

基于互谱矩阵函数的多声源识别方法*

王月^{1,4}, 杨超¹, 王岩松¹, 胡定玉², 顾汝彬³

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院 上海, 201620) (2. 上海工程技术大学城市轨道交通学院 上海, 201620)
(3. 中国人民解放军 32128 部队 济南, 250000) (4. 上海杨浦职业技术学校 上海, 200093)

摘要 为解决多声源识别中的混叠问题, 提出一种基于互谱矩阵函数的多声源识别方法。首先, 对与各峰值源相关的互谱矩阵进行特征值分解, 并利用特征值和特征向量构造其函数; 其次, 在反卷积迭代过程中, 将该函数用于计算移除各峰值源后的互谱矩阵函数和输出功率; 最后, 将与各峰值源相关的干净波束和剩余功率谱叠加, 获得多声源的分布图像。仿真与实验结果表明, 该算法的输出波束主瓣窄、旁瓣低, 可有效提升传统反卷积算法的动态范围, 实现多声源的高分辨率识别。

关键词 声源识别; 波束形成; 特征值分解; 反卷积
中图分类号 TH17; TB52

引言

声源识别在振动噪声检测领域中发挥着重要作用, 如汽车变速器噪声源识别^[1]等。声源识别方法可分为近场和远场两大类。近场声全息是近场声源识别方法中的一种^[2-3]。笔者主要研究远场声源识别方法, 在其发展中, 以提升传统波束形成算法的动态范围和空间分辨率为重点, 其方向主要为反卷积算法和改进波束形成算法。

反卷积算法通过求解声源强度分布与阵列点传播函数 (point spread function, 简称 PSF) 的卷积方程, 可消除 PSF 对声源强度的影响。例如, 声源图像解卷积方法^[4] (deconvolution approach for the mapping of acoustic sources, 简称 DAMAS)、非负最小二乘法^[5] (nonnegative least-squares approach, 简称 NNLS) 以及线性规划方法^[6] 等。为了克服 DAMAS 和 NNLS 计算效率低的问题, 研究人员假设阵列点传播函数具有空间转移不变性, 提出了 DAMAS2^[7], DAMAS3^[7] 和基于快速傅里叶变换的非负最小二乘反卷积方法^[8] (fast Fourier transform-based nonnegative least-squares approach, 简称 FFT-NNLS)。清晰化方法^[9] (CLEAN) 与相干源图像清晰化方法^[9] (CLEAN based on spatial source coherence, 简称 CLEAN-SC) 通过衰减与峰值源相关的旁瓣, 清晰化传统波束形成的输出图像。为了提升 CLEAN-SC 识别接近瑞利极限声源的能力, 研究人

员提出了高分辨率 CLEAN-SC^[10]。各类反卷积算法有效提升了声源识别图像的动态范围和空间分辨率, 但是算法运行复杂且计算时间较长。

近些年, 几种比反卷积算法简单且计算效率高的改进波束形成算法被提出。各类改进型波束形成算法通过对互谱矩阵作数学运算处理, 提升算法性能, 如鲁棒自适应波束形成^[11]、正交波束形成^[12]以及函数波束形成^[13] (functional beamforming, 简称 FB)。上述算法中, FB 的动态范围较高, 但其空间分辨率低于反卷积算法。

反卷积算法高分辨率的优势基于以下假设: 被识别声源的间距大于瑞利极限距离。当声源的间距小于瑞利极限时, 反卷积算法的声源识别结果将会出现高旁瓣干扰和伪声源现象, 即混叠。为进一步提升传统反卷积算法的动态范围与空间分辨率, 笔者提出一种基于互谱矩阵函数的多声源识别方法, 即 CLEAN- ν 。CLEAN- ν 将函数波束形成的矩阵函数作为更新互谱矩阵函数的初始值, 并将与峰值源相关的互谱矩阵进行特征值分解, 构造其矩阵函数。第 i 次迭代更新的互谱矩阵函数等于第 $(i-1)$ 次互谱矩阵函数减去第 i 次与峰值源相关的互谱矩阵函数。更新的互谱矩阵函数用于计算移除峰值源后的输出功率。相比于 CLEAN 与 FB, CLEAN- ν 算法动态范围更高, 空间分辨率更好, 声源识别结果更可靠。

