

利用压缩网格方法提高旋转声源定位计算效率

王嘉裕, 张 策, 马 威
(上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

摘 要: 利用两种压缩网格方法:基于传统波束形成的 CG2 压缩网格方法和基于小样本数据的 CG4 压缩网格方法,对经典时域旋转声源波束形成(ROSI)算法进行优化加速。实验结果表明:两种压缩网格方法均不影响 ROSI 算法旋转声源定位效果,基于传统波束压缩形成的 CG2 网格方法能够提高 ROSI 算法的旋转声源定位计算效率 1~2 倍,基于小样本数据的 CG4 压缩网格方法能够提高 ROSI 算法的旋转声源定位计算效率 13~18 倍。除此之外,基于小样本数据的 CG4 压缩网格方法在相控麦克风阵列平面与旋转声源平面垂直条件下,仍能准确进行旋转声源定位。

关 键 词: 旋转声源定位; 相控麦克风阵列; 波束形成; 压缩网格方法; 计算效率提升

中图分类号: V211 **文献标志码:** A

Improving the computational efficiency of rotating sound source localization via compression computational grid method

WANG Jiayu, ZHANG Ce, MA Wei
(School of Aeronautics and Astronautics,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to improve the computational efficiency of the classical time-domain rotating source identifier (ROSI) beamforming, two different compression computational grid methods were proposed: one based on conventional beamforming, namely CG2, and the other one obtained from ROSI beamforming with a little amount of sample data, namely CG4. Experimental applications showed that both compression grid methods did not affect the effectiveness of the ROSI algorithm for rotating sound source localization. ROSI beamforming with CG2 can improve the computational efficiency of the ROSI algorithm for rotating sound source localization by a factor of 1 to 2, while ROSI beamforming with CG4 can improve the computational efficiency of the ROSI algorithm for rotating sound source localization by a factor of 13 to 18. In addition, ROSI beamforming with CG4 can still accurately locate the rotating sound source even if the microphone array plane run perpendicular to the rotating sound source plane.

Key words: rotating sound source localization; phased microphone array; beamforming; compression computation grid method; computational efficiency improvement

收稿日期:2020-07-02
基金项目:国家科技重大专项(2017-II-003-0015)
作者简介:王嘉裕(1994—),男,硕士生,主要从事声源定位阵列测试研究。E-mail:jiayu_wang@sjtu.edu.cn
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:王嘉裕,张策,马威. 利用压缩网格方法提高旋转声源定位计算效率[J]. 航空动力学报,2021,36(1):176-184. WANG Jiayu,ZHANG Ce,MA Wei. Improving the computational efficiency of rotating sound source localization via compression computational grid methods[J]. Journal of Aerospace Power,2021,36(1):176-184.

目前旋转噪声污染问题日益受到人们的关注。从风扇噪声、风力机噪声到航空发动机噪声,可以说旋转噪声问题正在影响着人们生活的方方面面。为更充分地了解旋转噪声产生的机理从而实现更好的降噪设计,对旋转噪声源的准确识别定位就显得格外重要^[1-2]。基于相控麦克风阵列(下文简称为麦克风阵列)的旋转波束形成方法可以准确识别旋转声源,为旋转声源降噪设计提供思路^[3]。目前主要有两类基于麦克风阵列的旋转波束形成方法,分别是:时域旋转声源波束形成方法和频域旋转声源波束形成方法^[3-4]。频域旋转声源波束形成方法的主要思路是通过构建一个与旋转声源同轴同速度旋转的虚拟麦克风阵列来实现旋转声源定位^[5-8]。频域旋转声源波束形成方法对麦克风阵列的类型和位置要求较高。一般需要环形麦克风阵列^[9],并且麦克风阵列的中心轴需要与旋转声源的旋转轴相重合。因此本文主要围绕时域旋转声源波束形成方法展开。

2001 年荷兰国家航空航天实验室(NLR)Si-jtsma 等人^[10]提出了时域旋转声源波束形成方法:rotating source identifier(ROSI)算法,并成功用于旋转的蜂鸣器噪声辐射源、风力机叶片噪声辐射源^[11]和直升机螺旋桨噪声辐射源的识别定位。2012 年 Minck 等人^[12]利用 ROSI 算法成功识别了旋转风扇叶片主要噪声辐射源。为了提高 ROSI 算法声源定位结果的空间分辨率,Debrouwere 等人^[13]成功将反卷积过程^[14-15]引入 ROSI 算法。目前为止,ROSI 算法是最为广泛使用的时域旋转声源波束形成方法。

