



基于 DAMAS2 修正算法的旋转声源定位识别方法

王 枭¹, 陈永艳¹, 高志鹰^{1,2}, 张翠青^{1,3}, 代元军^{2,4}, 汪建文^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 风能太阳能利用技术省部共建教育部重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古机电职业技术学院电气工程系, 内蒙古 呼和浩特 010051; 4. 新疆工程学院电力工程系, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘 要: 针对常规束形成声源识别技术分辨率低、未考虑声源旋转运动造成的识别误差等问题, 推导得到 DAMAS2 修正算法。该方法在原本的静止框架中加入转速, 得到修正的指向矢量与波束形成修正结果, 随后结合波束形成修正结果建立阵列点传播函数与真实声源位置之间的卷积关系, 最终通过迭代求解获得真实声源位置。首先通过数值模拟构建两个频率及幅值均一致的对称点声源, 对比分析常规波束形成算法与 DAMAS2 修正算法的识别效果, 然后结合激光测速原理及波束形成测试理论进行旋转声源实验研究。结果表明: DAMAS2 修正算法主瓣宽度小、虚假声源少, 不仅可以识别出旋转声源的径向位置, 而且能得到运动声源某一时刻的周向位置, 能够更精确地定位识别旋转声源。

关键词: 声学; 声源识别; 旋转噪声; 波束形成; 反卷积

中图分类号: TB52

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)09-0109-06

Locating and recognition method of rotating sound source based on DAMAS2 correction algorithm

WANG Xiao¹, CHEN Yongyan¹, GAO Zhiying^{1,2}, ZHANG Cuiqing^{1,3}, DAI Yuanjun^{2,4}, WANG Jianwen^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy of the Ministry of Education, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Department of Electrical Engineering, Inner Mongolia Technical College of Mechanics & Electrics, Hohhot 010051, China; 4. Department of Electric Power Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830091, China)

Abstract: To address the problem of low resolution of conventional beamforming sound source recognition technology and poor recognition of rotating sound sources, DAMAS2 correction algorithm was introduced. This method applied rotation speed to the original stationary frame so that the correction result of directional vector and beamforming was obtained. Then, the convolution relationship between the array point propagation function and the position of real sound source was established by combining the beamforming correction results. Finally, the real sound source position was obtained by iterative solution. Recognition effects of the

收稿日期: 2018-03-02; 收到修改稿日期: 2018-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(51366010); 风能太阳能利用技术省部共建教育部重点实验室开放基金项目(201605)

作者简介: 王 枭(1992-), 男, 陕西西安市人, 硕士研究生, 专业方向为风力机气动噪声研究。

通信作者: 陈永艳(1976-), 女, 内蒙古乌兰察布市人, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事风力机气动特性研究工作。

conventional beamforming algorithm and the DAMAS2 correction algorithm were compared by establishing a symmetric point source with consistent two frequencies and amplitudes via numerical simulation, and then an experiment about rotating sound source was performed in conjunction with the principle of laser speed measurement and the theory of beamforming test. The results indicate that the DAMAS2 correction algorithm has a smaller main lobe width and fewer false sound sources. It can not only identify the radial position of the rotating sound source, but also can obtain the circumferential position of the moving sound source at a certain moment, which can locate and identify the rotating sound source more accurately.

Keywords: acoustics; sound source recognition; rotating noise; beamforming; deconvolution

0 引言

以风力机叶片为代表的旋转机械在运动过程中不可避免地产生噪声,噪声控制的关键之一就是声源定位,以声阵列为基础的波束形成技术被广泛应用于声源定位研究。旋转机械的噪声产生与传播和其运动状态有着密切关系,如低速运行中主要以机械噪声为主,而在高速运行中主要以气动噪声为主。高精度旋转声源识别技术研究的关键主要集中于提高算法分辨率与修正运动误差两个方面,常规的波束形成技术分辨率较低且未修正声源运动造成的误差。Oerlmans等^[1]基于常规波束形成技术给出了用于运动声源的修正算法,Barsikow等^[2-3]同样基于运动声源运动方式重构了麦克风接收到的信号,实现了运动声源的识别,该方法有效修正了声源运动造成的误差,但未能提高识别分辨率。Sijtsma等^[4-5]提出时域旋转波束形成技术来定位旋转声源,推导出旋转单极子声源信号在流场中的传递函数,结合波束形成技术提出了针对直升机旋翼旋转噪声的算法,但该算法在进行线性插值的过程中会造成大量的计算误差,所以未得到推广。