* 国家自然科学基金资助项目 (51675324, 52172371); 上海高校青年教师培养计划资助项目 (ZZGCD18019)
收稿日期: 2020-09-21; 修回日期: 2020-11-18

1 CLEAN- ν 算法原理

传声器阵列采集的声压信号^[14]经快速傅里叶变换后可以表示为

$$p(f) = (p_1(f) \ p_2(f) \ \cdots \ p_N(f))^T \quad (1)$$

其中: N 为传声器数量; f 为声源频率; T 表示转置。

利用阵列信号计算互谱矩阵为

$$C = pp^H \quad (2)$$

将互谱矩阵进行特征值分解为

$$C = U\Sigma U^H \quad (3)$$

其中: U 为一个酉矩阵, $U = (u_1, u_2, \dots, u_N)$, u_1, u_2, \dots, u_N 为 C 的特征向量; Σ 为一个对角矩阵, $\Sigma = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ 为 C 的特征值; H 表示共轭转置。

对于一个平稳声源,方向向量可以表示为

$$g_j = \exp(-jk\|r_j - r_n\|) / \|r_j - r_n\| \quad (4)$$

其中: $\|\cdot\|$ 为欧氏范数; $\|r_j - r_n\|$ 为网格点 ξ_j 到第 n 个传声器 X_n 的距离; k 为波数, $k = 2\pi f/c$, c 为声速, $c = 340$ m/s。

利用互谱矩阵函数计算输出功率的表达式为

$$A(\xi_j) = [w_j^T C^{1/\nu} w_j]^\nu = [w_j^T U\Sigma^{1/\nu} U^T w_j]^\nu \quad (5)$$

其中: w_j 为加权向量, $w_j = \frac{g_j}{g_j^T g_j} = \frac{g_j}{\|g_j\|^2}$; ν 为指数。

CLEAN- ν 将 $C^{1/\nu}$ 和 $A(\xi_j)$ 作为互谱矩阵函数和输出功率的初始值,即

$$D^{(0)} = C^{1/\nu} \quad (6)$$

$$A_j^{(0)} = A(\xi_j) \quad (7)$$

从 $A^{(i-1)}$ 中搜寻峰值源的位置 $\xi_{\max}^{(i)}$,如在网格点 ξ_m 处搜寻到最大值 $A_{\max}^{(i-1)}$,计算与 $\xi_{\max}^{(i)}$ 有关的方向向量 $g_{\max}^{(i)}$ 及加权向量 $w_{\max}^{(i)}$ 。

由峰值源 $\xi_{\max}^{(i)}$ 引起的互谱矩阵 $G^{(i)}$ 为

$$G^{(i)} = A_{\max}^{(i-1)} g_{\max}^{(i)} g_{\max}^{(i)T} \quad (8)$$

将 $G^{(i)}$ 特征值分解,并利用 $G^{(i)}$ 的特征向量和特征值构造谱函数

$$G^{(i)1/\nu} = U_{\max}^{(i)} [\Sigma_{\max}^{(i)}]^{1/\nu} U_{\max}^{(i)T} \quad (9)$$

更新互谱矩阵函数

$$D^{(i)} = D^{(i-1)} - G^{(i)1/\nu} \quad (10)$$

其中: $D^{(i)}$ 为第 i 次移除峰值源后的互谱矩阵函数。

更新输出功率,移除峰值源对输出功率的影响,得

$$A_j^{(i)} = [w_j^T D^{(i)} w_j]^\nu \quad (11)$$

移除的峰值源由一个干净波束替换,即

$$Q_j^{(i)} = A_{\max}^{(i-1)-\lambda} \|\xi_j - \xi_{\max}^{(i)}\|^2 \quad (12)$$

