结构静力/疲劳试验异常声响属于短时脉冲信号。因此,本文采用基于时差的定位方法作为声源定位算法^[17],该方法基本原理与上节所述坐标标定方法一致。

广义互相关法和信号端点检测法是目前常用的时差计算方法^[18-19]。广义互相关法对于语音信号等持续时间较长的声音信号,时差计算值精度较高。但是,飞机结构静力/疲劳试验过程中的异常声响持续时间短,且存在较为明显的噪声干扰,采用互相关法会导致异常的时差计算结果。信号端点检测法通过准确检测两路信号的端点,并根据2个端点的差得到时差计算值。为了准确确定声音信号的端点,对信号进行正确分帧是关键。帧长太大会破坏声音信号的短时平稳性,会导致时差计算的误差增大;帧长太小,时差计算受噪声的影响比较大,容易出现错误。信号端点检测法的时差计算精度为帧长的一半(通常可取16个采样点作为帧长,即精度为8个采样点);广义互相关法的时差计算精度为1个采样点。因此,理论上广义互相关法的计算精度高于信号端点检测法。

综合考虑广义互相关法和信号端点检测法在飞机结构静力/疲劳试验复杂环境中应用的优点和不足,本文将广义互相关法和信号端点检测法相结合,进行时差计算。

通过广义互相关法的计算值与信号端点检测法的计算值对比,确定最终的时差计算值。如果两者比较接近,取广义互相关法的计算值为最终结果。如果两者差别较大,则取信号端点检测法的计算值为最终结果。具体流程描述如下,流程图见图1。

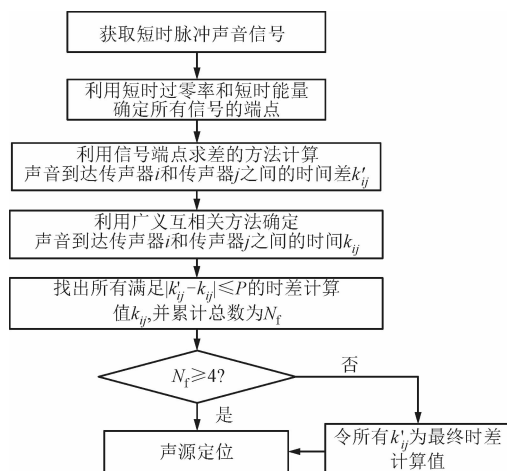


图1 声源定位流程图

(1) 获得有效信号之后,利用短时过零率和短时能量阈值来确定每个传声器获得的声音信号端点 $k_i, i=1, 2, \dots, n$,并由此计算声音到达传声器*i*和传声器*j*之间的时间差 k'_{ij} ,表达式为

$$k'_{ij} = k_j - k_i \quad (8)$$

根据传声器两两组合的原则,共可得到 $n(n-1)/2$

组时差计算值;

(2)利用广义互相关方法确定声音到达传声器*i*和传声器*j*之间的时间差*k_{ij}*,也共得到*n(n-1)/2*组时差计算值;

(3)选择可用的精确时差计算值,当

$$|k'_{ij}-k_{ij}|\leqslant P \tag{9}$$

时,保留*k_{ij}*作为可用的精确时差计算值,式中,*P*为预先设定的阈值,与采样频率有关。采样频率越高,*P*的取值可越大;

(4)如果可用的精确时差计算值数*N_i≥4*(在数学意义上,只要有 4 个精确的时延,就可以实现声源定位),则利用这些时差计算来定位声源;

(5)如果可用的精确时差计算值数*N_i<4*,则利用信号端点检测法得到的时差计算值作为精确时差计算值,开展声源定位。

3 试验验证

布设 2 种任意构型传声器阵列,每个阵列由 6 个传声器组成,如图 2、图 3 所示。首先通过坐标标定,得到各个传声器的空间坐标,随后利用得到的传声器坐标值进行声源定位,对本文任意构型传声器阵列声源定位方法进行验证。