为了有效提高常规波束形成的识别分辨率,Brooks等^[6-7]提出基于反卷积的DAMAS算法,随后Dougherty给出DAMAS的扩展算法DAMAS2算法。Ehrenfried等^[8]分析对比了DAMAS与DAMAS2两种算法,验证了DAMAS2在计算过程中更加平稳流畅,效率更高。杨洋等^[9]研究了DAMAS2算法识别效果随迭代次数变化的规律,并在实验中验证了DAMAS2算法对于相干及不相干声源识别的有效性。Brusniak^[10]成功将DAMAS2算法运用于飞机机身噪声源的定位,Xenaki等^[11-12]通过实验验证了DAMAS2算法在三维声源识别中依然保持了较高的分辨率。DAMAS2算法在广泛的研究中已经

证明了其可以有效提高声源识别分辨率,并且具有广泛的适应性,但相关研究均在静止框架下进行,并未涉及对运动误差的修正。

本文结合运动声源重构理论与DAMAS2算法理论推导了用于旋转声源的DAMAS2修正算法,并通过数值模拟与实验分析验证了该算法的有效性。

1 声源识别原理

1.1 波束形成算法理论

常规波束形成(conventional beamforming, CBF)的基本原理是麦克风阵元由于位置不同接收到的声源信号存在时延差异,通过对各麦克风阵元输出进行加权求和反算至声源扫描面,使声源计算面上对应的真实声源的聚焦点输出量被加强,其他聚焦点输出量被衰减,从而得到声源的真实位置。

图1为测量面与声源面的位置关系示意图。测量面与声源面平行布置, O 与 O' 分别为其圆心且位于同一水平线上。 r_i 为第 i 个阵元到阵列中心的位置向量, r 是位于 A 点的声源到阵列中心的位置向量,则常规波束形成的输出可表示为

$$Y(r) = \frac{E(r)^T G E(r)^*}{e(r)^T I e(r)^*} \quad (1)$$

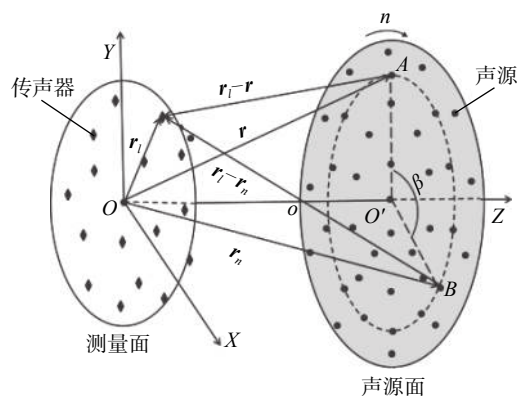


图1 声源识别示意图

其中 \mathbf{G} 为接收信号的互功率谱, \mathbf{I} 表示单位矩阵, 上标 \top 与 $*$ 分别表示矩阵的转置与共轭, $E(\mathbf{r})$ 为指向矢量, 表达式如下:

$$E(\mathbf{r}) = \frac{e^{-jk|\mathbf{r}_l - \mathbf{r}|}}{|\mathbf{r}_l - \mathbf{r}|} \quad (2)$$

1.2 DAMAS2 修正算法理论

由于旋转机械声源面存在大小为 $n(\text{r/min})$ 的转速沿顺时针方向持续运动, 所以原本位于 A 点的声源经过 Δt 时间的传播时间运动到了 B 点(图1)。 A 与 B 均为声源面上的聚焦点, 且与转速之间存在线性关系, 运动声源重构理论即基于 A 点坐标与转速求解得到重构聚焦位置 B 点坐标。设 A 点的坐标为 (x_1, y_1, l) , l 为测量面与声源面之间的距离, O' 为声源面中心点, β 为 $O'A$ 与 $O'B$ 夹角, O 点为阵列面中心位置, 坐标为 $(0, 0, 0)$, B 点的坐标为 (x_2, y_2, l) , 其中 $\beta = \Delta t \cdot n\pi/30$, 其中 $\Delta t = |\mathbf{r}_l - \mathbf{r}|/c$, 则有:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cdot \cos\beta + y_1 \cdot \sin\beta \\ y_2 = y_1 \cdot \cos\beta - x_1 \cdot \sin\beta \end{cases} \quad (3)$$