其中: λ 为带宽参数, $\lambda = 1.2/b^2$, b 为主瓣宽度。

当符合 $\|D^{(i+1)}\| \geq \|D^{(i)}\|$ 时,迭代终止。最终,CLEAN- ν 的功率谱等于前 I 次干净波束和第 I 次输出功率的叠加,即

$$A_j = \sum_{i=1}^I Q_j^{(i)} + A_j^{(I)} \quad (13)$$

假设声源个数为 K ,声源强度为 s_k , $k=1, 2, \dots, K$ 。第 i 次迭代后, $D^{(i)}$ 中还包含 $(K-i)$ 个声源信息。在网格点 ξ_j 处,各声源强度乘以阵列点扩散函数PSF $_k$ 的 ν 次方的叠加,可以近似表示为

$$A_j^{(i)} = [w_j^T D^{(i)} w_j]^\nu = \left[w_j^T \sum_{k=1}^{K-i} s_k g_k g_k^T w_j \right]^\nu = \left[w_j^T s_1^{\frac{1}{\nu}} g_1 g_1^T w_j \right]^\nu + \cdots + \left[w_j^T s_{K-i}^{\frac{1}{\nu}} g_{K-i} g_{K-i}^T w_j \right]^\nu = s_1 \left[\frac{\|g_1^T g_1\|^2}{\|g_1\|^4} \right]^\nu + \cdots + s_{K-i} \left[\frac{\|g_{K-i}^T g_{K-i}\|^2}{\|g_{K-i}\|^4} \right]^\nu \quad (14)$$

$$\text{PSF}_k = \left[\frac{\|g_j^T g_k\|^2}{\|g_j\|^4} \right]^\nu \quad (15)$$

PSF $_k$ 只有在扫描网格点与峰值源网格点重合($g_j = g_k$)时伪声源处等于1,其他网格点处均小于1。当PSF $_k < 1$ 时,对PSF $_k$ 进行 ν 次方,则旁瓣的PSF $_k$ 值将会进一步缩小。经过大量仿真数据分析,CLEAN- ν 的指数取值范围为3~11。CLEAN- ν 的算法流程如图1所示($i \geq 1$)。

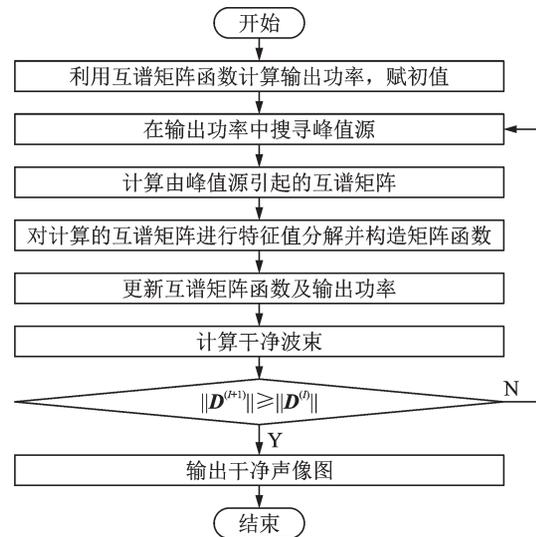


图1 CLEAN- ν 的算法流程

Fig.1 Flowchart of the CLEAN- ν

2 仿真研究

通过非相干多声源仿真,对比 CLEAN,

CLEAN-SC,FB及CLEAN- ν 的算法性能。仿真采用2种声源:双声源和SUES复杂声源,声压级均为100 dB。仿真1为小于瑞利极限的双声源,阵列1为具有36个传感器的同心圆面阵列,其有效直径分别为 $d_1=0.14\text{ m}$, $d_2=0.36\text{ m}$, $d_3=0.50\text{ m}$ 。仿真2为SUES复杂声源,由于仿真2中声源个数大于阵列1传声器个数,为了避免求解源强时出现欠定问题,阵列2采用72个传声器,其有效直径及尺寸与阵列1相同。FB指数值为 $16^{[14]}$,带宽系数 $\lambda=480$ 。