但是利用 ROSI 算法进行旋转声源定位时耗时巨大。为了让 ROSI 算法在实际的工程应用发挥更大的作用,对 ROSI 算法的优化加速就显得必不可少。

近年来,上海交通大学马威等人^[16-19]利用压缩网格方法成功提高了麦克风阵列声源定位中反卷积算法的计算效率。压缩网格方法的总体思路为去除麦克风阵列扫描面(scanning plane)上的“冗余点”,从而获得新的扫描面,以此提高声源定位算法的计算效率。

本文通过压缩网格方法来提高时域旋转声源波束形成方法 ROSI 算法的计算效率。文中提出了两种压缩网格方法:基于传统波束形成的 CG2 压缩网格方法和基于小样本数据的 CG4 压缩网格方法,并且通过小型螺旋桨旋转声源定位实验对两种压缩网格方法的加速效果进行了验证。本

文的总体框架为:首先介绍了时域旋转声源波束形成方法,然后梳理了两种压缩网格方法的算法理论,接着介绍了小型螺旋桨旋转声源定位实验准备,最后对实验结果进行了讨论分析。

1 时域旋转声源波束形成方法

图 1 为利用基于麦克风阵列的旋转波束形成方法进行旋转声源定位的示意图。图中平面麦克风阵列包含麦克风数目为 M ,每一个固定的麦克风位置坐标为 $\mathbf{x}_m = (r_{xm}, \varphi_{xm}, \theta_{xm})$,其中 $m = 1, 2, 3, \dots, M$ 。麦克风阵列扫描面与麦克风阵列平面平行,距离为 z_0 。笛卡儿坐标系的坐标原点 O 位于麦克风阵列平面与旋转声源旋转轴的交点, x - y 平面与麦克风阵列平面重合, z 轴垂直麦克风阵列平面,指向扫描面。旋转声源位于扫描面上,以角速度 Ω 逆时针方向旋转(以麦克风平面为观测点)。扫描面总共包含 S 个网格点,每一个网格点的位置坐标为 $\mathbf{y}_s = (r_{ys}, \varphi_{ys}, \theta_{ys})$,其中 $s = 1, 2, 3, \dots, S$ 。

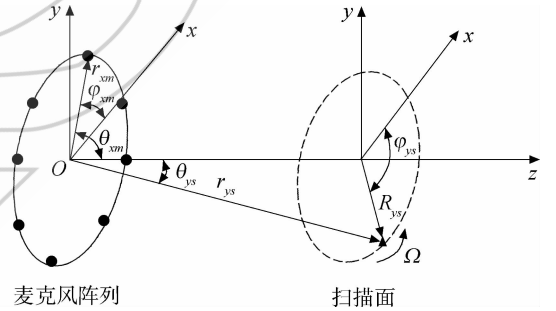


图 1 基于麦克风阵列的旋转声源定位示意图

Fig. 1 Sketch of microphone array for rotating sound source identification

ROSI 算法的输出 b_{rosi} 可以表示为

$$b_{\text{rosi}}(s, \omega_0) = \left\| \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M q(m, s, \omega_0) \right\|^2 \quad (1)$$

其中 $s = 1, \dots, S$, $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 为声音信号频率。 $q(m, s, \omega_0)$ 为麦克风阵列中第 m 个麦克风在 ω_0 的条件下获得的扫描面中第 s 个网格点处的频域声强。如式(2)所示, $q(m, s, \omega_0)$ 通过离散傅里叶变换(discrete Fourier transform)得到。

$$q(m, s, \omega_0) = \frac{1}{N} \sum_{\tau_e = \tau_1}^{\tau_N} \tilde{q}(m, s, \tau_e) e^{-i\omega_0 \tau_e} \quad (2)$$