计算得到加入转速修正后的 $\mathbf{r}_n = OB = (x_2, y_2, l)$, 对应的指向矢量为

$$E(\mathbf{r}_n) = \frac{e^{-jk|\mathbf{r}_l - \mathbf{r}_n|}}{|\mathbf{r}_l - \mathbf{r}_n|} \quad (4)$$

修正后的波束形成输出为

$$Y_n(\mathbf{r}_n) = \frac{E(\mathbf{r}_n)^\top \mathbf{G} E(\mathbf{r}_n)^*}{e(\mathbf{r}_n)^\top \mathbf{I} e(\mathbf{r}_n)^*} \quad (5)$$

引入阵列点传播函数 $\text{psf}(\mathbf{r}_n/\mathbf{r}')$, \mathbf{r}' 代表声源的位置向量, 具体表达式为

$$\text{psf}(\mathbf{r}_n/\mathbf{r}') = \frac{E(\mathbf{r}_n)^\top E(\mathbf{r}')^* E(\mathbf{r}')^\top E(\mathbf{r}_n)^*}{e(\mathbf{r}_n)^\top \mathbf{I} e(\mathbf{r}_n)^*} \quad (6)$$

为了提高声源识别分辨率, 反卷积 DAMAS 算法基于常规波束形成输出结果 $Y_n(\mathbf{r}_n)$ 、阵列传播函数矩阵 \mathbf{P} 和声源真实位置 \mathbf{X} 之间的反卷积关系构建方程组:

$$Y_n(\mathbf{r}_n) = \mathbf{P}\mathbf{X} \quad (7)$$

其中 $Y_n(\mathbf{r}_n)$ 为式(5)中的修正结果, 通过高斯-赛德尔迭代算法方向求解得到分辨率更高的输出结果 \mathbf{X} 。

为了加快收敛速度、减少迭代次数, DAMAS2 算法在原 DAMAS 算法基础上引入阵列传播函数空间平移不变性的假设进行了简化, 简化后的求解步骤为:

1) 计算波数域阵列点的传播函数为: $\text{psf}(k) = \text{FFT}(\text{psf})$, k 为波数。

2) 计算常数 $p = \sum |\text{psf}|$ 。

3) 设置迭代初始值 $X^{(0)} = 0$, 带入下列计算式进行迭代计算:

$$Y_n^{(i)} = F^{-1}[F[X^{(i)}]\text{psf}\psi] \quad (8)$$

$$X^{(i+1)}(\mathbf{r}') = \max\left(X^i(\mathbf{r}') + \frac{Y_n - Y_n^i}{p}, 0\right) \quad (9)$$

其中 ψ 为高斯滤波规则化滤波函数, 表达式为

$$\psi(k_x, k_y) = \exp\left(-\ln 2 \cdot \frac{k_x^2 + k_y^2}{k_c^2}\right) \quad (10)$$

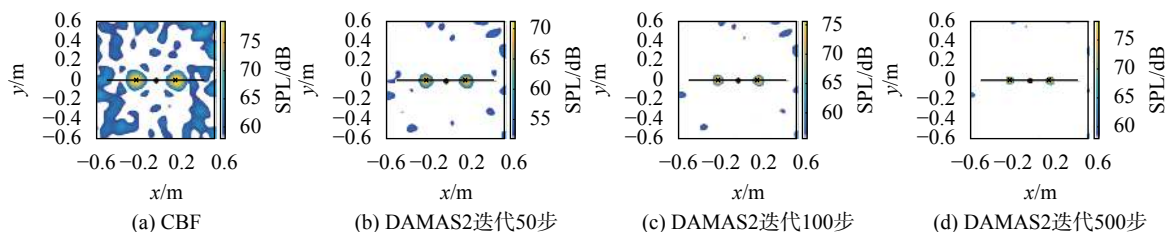
其中 k_x 与 k_y 分别代表 x 与 y 方向的波数, $k_c = h\pi/d$, d 为聚焦点间隔, h 为常数(通常取0.5)。