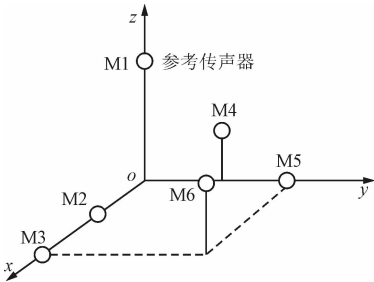


图 2 构型 1 阵列示意图

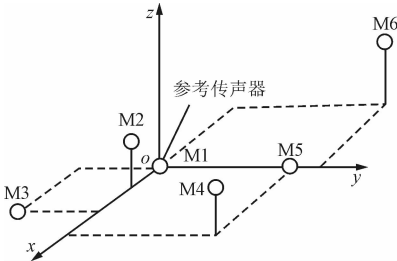


图 3 构型 2 阵列示意图

传声器坐标标定和声源定位试验在室内进行,试验环境如图 4 所示。采用 BSWA MPA201 型传声器进行声音信号收集,采样频率为 20 kHz。数据信号转换通过 PXI-4498 数据采集卡进行,采样速率为 204.8×10³ s⁻¹。



图 4 试验环境

3.1 传声器坐标标定

图 2、图 3 中各传声器的真实坐标见表 1。传声器 1 为参考传声器。选择 4 个声音布局点,坐标分别为 (3.695,1.07,0.2)、(3.695,0,0.2)、(0.85,2.69,1.5)和(0.85,2.69,0) m。传声器 2~6 为需要标定的传声器。本文以 2 个构型阵列中传声器 2 的标定过程为例,对标定方法进行验证。

表 1 各传声器坐标

传声器 编号	坐标(<i>x,y,z</i>)/m	
	构型 1	构型 2
M1	(0,0,1.005)	(0,0,0)
M2	(0.5,0,0)	(0.905,0,0.711)
M3	(1,0,0)	(2.015,-1.682,0)
M4	(0,0.5,0.305)	(2.637,2.469,0.805)
M5	(0,1,0)	(0,2.469,0)
M6	(1,1,0.505)	(-2.637,2.637,1.386)

声源为一个直径为 3.5 cm 的球形音箱,采样频率为 100 kHz。针对 2 种构型阵列,在声音布局点 (3.695,1.07,0.2) m 分别开展 34 次测量,分别得到 34 个时差计算值。利用均值 μ_2 和标准差 σ_2 进行野值剔除,偏离均值上下各一个标准差的区间内就是应该保留的样本,超出这一区间的均视为野值。34 个时差计算值的均值和标准差分别为

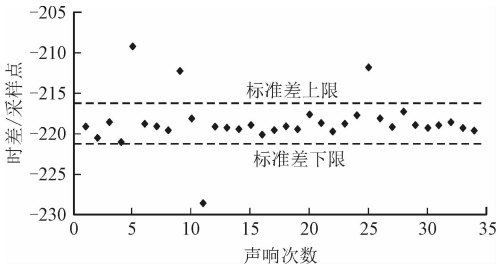
$$\mu_2=\frac{1}{34}\sum_{k=1}^{34}\tau_{21}^{(k)} \tag{10}$$

$$\sigma_2=\sqrt{\frac{1}{34-1}\sum_{k=1}^{34}(\tau_{21}^{(k)}-\mu_2)^2} \tag{11}$$

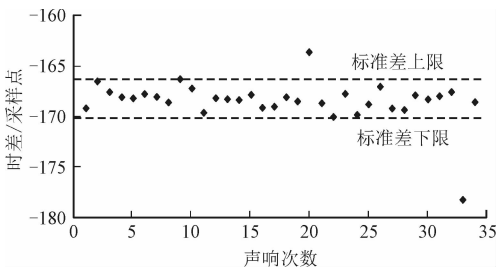
式中, $\tau_{21}^{(k)}$ (*k*=1,2,⋯,34)为传声器 2 与参考传声器之间的时差计算值。

利用采样点数表示时差计算结果。对布局点 (3.695,1.07,0.20) m 处的时差计算结果如图 5 所

示,在 2 条虚线之外的点就是被剔除的野值。通过构型 1 阵列得到的数据中共剔除 4 组野值。取剩余时差计算值的均值作为最终的时差计算值,计算结果为-218.616 5 采样点。通过构型 2 阵列得到的数据中共剔除 2 组野值。取剩余时差计算值的均值作为最终的时差计算值,计算结果为-168.460 8 采样点。