其中 τ_e 为声音信号的发射时间, $\tilde{q}(m, s, \tau_e)$ 为麦克风阵列中第 m 个麦克风在 τ_e 时刻获得的扫描面中第 s 个网格点处的时域声强。 $\tilde{q}(m, s, \tau_e)$ 通过式(3)计算得到。

$$\tilde{q}(m, s, \tau_e) = \frac{\tilde{p}[m, \tau_a(m, s, \tau_e)]}{T[m, \tau_a(m, s, \tau_e), s, \tau_e]} \quad (3)$$

$$T[m, \tau_a(m, s, \tau_e), s, \tau_e] = \frac{1}{4\pi \left\{ c[\tau_a(m, s, \tau_e) - \tau_e] - \frac{1}{c} \cdot \frac{dy_s(\tau_e)}{dt} \cdot [x_m - y_s(\tau_e)] \right\}} \quad (4)$$

$$\tau_a(m, s, \tau_e) = \frac{\|x_m - y_s(\tau_e)\|}{c} + \tau_e \quad (5)$$

式(3)~式(5)中 c 为声速, $\tau_a(m, s, \tau_e)$ 为扫描面中第 s 个网格点在 τ_e 时刻发出的声音信号被阵列中第 m 个麦克风接受时刻。 $\tilde{p}[m, \tau_a(m, s, \tau_e)]$ 是通过 $\tilde{p}(m, \tau_n)$ 进行线性插值获得的, 其中 n 为采样次数索引, $n=1, 2, 3, \dots, N$, $\tilde{p}(m, \tau_n)$ 为阵列中第 m 个麦克风在 τ_n 时刻采样得到的时域声压。

为了消除麦克风自噪声(self-noise)对实验结果的影响, 同时提高输出结果的动态分辨率, 式(1)的波束形成结果可以写成式(6)形式^[20]。

$$b_{\text{rosi}}(s, \omega_0) = \frac{1}{M(M-1)} \left(\left\| \sum_{m=1}^M q(m, s, \omega_0) \right\|^2 - \sum_{m=1}^M \|q(m, s, \omega_0)\|^2 \right) \quad (6)$$

2 压缩网格方法

2.1 基于传统波束形成的 CG2 压缩网格方法

为了提高 ROSI 算法的计算效率, 在使用 ROSI 算法进行旋转声源定位之前, 可以先利用传统波束形成方法(CB)算法进行旋转声源定位。但是由于严重的多普勒效应存在, CB 无法对旋转声源进行准确定位识别, 从 CB 的定位结果来看, 旋转声源的整个旋转圆周上都存在疑似声源。

在移除交叉互谱矩阵(CSM)中的对角线元素后, CB 的输出结果为

$$b_{\text{cb}} = \frac{e^H C_{\text{diag}=0} e}{\|e\|^4 - \sum_{m=1}^M |e_m|^4} \quad (7)$$

其中 e 为导向矢量; e_m 为导向矢量中的第 m 个元素, e_m 的物理意义为声音从扫描面的某一网格点传递到第 m 个麦克风的传播函数^[21]; C 为交叉互谱矩阵; $[]_{\text{diag}=0}$ 表示将原矩阵中对角线元素全部归零。

CB 得到的波束形成结果 b_{cb} 中通常存在许多网格点上的 b_{cb} 值极其小甚至无限接近于零。这些网格点的出现在物理上可以解释为这些网格点上的噪声水平相当低, 并且大概率是由背景噪声的存在引起的, 因此这些网格点可以视作“冗余点”。在后续利用 ROSI 算法进行旋转声源定位时, 可以不把这些网格点考虑在内。

在 CG2 压缩网格方法中, 只需要考虑 CB 输出结果 b_{cb} 满足式(8)的计算网格点, 这些网格点组成新的扫描面, 供后续 ROSI 算法使用。

$$b_{\text{cb}} \geq \varphi \quad (8)$$

式中 φ 为阈值, 设定阈值应小于等于设定的动态范围对应的声压强平方范围的下限。

本文将使用经过 CG2 方法压缩后的 ROSI 算法标记为 ROSI-CG2 算法, 具体流程如下:

- 1) 根据式(7)利用 CB 进行旋转声源定位;
- 2) 通过只保留原有计算网格中满足式(8)的网格点获得经过 CG2 方法压缩后的扫描面;
- 3) 根据式(6)利用 ROSI 算法在经过 CG2 方法压缩后的扫描面上进行旋转声源定位。

2.2 基于小样本数据的 CG4 压缩网格方法

在真实的实验或者工业应用中, 由于转速不稳定, 信噪比较低等实际因素的存在, 在利用麦克风阵列进行旋转声源定位时, 麦克风阵列的采样时间一般较长, 获得的采样数据量也十分庞大。基于小样本数据的 CG4 压缩网格方法的主要思路为: 首先利用 ROSI 算法根据式(6)处理少量采样数据, 比如当旋转声源旋转若干圈时, 麦克风阵列获得的采样数据, 从而获得经过 CG4 方法压缩后的计算网格。本文将利用 ROSI 算法处理少量采样数据的过程标记为 ROSI-Pre。