2 模拟分析

基于 DAMAS2 修正算法与常规波束形成算法首先进行了模拟分析, 在长宽均为 1.2 m 的矩形声源面上建立 61×61 的聚焦网格点, 点与点的间隔均为 0.02 m; 然后在距声源面 1 m 处建立模拟阵列测点模型, 模拟阵列选取 Brüel & Kjær 公司的 60 通道轮辐阵列。模拟中首先基于位置坐标、频率、强度、转速等信息重构声源并得出阵列接收到的信号, 计算声源的互功率谱; 然后根据式(5)中波束形成修正理论, 反向聚焦声源面上的各个网格点, 计算波束形成输出; 在该输出结果的基础上, 通过反向卷积计算求解得到 DAMAS2 修正算法输出后分别进行声学成像。

2.1 叶片对称声源模拟

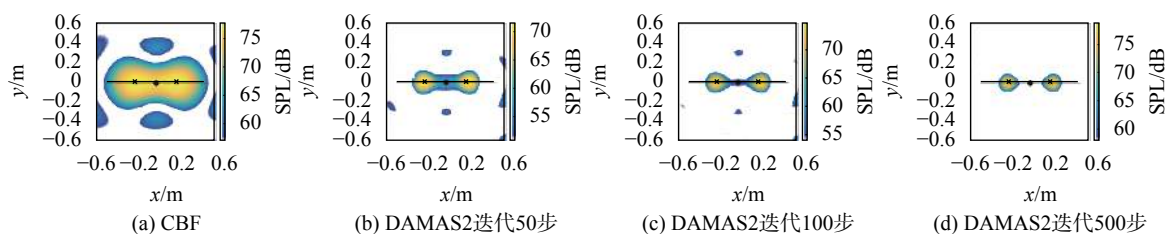
为了验证 DAMAS2 修正算法声源识别分辨率, 模拟对比了常规波束形成算法与 DAMAS2 修正算法对于静止声源的识别效果。图2为某类型对称叶片上的声源模拟识别结果, 将问题简化为位于叶片上对称分布的两个点声源, 声源分别位于声源面(0.2, 0)、(-0.2, 0)位置, 声源强度 80 dB, 频率为 5 kHz, 测量面与声源面距离取 1.5 m, 图中实线表示叶片位置, “●”表示叶片轮毂, “×”表示点源真实位置, 图中动态显示范围均取 20 dB。由于 DAMAS2 修正算法考虑了转速, 而此次模拟为静止状态, 故取其转速为 0 r/min。图2(a)为常规波束形成的成像结果, 其主瓣较宽, 且在其他位置出现大量旁瓣, 识别精度不高。对比图2其余3个图, 随着迭代次数的增加, 主瓣宽度明显变小, 旁瓣也显著减少, 迭代 500 步后的结果已经非常接近声源真实位置, 几乎看不到其他位置所产生的旁瓣, DAMAS2 修正算法的识别精度随着迭代次数的增加逐渐增加。图中常规波束形成的声源强度识别结果为 78.23 dB, DAMAS2 算

图2 对称点声源模拟 ($f=5\text{ kHz}$)

法的识别结果分别为 72.36, 75.62, 79.56 dB, 常规波束形成定位的强度误差非常小, DAMAS2 算法的强度误差在迭代 100 步内并不高, 但随着迭代次数的增加, 强度误差不断减小, 迭代 500 步后的强度误差已经小于常规波束形成。

常规波束形成的分辨率与波长成反比, 造成了其在低频段的识别效果差, 而旋转声源的频率并不局限于高频段, 所以 DAMAS2 修正算法对于低频段声源识别的表现也非常值得关注。图 3 为频率 2 kHz 的声源模拟识别结果, 声源坐标依然为 (0.2, 0)、(-0.2, 0)。图 3(a) 为常规波束形成的成像结果, 其黄色声学中心覆盖范围非常大, 两声源发生融合, 在声源面其他位置出现了较大面积的旁瓣, 已经无法清晰分辨出声源具体位置。而 DAMAS2 修