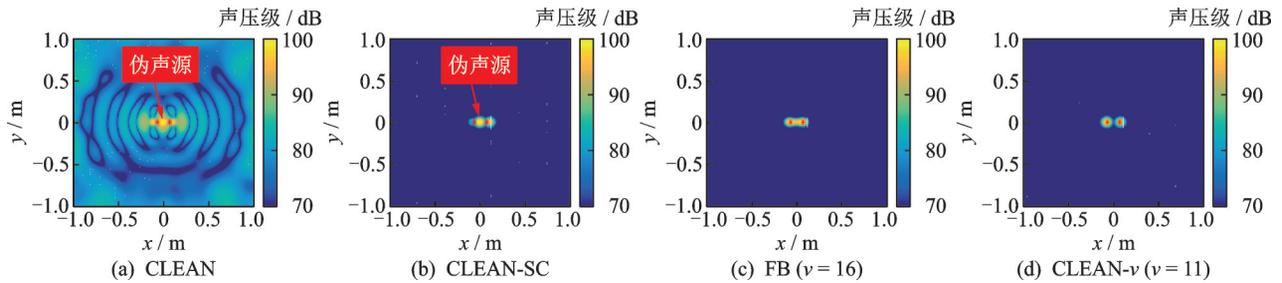


图2 不相干双声源识别结果

Fig.2 Localization of two incoherent sound sources

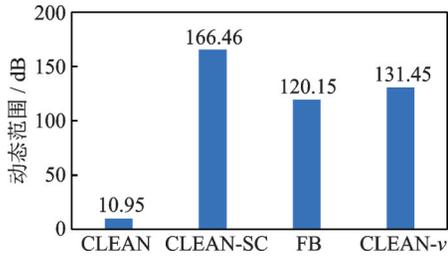


图3 4种算法的动态范围

Fig.3 Dynamic range of four algorithms

在空间分辨率方面,CLEAN识别出3个声源,如图2(a)所示。CLEAN定位双声源的坐标分别为 $(-0.11\text{ m},0\text{ m})$ 和 $(0.11\text{ m},0\text{ m})$, x 方向定位误差为 0.04 m , y 方向定位误差为 0 m 。由于瑞利极限的限制,CLEAN声像图在 $(0\text{ m},0\text{ m})$ 处出现伪声源。CLEAN-SC识别出2个声源,其中伪声源坐标为 $(0\text{ m},0\text{ m})$,如图2(b)所示。CLEAN-SC仅识别出1个声源,坐标为 $(0.12\text{ m},0\text{ m})$, x 方向定位误差为 0.05 m , y 方向定位误差为 0 m 。FB及CLEAN- ν 能够准确识别声源位置,如图2(c,d)所示。但由于FB缩窄主瓣宽度的能力有限,两声源主瓣在低于峰值5 dB处发生融合,而CLEAN- ν 无主瓣融合现象。相比于前3种算法,CLEAN- ν 识别低于瑞利极限的不相干双声源时更准确。

由图3可知,相比于CLEAN与FB算法,CLEAN- ν 的动态范围更高。当 $\nu=11$ 时,CLEAN- ν 的动态范围超过了CLEAN和FB,分别约为120 dB和11 dB。虽然CLEAN- ν 的动态范围未能超

2.1 不相干双声源

双声源频率均为4 kHz,其在声源面的坐标分别为 $(-0.07\text{ m},0\text{ m})$ 和 $(0.07\text{ m},0\text{ m})$ 。采用阵列1,每个传声器加入信噪比为10 dB的白噪声。阵列1与声源面扫描网格的间距 $z=1\text{ m}$ 。声源面扫描网格的尺寸为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$,扫描点间距为 0.01 m 。瑞利极限 $R=1.22zc/d_3f\approx 0.21\text{ m}$ 。双声源间距为 0.14 m ,小于瑞利极限。4种算法的不相干双声源识别结果及动态范围如图2,3所示,其中“*”表示真实声源。