由于使用数据量较小, ROSI-Pre 的输出结果空间分辨率较低, 声源定位效果不理想。ROSI-Pre 的输出结果 b_{rosi} 中同样存在着大量网格点上的 b_{rosi} 的值极其小甚至无限接近于零。这些网格点同样可以被视为“冗余点”。和 CG2 方法一样, 在后续利用 ROSI 算法进行旋转声源定位时, 可以不把这些网格点考虑在内。

在 CG4 压缩网格方法中, 只需要考虑 ROSI-Pre 输出结果 b_{rosi} 满足式(9)的计算网格点, 这些网格点组成新的扫描面, 供后续 ROSI 算法使用。

$$b_{\text{rosi}} \geq \varphi \quad (9)$$

设定阈值 φ 应小于等于设定的动态范围对应的声压强平方范围的下限。

本文将使用经过 CG4 方法压缩后的 ROSI

算法标记为 ROSI-CG4 算法,具体流程如下:

1) 根据式(6)利用 ROSI 算法处理少量采样数据,该过程标记为 ROSI-Pre。

2) 通过只保留原有计算网格中满足式(9)的网格点获得经过 CG4 方法压缩后的扫描面。

3) 根据式(6)利用 ROSI 算法在经过 CG4 方法压缩后的扫描面上进行旋转声源定位。

文中定义压缩比 σ 为

$$\sigma = S/\tilde{S} \quad (10)$$

其中 $\tilde{S}$ 为经过 CG2 或者 CG4 方法压缩后的网格点数目。计算效率的提升 λ 为

$$\lambda = \frac{T_{\text{original}} - T_{\text{cg}}}{T_{\text{cg}}} \quad (11)$$

其中 T_{original} 为 ROSI 使用原始计算网格进行旋转声源定位所需时间, T_{cg} 为 ROSI-CG2 或者 ROSI-CG4 算法进行旋转声源定位所需时间。

3 实验介绍

本实验是在上海交通大学航空发动机研究院半消声实验室(semi-anechoic room)中完成的。如图2所示,实验对象为直径为1.0 m的小型螺旋桨,该螺旋桨由伺服电动机驱动,以1000 r/min的恒定转速顺时针方向旋转(以麦克风阵列平面为观测点)。如图3所示,本次实验采用由39颗麦克风传感器组成的螺旋形麦克风阵列,其中阵列I位于 $z=0$ m平面,阵列中心坐标为(0 m, 0 m, 0 m),麦克风阵列平面与扫描面平行,麦克风阵列中心轴与螺旋桨旋转轴重合。阵列II位于 $x=0.8$ m平面,阵列中心坐标为(0.8 m, 0 m, 0 m),麦克风阵列平面与扫描面垂直,麦克风阵列中心轴与螺旋桨旋转轴垂直并相交。扫描面中单一计算网格点的尺寸为1 cm $\times$ 1 cm。本次实验数据采样时间设定为10 s,数据采样频率设定为25.6 kHz,离散傅里叶变换中采用Hann窗,分块