正算法的成像结果声学中心已经分离, 主瓣大幅减小, 迭代至 500 步时两声源的成像结果已经完全分离, 声源位置清晰可见, DAMAS2 修正算法声强识别误差依然呈现随迭代次数增加而减小的趋势。从图中可以发现, DAMAS2 修正算法的声学中心与真实声源位置大约有 0.02 m 的偏差, 考虑到声源面计算网格的步长为 0.02 m, 所以分析是由于在低频情况下反卷积计算解的相似性太高导致的, 但相对于常规波束形成算法定位结果, DAMAS2 算法在低频段的定位精度提高仍然非常明显。从图 2 与图 3 的识别结果直观来看, DAMAS2 修正算法迭代至 100 步后的分辨率增加已不像之前一样明显, 考虑到计算代价, 一般选取 100 步的迭代次数为宜。

图3 对称点声源模拟 ($f=2\text{ kHz}$)

2.2 旋转声源模拟

对于旋转声源, 需要在式 (3) 的计算中输入转速 n 求解修正后的聚焦点位置, 计算出修正后的位置向量 r_n , 再通过波束形成理论与 DAMAS2 算法理论进行聚焦计算, 分别得到相应输出结果后输出成像。为了减少计算时长造成的位移量过大, 模拟中的采样频率为 10 000 Hz, 采样点数为 100。图 4 为叶片上两运动点源修正后的模拟识别结果, 声源位于声源面 (-0.4, 0) 与 (0.4, 0) 处, 频率为 5 kHz, 强度 80 dB, 以顺时针旋转为正, 加入 450 r/min 转速进行旋转运动, 声源面到测试面距离取 1.5 m, 动态显示范围取 15 dB。图中虚线表示初始时刻叶片位置, 实线表示传声器接收到信号后叶片所处位置。

可以看到, 修正后的算法得到的声源位置仍然位于叶片上, 识别结果表明修正的算法可以更准确地定位旋转声源且 DAMAS2 算法具有更高的识别精度。

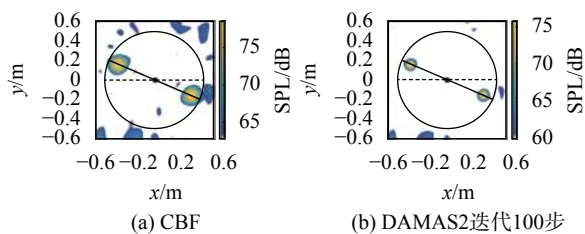


图4 旋转声源模拟

3 旋转声源实验研究

为了验证 DAMAS2 修正算法在实际旋转声源识别中的可行性, 进行了旋转机械声源定位的实验

研究。图 5 为旋转声源模拟实验台架, 主要由旋转声源面 (圆盘)、三相异步电动机、蜂鸣器等构成。实验过程中由电动机提供转速带动圆盘转动, 以 WB3509 型压电晶体蜂鸣器为声源发声体, 声源频率为 2 594 Hz, 实际声源强度为 60 dB, 试验过程中可以近似视其为一个单极子声源。圆盘周向等分为 6 份, 每条刻度线对应圆盘背面进行开槽处理, 便于安装发声器, 圆盘直径为 1.2 m, 径向刻度精度为 0.01 m。图 5(b) 为声源安装方式, 红色位置为蜂鸣器, 图 5(a) 为圆盘正面对应声源位置, 红点处进行开孔处理, 以便声音正常传播。实验采用 Brüel & Kjær 公司的 60 通道 WA-1558-W 轮辐阵列及 LAN-XI 采集系统采集信号, 然后使用 PLUSE LABSHOP 软件对采集到的时域信号进行处理, 得到频域信号及其互功率谱。计算中声源面仍然设计为长宽均为 1.2 m 的矩形, 矩形面上建立 61×61 的聚焦网格点, 点与点间隔均为 0.02 m。将处理得到的频域声压信号基于常规波束形成及 DAMAS2 修正算法理论分别对声源面网格点进行聚焦求解, 最终输出成像。试验中设圆盘垂直向下为 0° 位置, 以顺时针旋转为正, 阵列与声源相距 1.5 m, 阵列中心与圆盘轴心在同一水平线向上。声源旋转由三相异步电动机提供动力, 实验中采样频率取 8 192 Hz, 采样时间为 5 s, 计算过程中 DAMAS2 修正算法取 100 步为迭代次数。