(a)构型 1 阵列



(b)构型 2 阵列

图 5 布局点(3.695,1.07,0.20) m 处的时差计算结果

分别对其他 3 个声源布局点的时差计算值进行野值剔除,得到所有声源布局点的时差计算结果,如表 2 所示。

表 2 对应的时差计算结果

声源布局点坐标 (x,y,z)/m	时差/采样点	
	构型 1 阵列	构型 2 阵列
(3.695,1.07,0.2)	-218.616 5	-168.460 8
(3.695,0,0.2)	-212.652 3	-145.668 2
(0.85,2.69,1.5)	-178.712 2	-69.753 8
(0.85,2.69,0)	-179.623 9	-98.365 6

根据测量得到的时差计算值,利用优化求解方法来标定传声器坐标,计算精度控制为 10^{-3} ,得到构型 1 阵列传声器 2 的标定结果为(0.506 5,-0.008 9,0.009 2) m,构型 2 阵列传声器 2 的标定结果为(0.898 5,0.008 4,0.701 9) m。

采用同样的方法对 2 个构型阵列中传声器 3~6 的坐标进行标定,标定结果如表 3、表 4 所示。

可以看到,2 个构型阵列中所有传声器坐标在 x,y,z 方向上的标定结果都比较准确,误差控制在

毫米级,达到了飞机结构静力/疲劳试验对传声器空间坐标标定精度的要求。

表 3 构型 1 阵列各传声器坐标标定结果

传声器 编号	坐标(x,y,z)/m	
	真实	标定
M2	(0.5,0,0)	(0.506 5,-0.008 9,0.009 2)
M3	(1,0,0)	(0.993 1,-0.006 7,-0.006 1)
M4	(0,0.5,0.305)	(-0.003 8,0.494 2,0.309 3)
M5	(0,1,0)	(-0.006 5,0.991 2,-0.008 5)
M6	(1,1,0.505)	(1.007 1,0.992 7,0.498 6)

表 4 构型 2 阵列各传声器坐标标定结果

传声器 编号	坐标(x,y,z)/m	
	真实	标定
M2	(0.905,0,0.711)	(0.898 5,0.008 4,0.701 9)
M3	(2.015,-1.682,0)	(2.020 6,-1.674 1,0.009 6)
M4	(2.637,2.469,0.805)	(2.630 1,2.476 1,0.813 8)
M5	(0,2.469,0)	(0.008 8,2.463 1,0.006 4)
M6	(-2.637,2.637,1.386)	(-2.640 9,2.643 3,1.380 1)

3.2 声源定位

在完成 2 个任意构型阵列传声器坐标标定后,分别利用这 2 个阵列进行声源定位算法验证。布设 3 个声源点,坐标分别为(2.80,1.025,0.61)、(3.835,0.52,0.61)和(4.87,0.34,0.61) m,如表 5 所示。发声设备与传声器坐标标定验证中相同。在每个声源点进行 20 次定位试验,验证本文定位算法的成功率和精度。

表 5 声源点实际坐标

声源点	坐标(x,y,z)/m	径向距离/m
1	(2.800 0,1.025 0,0.610 0)	3.043
2	(3.835 0,0.520 0,0.610 0)	3.918
3	(4.870 0,0.340 0,0.610 0)	4.920

通过 2 个构型阵列分别对声源点 1 的 20 次定位试验全部成功,成功率为 100%。所有试验都是采用广义互相关方法进行定位。 x,y,z 方向的误差如表 6、表 7 所示。由表 6、表 7 可见,构型 1 阵列的最大定位误差为 3 cm,构型 2 阵列的最大定位误差为 5 cm,3 个方向误差标准差和均值都非常小,达到了飞机结构静力/疲劳试验异常声源定位的精度要求。

在声源点 2,2 个构型阵列分别进行的 20 次定位试验全部成功,成功率为 100%。构型 1 阵列和构型 2 阵列分别有 13 次和 16 次试验采用广义互相

关方法进行定位。 x 、 y 、 z 方向的误差如表 8、表 9 所示。由表 8、表 9 可见,构型 1 阵列的最大定位误差为 9 cm,构型 2 阵列的最大定位误差为 8 cm,均达到了飞机结构静力/疲劳试验异常声源定位的精度要求。

表 6 声源点 1 定位结果(构型 1)