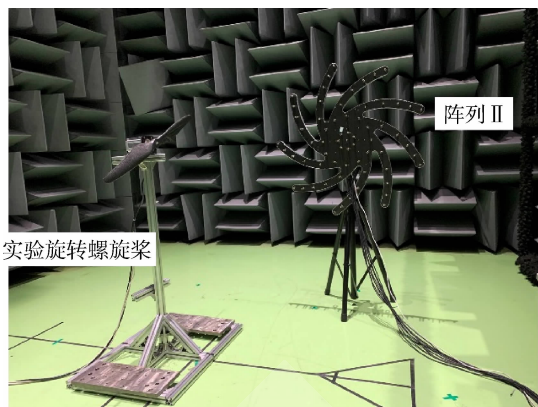
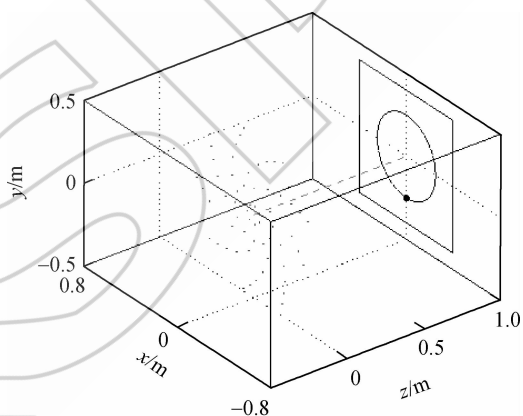
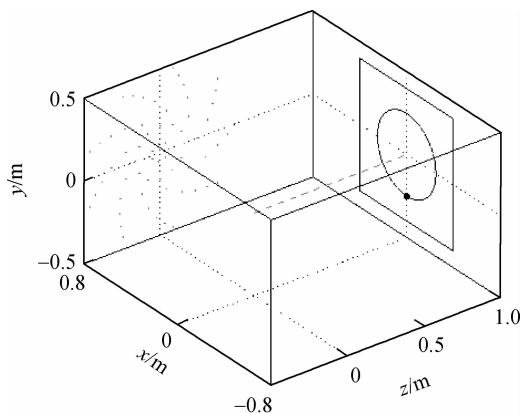


图2 实验现场图

Fig. 2 Experimental setup



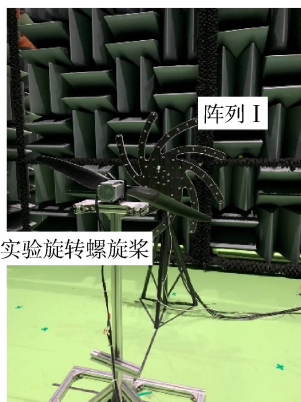
(a) 阵列 I 条件下麦克风与扫描面的相对位置



(b) 阵列 II 条件下麦克风与扫描面的相对位置

图3 麦克风阵列与扫描面的相对位置关系示意图

Fig. 3 Relative positions between the microphone array and the scanning plane



(a)

数据长度设定为1024,重叠度为50%。声源定位频率设定为2.7 kHz。在本文中声压级(SPL,记为 L_{sp} ,单位: dB)的计算公式为 $L_{\text{sp}} = 10 \lg(p/p_{\text{ref}}^2)$,其中 p 为各算法计算所得的声压, p_{ref} 为参考声压, p_{ref} 的值设定为 2×10^{-5} Pa^[1],本次研究声源识别

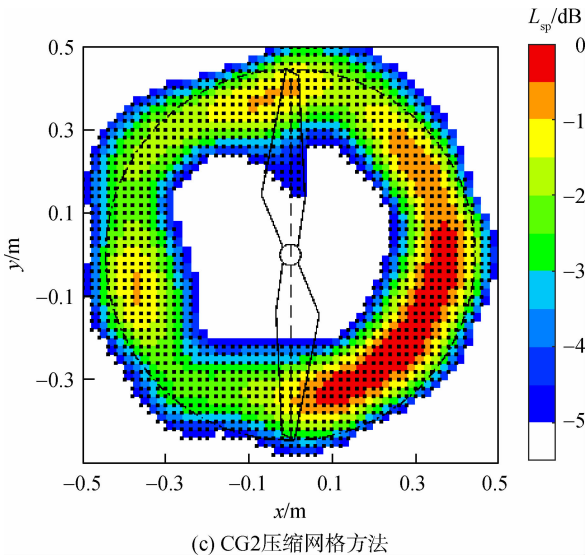
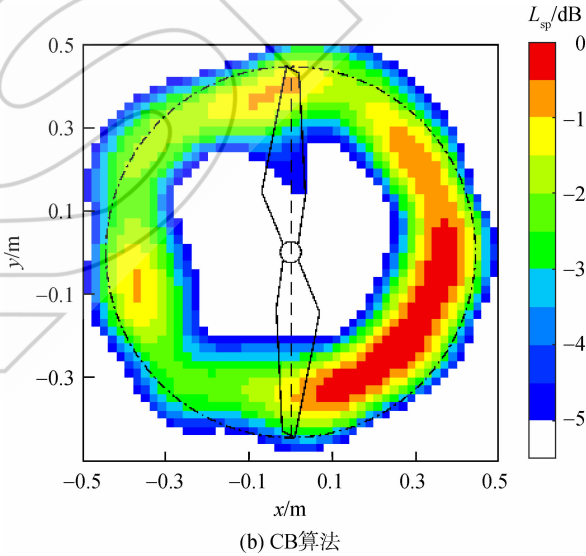
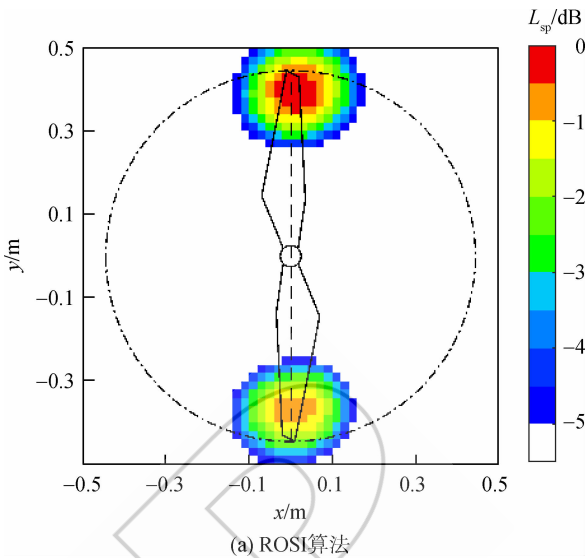
的动态范围统一设定为 5.0 dB。在 ROSI-Pre 过程中使用的小样本数据量为螺旋桨旋转四圈时间里,麦克风阵列采集到的数据。