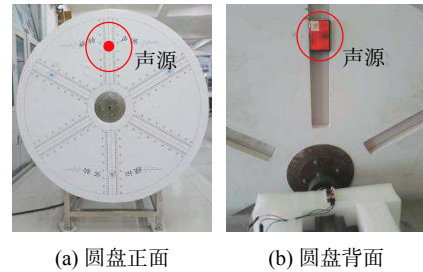


图 5 旋转声源模拟实验台

由于声源运动过程中的多普勒效应会造成信号频率与幅值处于波动中, 只取单频分析会造成误差, 所以采用 1/3 倍频程的分析方法, 将频程内的结果进行叠加。图 6 为不同位置声源旋转运动后的识别结果, 动态显示范围均取 5 dB。图中声源的运动轨迹均清晰可见, DAMAS2 修正算法旁瓣较少且拥有较清晰的声学中心, 尤其在 0.2 m 位置的声源云图中, DAMAS2 修正算法的优势更加明显, 常规波束形成算法在该位置由于较大的旁瓣干扰, 运动轨迹几乎闭合成一个完整的圆盘, 径向位置误差非常大。常规波束形成的声源强度识别结果分别为 51.47 dB 与 52.16 dB, DAMAS2 算法的声源强度识别结果分别为 47.08 dB 与 48.07 dB, 与真实声源强度有明显的误差, 造成这种情况的主要原因是旋转状态下声源的传播路径将会变大, 基于点声源的传播公式, 声压会随传播距离的增加而减小。

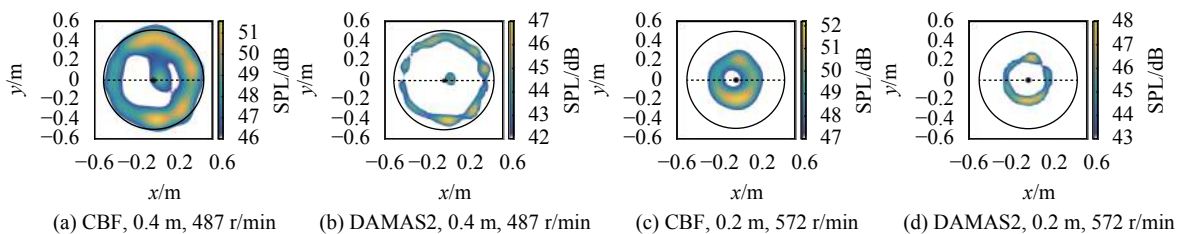


图 6 旋转声源识别结果

常规的频域波束形成分析方法主要适用于静止声源的定位, 如图 6 所示的成像结果仅能识别出旋转声源的径向位置, 所得到的频域声压在进行傅里叶变换时是 5 s 采样时间的平均结果, 频谱结果难以进行时域分析, 造成了无法准确定位声源周向 (运动方向) 位置。为了得到更准确的声源识别结果, 引入短时傅里叶变换 (STFT), 取 50 个采样点为一组离散信号片段, 每个片段包含 0.006 s 的声压信息, 对 5 s 内所有的 833 个信号片段进行能量平均, 采用矩形窗, 68% 的数据重叠率, STFT 后对应的频

率分辨率为 164 Hz。

试验过程中为了得到测量信号与声源面实时位置的对应关系, 设计了一套测速定位系统。该系统由相位标定传感器、红外避障反光膜及触发设备等组成。红外避障反光膜贴于圆盘背面, 随着圆盘的转动而运动, 标定传感器安装于台架桌面上处于静止。当圆盘旋转运动时, 标定传感器发出的激光被红外避障反光膜所反射而使触发设备受到激励开始采集数据, 从而实现数据采集与圆盘运动位置的同步, 同时可以计算出圆盘的转速。通过对转速信号进

行积分运算即可得到声源面的实时位置,提取对应位置下的时域声压信号片段进行短时傅里叶变换,将变换后的瞬时频域声压带入波束形成算法中进行计算,便可得到声源位置与旋转声源面的对应关系。

图7为图6中不同径向位置声源结合测速定位系统选取的某一段短时傅里叶频域声压分析后的结果,图中虚线为声源所在刻度线的初始位置,实线为阵列接收到信号时刻度线的位置,从图中的识别结果可以看出,声源相对于所在刻度线的