过CLEAN-SC,但其空间分辨率优于CLEAN-SC。

2.2 SUES复杂声源

组成SUES的声源频率均为6 kHz,声源数量为44个,相邻声源间隔为 0.2 m ,字母间隔为 0.4 m 。采用阵列2,每个传声器加入信噪比为10 dB的白噪声。阵列2与声源面扫描网格的间距为 1 m 。声源面扫描网格的尺寸为 $4\text{ m}\times 2\text{ m}$,扫描点间距为 0.05 m 。CLEAN,CLEAN-SC,FB及CLEAN- ν 识别复杂声源的结果如图4所示。

CLEAN准确识别出24个声源,但其主瓣周围存在大量的旁瓣干扰,如图4(a)所示。相比于CLEAN,CLEAN-SC动态范围更高,抑制旁瓣效果显著。CLEAN-SC识别出13个声源,但在目标声源周围出现大量伪声源,如图4(b)所示。通过调整FB算法值,可使其空间分辨率优于CLEAN-SC算法,动态范围优于CLEAN算法。FB准确识别出22个声源,较清晰地分辨出声源“U”和“E”。但由于阵列尺寸的限制,FB识别2个“S”声源时出现主瓣融合的现象,如图4(c)所示。主瓣融合的现象在CLEAN- ν 的声源识别结果中得到了改善。由于CLEAN- ν 的高动态范围和空间分辨率,2个“S”声源基本被识别,如图4(d)所示。