方向	误差均值/m	标准差/m	最大误差/m	最小误差/m
x	0.013 2	0.015 0	0.029 3	0.001 1
y	0.010 7	0.009 1	0.016 0	0.002 7
z	0.011 3	0.008 6	0.019 0	0.001 5

表 7 声源点 1 定位结果(构型 2)

方向	误差均值/m	标准差/m	最大误差/m	最小误差/m
x	0.016 5	0.028 4	0.054 0	0.002 0
y	0.004 7	0.010 1	0.026 0	0.001 0
z	0.020 9	0.009 7	0.04 50	0.005 0

表 8 声源点 2 定位结果(构型 1)

方向	误差均值/m	标准差/m	最大误差/m	最小误差/m
x	0.057 5	0.063 2	0.063 3	0.051 2
y	0.063 9	0.059 5	0.091 0	0.037 5
z	0.038 7	0.015 6	0.060 8	0.014 3

表 9 声源点 2 定位结果(构型 2)

方向	误差均值/m	标准差/m	最大误差/m	最小误差/m
x	0.053 0	0.063 2	0.081 0	0.020 9
y	0.019 8	0.009 5	0.040 0	0.008 0
z	0.027 2	0.009 8	0.041 0	0.002 0

相对于声源点 1,2 个构型阵列的定位误差有所增加,且分别出现了 7 次和 4 次试验采用信号端点检测方法进行定位的现象,这说明当声源离原点距离增加时,相邻传声器信号之间的广义互相关质量有所下降。

在声源点 3,构型 1 阵列有 16 次定位试验成功,构型 2 阵列有 18 次定位试验成功,成功率分别为 80%、90%。构型 1 阵列和构型 2 阵列分别有 13 次和 15 次试验采用广义互相关方法进行定位。 x 、 y 、 z 方向的误差如表 10、表 11 所示。由表 10、表 11 可见,随着声源与传声器阵列距离增大,无论是定位精度还是成功率,都出现了明显下降,其中构型 1 阵列的最大定位误差为 18 cm,构型 2 阵列的最大定位误差为 16 cm。虽然此时定位误差仍在飞机结构静力/疲劳试验异常声源定位的误差范围内,但却基本到了误差上限,若继续增大声源点和传声器阵列的径向距离,定位误差将不符合要求。因此,在飞

机结构静力/疲劳试验中,传声器与监控部位的距离不应超过 5 m,同时可通过增加传声器的方式,提高定位精度。

表 10 声源点 3 定位结果(构型 1)

方向	误差均值/m	标准差/m	最大误差/m	最小误差/m
x	0.107 7	0.099 5	0.179 2	0.026 5
y	0.088 1	0.010 6	0.105 5	0.063 7
z	0.062 1	0.015 3	0.115 0	0.020 6

表 11 声源点 3 定位结果(构型 2)

方向	误差均值/m	标准差/m	最大误差/m	最小误差/m
x	0.101 8	0.120 3	0.157 0	0.014 0
y	0.031 6	0.057 2	0.087 0	0.022 6
z	0.016 1	0.033 9	0.065 0	0.012 0

通过上述任意布设传声器空间坐标标定以及声源定位验证及分析表明,本文提出的任意构型传声器阵列声源定位方法能够实现声源的空间定位,定位精度为厘米级,达到了飞机结构静力/疲劳试验异常声源定位的精度要求。同时,应保证传声器与考核部位距离在 5 m 以内,以确保定位精度。

4 结 论

针对飞机结构静力/疲劳试验中异常声源定位的实际需求和试验环境复杂的特点,开展了声源定位方法研究。建立了任意布设传声器坐标标定方法和声源定位算法流程,形成了任意构型传声器阵列声源定位方法。通过验证表明,该方法能够实现现在传声器任意布设的情况下,实现声源的空间定位。采用该方法,传声器空间坐标的标定误差为毫米级,声源定位误差为厘米级,达到了飞机结构静力/疲劳试验中异常声源定位的精度要求,为实现飞机结构异常声源准确、快速定位奠定了技术基础。

飞机结构静力/疲劳试验环境较为复杂,试验设备产生的背景噪声和空间混响对声源定位精度的影响是不可回避的问题。另外,试验过程中有可能会

出现多处结构异常声响同时出现的情况。后续,还需要在考虑试验背景噪声、空间混响对时延计算精度的影响以及多声源同时定位等方面进行进一步的研究,实现本文方法的工程应用。