移动仍有一些滞后,考虑到转动中声音的传播路径有所波动,以及信号传输过程中的延迟等因素,这样的滞后误差是可以接受的,并且 DAMAS2 算法依然表现出更高分辨率。此时声源强度识别结果较图6中小了2~3 dB,误差并不大。但是,由于短时傅里叶变换的缺陷,为了获得较高的时间分辨率必然会导致该方法在分析过程中会造成非常高的频率分辨率,对于一些较复杂的声源识别误差会比较大。

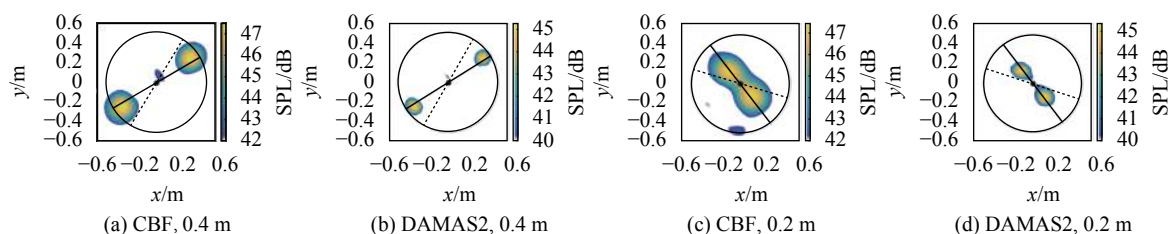


图7 测速定位系统分析结果

综上所述,结合测速定位系统及短时傅里叶变换的分析方法可以更精确地定位旋转声源的周向位置,旋转声源识别实验研究中,DAMAS2修正算法依然表现出优于常规波束形成算法的分辨率。

4 结束语

本文结合运动声源信号重构理论与 DAMAS2 算法理论,推导得到了 DAMAS2 修正算法。该算法通过重构加入转速后的位置向量,得到修正的指向矢量与波束形成修正结果,有效消除了旋转运动造成的识别误差。在波束形成修正结果的基础上基于 DAMAS2 算法理论进行反卷积计算,进一步提高了识别结果的分辨率。通过数值模拟验证了该算法对旋转声源的识别效果要好于常规波束形成算法。在实验研究中为了得到数据的时域变化规律,采用了 STFT 处理原始信号,最终的识别结果显示该方法可以更准确地定位识别旋转声源。

参考文献

- [1] OERLEMANS S, FISHER M, MAEDER T, et al. Reduction of wind turbine noise using optimized airfoils and trailing-edge serrations[J]. *Aiaa Journal*, 2009, 47(6): 1470-1481.
- [2] BARSIKOW B, III W F K. On removing the Doppler frequency shift from array measurements of railway noise[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1988, 120(1): 190-196.
- [3] BARSIKOW B. Diagnosis of noise sources from high-speed trains using the microphone-array technique[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 103(5): 3007.

- [4] SIJTSMA P, OERLEMANS S, HOLTHUSEN H. Location of rotating sources by phased array measurements[C]//Proceedings of 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2001.
- [5] SIJTSMA P. Using phased array beamforming to locate broadband noise sources inside a turbofan engine[J]. *International Journal of Aeroacoustics*, 2010, 9(3): 357-374.
- [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*, 2006, 294(4): 856-879.
- [7] DOUGHERTY R. Extensions of DAMAS and benefits and limitations of deconvolution in beamforming[C]//11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2005.
- [8] EHRENFRIED K, KOOP L. Comparison of iterative deconvolution algorithms for the mapping of acoustic sources[J]. *Aiaa Journal*, 2007, 45(7): 1584-1595.
- [9] 杨洋, 褚志刚, 江洪, 等. 反卷积 DAMAS2 波束形成声源识别研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(8): 1779-1786.
- [10] BRUSNIAK L. DAMAS2 validation for flight test airframe noisemeasurements[C]//Berlin Beamformin Conference, 2008.
- [11] XENAKI A. Improving the resolution of beamforming measurements on wind turbines[C]//Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, 2010.
- [12] XENAKI A, JACOBSEN F, FERNANDEZ-GRANDE E. Improving the resolution of three-dimensional acoustic imaging with planar phased arrays[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2012, 331(8): 1939-1950.

(编辑:商丹丹)