由于阵列尺寸的限制和多声源的相互影响,4种算法识别复杂声源时均出现了定位误差、高旁瓣和伪声源的问题。相比于其他3种算法,CLEAN- ν

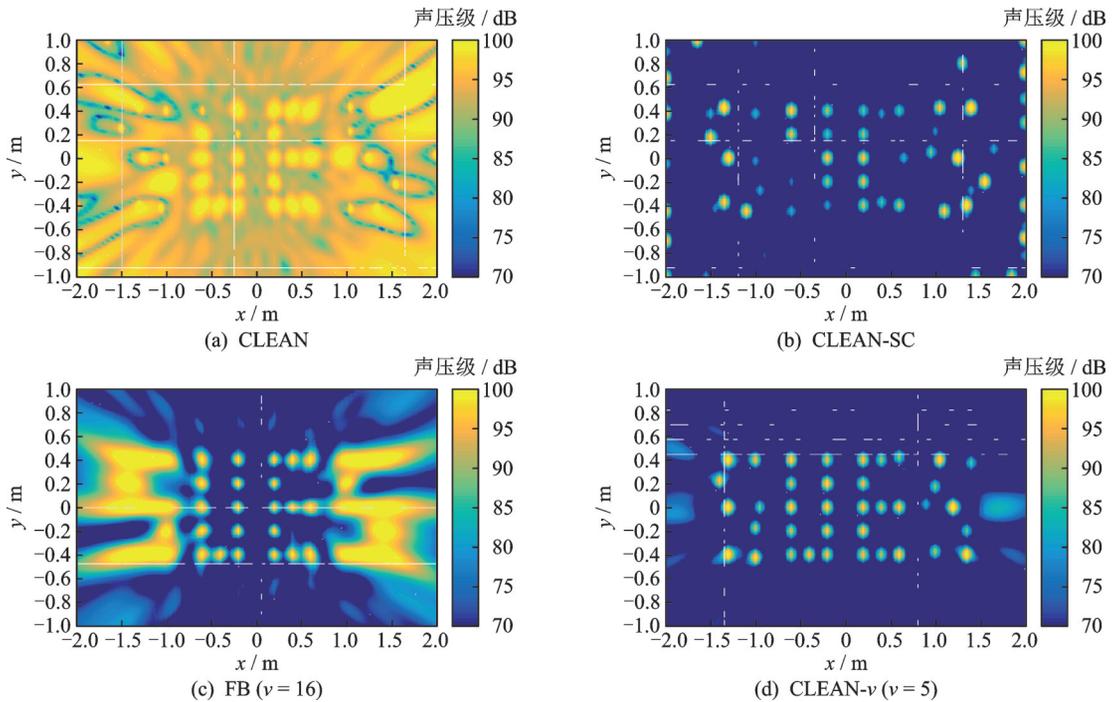


图4 SUES的识别结果

Fig.4 Localization of SUES source

识别SUES复杂声源时算法性能更稳定,声源识别结果更可靠。

3 实验研究

通过识别2个扬声器验证CLEAN- ν 的算法性能。实验环境为半消声室(长 \times 宽 \times 高为9.8 m \times 8.6 m \times 3.5 m)。2个扬声器由2个频率为4 kHz的不相干信号激励,其位置摆放在(-0.07 m, 0 m)和(0.07 m, 0 m)。麦克风阵列、声源面扫描网格以及阵列与声源面的距离与第2.2节仿真设置相同。实验中,带宽系数 $\lambda=480$,FB和CLEAN- ν 的指数值 $\nu=3$ 。图5为实验布置图。

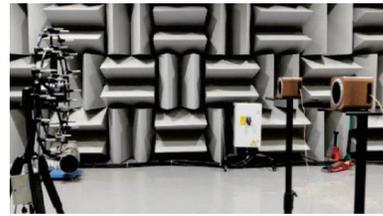


图5 实验布置图

Fig.5 Layout of experiment

4种算法识别双扬声器的结果如图6所示。由图6(a)可知,CLEAN识别出3个声源,其中双扬声器的定位坐标分别为(-0.12 m, -0.02 m)和(0.10 m, 0.02 m),伪声源的坐标为(-0.01 m, 0 m)。x方向定位误差分别为0.05 m和0.03 m,y方

向定位误差均为0.02 m。观察图6(a),CLEAN声像图中存在旁瓣干扰。CLEAN-SC仅识别出1个声源,其定位坐标为(-0.12 m, -0.02 m),声像图中不存在旁瓣干扰,如图6(b)所示。FB和CLEAN- ν 均识别出2个声源,双扬声器定位坐标均为(-0.09 m, -0.01 m)和(0.08 m, 0.01 m),如图6(c, d)所示。x方向定位误差分别为0.02 m和0.01 m,y方向定位误差均为0.01 m。FB识别双扬声器的结果出现主瓣融合现象。相比于FB,CLEAN- ν 的空间分辨率较好,声像图更清晰。

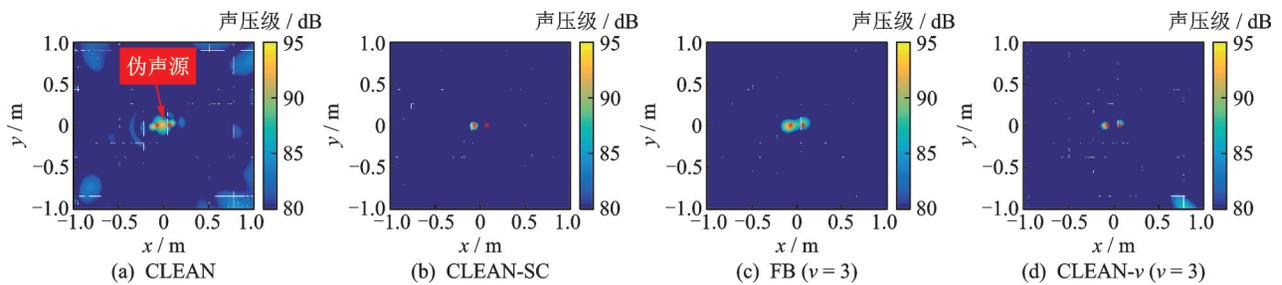


图6 双扬声器的识别结果

Fig.6 Localization of two speakers

4种算法的定位结果均含有误差,此误差包含实验设置因素,如阵列面与声源面扫描网格不平行、扬声器位置与目标位置不符等。由上述扬声器识别结果可得,CLEAN- ν 识别低于瑞利极限的声源时动态范围更高,空间分辨率更好,结果更可靠。