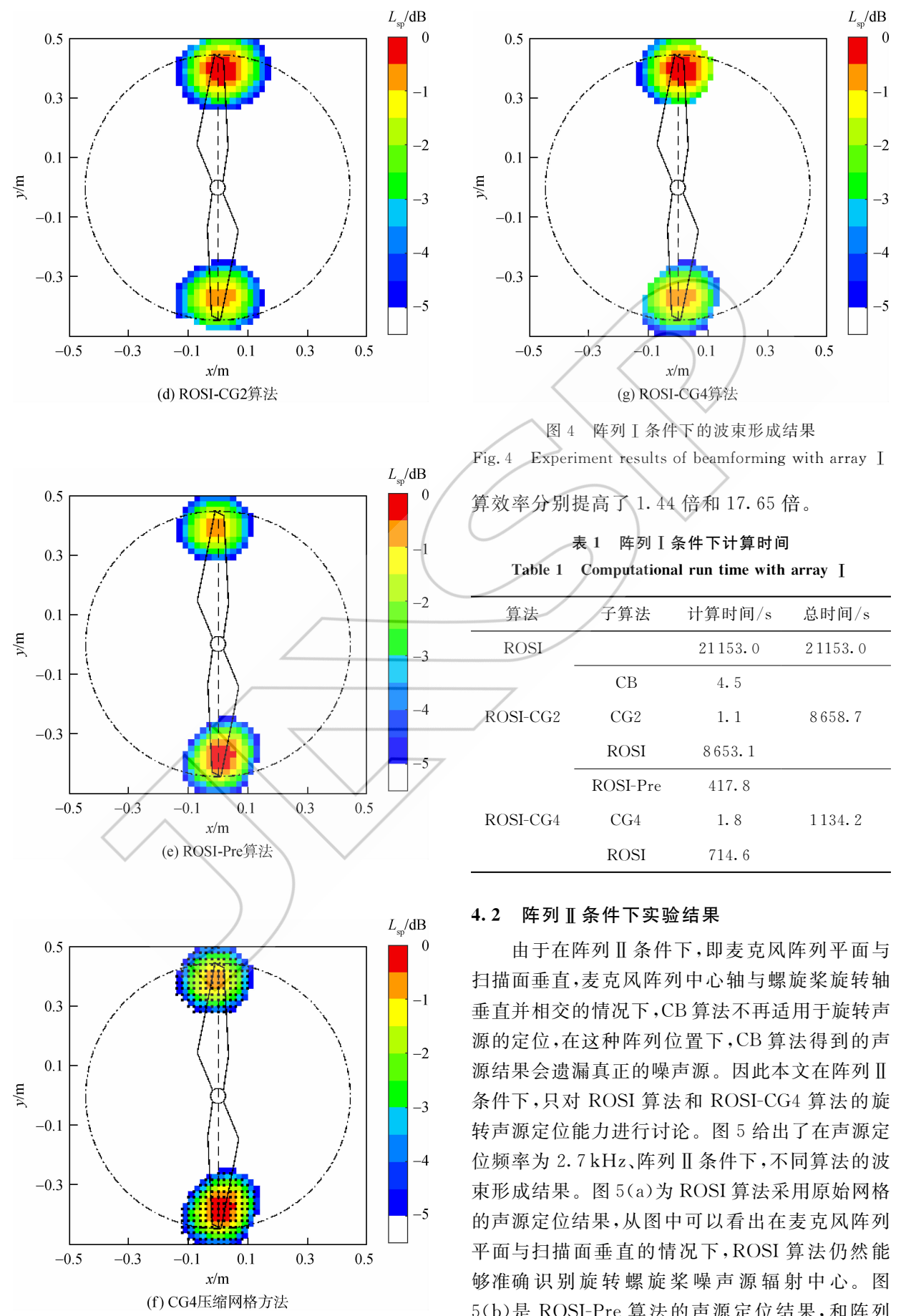
4 实验结果

4.1 阵列 I 条件下实验结果

图 4 给出了在声源定位频率为 2.7 kHz、阵列 I 条件下,不同算法的波束形成结果。图中由点划线线构成的黑色圆环表示螺旋桨旋转轨迹。图 4(a)为 ROSI 算法采用原始网格的声源定位结果,从图中可以看出旋转螺旋桨噪声源辐射中心位于螺旋桨两端。图 4(b)为 CB 算法的声源定位结果,可以看出 CB 无法进行准确的旋转声源定位,在整个声源旋转轨迹上均有疑似声源的出现,之所以出现上述情况是因为严重的多普勒效应存在。图 4(c)为利用 CG2 方法进行网格压缩后的结果,图中黑点所在的网格点即是根据式(8)保留下来的计算网格点,这些网格点构成了新的扫描面。CG2 方法的网格压缩比为 1.8。图 4(d)为 ROSI-CG2 算法的声源定位结果,将其和图 4(a)相比较,可以发现 ROSI-CG2 算法不仅可以成功识别旋转螺旋桨噪声辐射中心,同时还在一定程度上提高了声源定位结果的空间分辨率。图 4(e)是 ROSI-Pre 算法的声源定位结果,与图 4(a)中 ROSI 算法的声源定位结果相比,发现 ROSI-Pre 算法得到的声源定位结果空间分辨率较低,这是由于 ROSI-Pre 过程使用的样本数据量过小导致的。图 4(f)为利用 CG4 方法进行网格压缩的结果,与图 4(c)相同,图中黑点所在的网格点即是根据式(9)保留下来的计算网格点,这些网格点构成了新的扫描面。CG4 方法的网格压缩比为 10.3。