参考文献:

[1] VALIN J M, MICHAUD F, ROUAT J, et al. Robust sound source localization using a microphone array on a mobile robot [C]//2003 IEEE/RSJ International

- Conference on Intelligent Robots and Systems, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1228-1233.
- [2] 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.
 - [3] LECLERE Q, PEREIRA A, FINEZ A, et al. Indirect calibration of a large microphone array for in-duct acoustic measurements [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 376: 48-59.
 - [4] TARATORIN A A, TUPOV V B. Detection technique of acoustical center of noise source [J]. Thermal Engineering, 2015, 62(7): 480-483.
 - [5] 梁国龙, 韩博, 孙向前. 多途条件下近场声源三维被动定位 [J]. 兵工学报, 2014, 35(3): 326-332.
LIANG Guolong, HAN Bo, SUN Xiangqian. Three-dimensional passive localization of near-field source in a multipath environment [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(3): 326-332.
 - [6] 贺谦, 冯建民, 孙志强, 等. 传声器阵列定位精度影响因素分析研究 [J]. 工程与试验, 2016, 56(3): 30-32.
HE Qian, FENG Jianmin, SUN Zhiqiang. Study on influencing factor for sound localization precision of microphone array [J]. Engineering and Test, 2016, 56(3): 30-32.
 - [7] FAN Rongping, SU Zhongqing, MENG Guang, et al. Application of sound intensity and partial coherence to identify interior noise sources on the high speed train [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 46(2): 481-493.
 - [8] KUANG Yubin, BURGESS S Burgess, TORSTENSON A, et al. A complete characterization and solution to the microphone position self-calibration problem [C] // IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 3875-3879.
 - [9] SCHWARTZ O, PLINGE A, HABETS E A P, et al. Blind microphone geometry calibration using one reverberant speech event [C] // IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustic. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 131-135.
 - [10] 贺谦, 孙志强, 冯建民. 传声器阵列阵元坐标标定精度影响因素分析研究 [J]. 工程与试验, 2018, 58(3): 61-64.
HE Qian, SUN Zhiqiang, FENG Jianmin. Microphone position calibration precision analysis of random array [J]. Engineering and Test, 2018, 58(3): 61-64.
 - [11] 陈妮, 何华光, 叶进. 一种无线传感器网络环境下多机器人协作式声源定位方法 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 52-56.
CHEN Ni, HE Huaguang, YE Jin. A method of cooperative multi-robot sound source localization in wireless sensor networks environment [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(3): 52-56.
 - [12] SILVERMAN H F, YU Ying, SACHAR J M, et al. Performance of real-time source-location estimators for a large-aperture microphone array [J]. Transactions on Speech and Audio Processing, 2005, 13(4): 593-606.
 - [13] 柯昆. 声源定位技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010: 37-39.
 - [14] WANG Xun, QUOST B, CHAZOT J D, et al. Iterative beamforming for identification of multiple broadband sound sources [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 365: 260-275.
 - [15] CHU Zhigang, YANG Yang, HE Yansong. Deconvolution for three-dimensional acoustic source identification based on spherical harmonics beamforming [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 344: 484-502.
 - [16] YAN Shuying, CHEN Pin. Research and realization of sound source localization algorithms based on the time difference of arrival [J]. Journal of Information & Computational Science, 2015, 12(16): 5995-6003.
 - [17] WU S F, ZHU Na. Passive sonic detection and ranging for locating sound sources [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133(6): 4054-4064.
 - [18] 贺谦, 冯建民, 韩凯. 飞机结构强度试验异常声源信号提取方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(5): 312-315.
HE Qian, FENG Jianmin, HAN Kai. Exceptional sound sources signal extraction in aircraft structural strength test [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(5): 312-315.
 - [19] 蒋相斌, 白宗龙, 孙金玮. 强混响条件下基于广义互相关的声源定位算法改进 [J]. 计测技术, 2018, 38(1): 43-47.
JIANG Xiangbin, BAI Zonglong, SUN Jinwei. An improvement for accuracy of acoustic source location based on general cross-correlation in high reverberation environment [J]. Metrology and Measurement Technology, 2018, 38(1): 43-47.

(编辑 刘杨)