4 结 论

1) 当识别低于瑞利极限的多声源时,反卷积算法出现伪声源、旁瓣干扰,最终导致识别失败。针对此问题,提出一种基于互谱矩阵函数的多声源识别方法 CLEAN- ν 。给出了理论推导过程,模拟仿真了低于瑞利极限的简单双声源和复杂声源的声成像结果,并进行了实验验证。

2) 在空间分辨率方面,相比于 CLEAN, CLEAN-SC 及 FB, CLEAN- ν 的空间分辨率更高,缩窄主瓣宽度的性能更好。无论对于低于瑞利极限的简单双声源或者复杂声源, CLEAN- ν 均可以清晰地定位声源位置。

3) 在动态范围方面, CLEAN- ν 有效地提升了 CLEAN 的动态范围,抑制旁瓣效果显著。

参 考 文 献

- [1] 相龙洋,左曙光,何吕昌,等. 基于试验的汽车手动变速器噪声源识别[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(3): 426-431.
XIANG Longyang, ZUO Shuguang, HE Lüchang, et al. Identification of noise sources of automobile manual transmission based on experiment[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(3): 426-431. (in Chinese)
- [2] 杜向华,朱海潮,毛荣富. 提高近场声全息重建精度方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1): 157-160.
DU Xianghua, ZHU Haichao, MAO Rongfu. The method of improving the reconstruction accuracy of near-field acoustic holography[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(1): 157-160. (in Chinese)
- [3] BI C X, LIU Y, ZHANG Y B, et al. Extension of sound field separation technique based on the equivalent source method in a sparsity framework[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 442(3): 125-137.
- [4] 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.
- [5] EHRENFRIED K, KOOP L. A comparison of iterative deconvolution algorithms for the mapping of acoustic Sources[J]. American of Institute Aeronautics and Astronautics, 2007, 45(7): 1584-1595.
- [6] DOUGHERTY R P, RAMACHANDRAN R C, RAMAN G. Deconvolution of sources in aeroacoustic images from phased microphone arrays using linear programming[J]. International Journal of Aeroacoustics, 2013, 12(8): 699-718.
- [7] DOUGHERTY R P. Extensions of DAMAS and benefits and limitations of deconvolution in beamforming [C] //11th American of Institute Aeronautics and Astronautics Aeroacoustics Conference. California: American of Institute Aeronautics and Astronautics, 2005: 1-13.
- [8] GADE S, HALD J. Noise source identification with blade tracking on a wind turbine [C] //Proceedings of the Internoise 2012. New York: Internoise, 2012: 1-6.
- [9] PIETER S. CLEAN based on spatial source coherence [J]. International Journal of Aeroacoustics, 2007, 6(4): 357-374.
- [10] SIJTSMA P, MERINO-MARTINEZ R, MALGOEZAR A M, et al. High-resolution CLEAN-SC: theory and experimental validation [J]. International Journal of Aeroacoustics, 2017, 16(4/5): 274-298.
- [11] LUESUTTHIVIBOON S, MALGOEZAR A, SNE-LLEN M, et al. Improving source discrimination performance by using an optimized acoustic array and adaptive high-resolution CLEAN-SC beamforming [C] //Proceedings of the 7th Berlin Beamforming Conference. Berlin: Berlin Beamforming Conference, 2018: 1-26.
- [12] SARRADJ 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.
- [13] DOUGHERTY R P. Functional beamforming [C] // Proceedings on CD of the 5th Berlin Beamforming Conference. Berlin: Berlin Beamforming Conference, 2014: 1-25.
- [14] 褚志刚,段云场,沈林邦,等. 函数波束形成声源识别性能分析及应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 67-76.
CHU Zhigang, DUAN Yunyang, SHEN Linbang, et al. Performance analysis and application of functional beamforming sound source identification [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 67-76. (in Chinese)



第一作者简介:王月,女,1993年3月生,硕士。主要研究方向为噪声源识别与定位。
E-mail: yuewang_1108@163.com

通信作者简介:杨超,男,1979年1月生,博士、讲师。主要研究方向为噪声源识别与定位、阵列信号处理。
E-mail: nfuyangchao@sina.com