图 4(g)为 ROSI-CG4 算法的旋转声源定位结果。与 ROSI 和 ROSI-CG2 算法一样,ROSI-CG4 算法成功识别了旋转螺旋桨噪声辐射中心,同时与 ROSI 算法的结果相比,空间分辨率也有所提高。

表 1 给出了在阵列 I 条件下,不同算法的计算时间。ROSI 算法采用原始计算网格完成此次旋转声源定位耗时 21 153.0 s。ROSI-CG2 算法完成此次旋转声源定位共耗时 8 658.7 s,其中 CB 算法过程耗时 4.5 s,CG2 算法过程耗时 1.1 s,ROSI 算法过程耗时 8 653.1 s。ROSI-CG4 算法完成此次旋转声源定位共耗时 1 134.2 s,其中 ROSI-Pre 算法过程耗时 417.8 s,CG4 算法过程耗时 1.8 s,ROSI 算法过程耗时 714.6 s。与使用原有计算网格的 ROSI 算法相比,ROSI-CG2 算法和 ROSI-CG4 算法的计





I 条件下情况相似,ROSI-Pre 算法得到的声源定位结果空间分辨率较低。图 5(c)为利用 CG4 算法进行网格压缩后的结果,图中黑点所在的网格点即是根据式(9)保留下来的计算网格点,这些网格点构成了新的扫描面。CG4 算法的网格压缩比为 8.2。图 5(d)为 ROSI-CG4 算法的旋转声源定位结果。与 ROSI 算法结果相比较,ROSI-CG4 算法成功识别了旋转螺旋桨噪声辐射中心,同时一定程度上提高了声源定位结果的空间分辨率。

表 2 给出了在阵列 II 条件下,不同算法的计算时间。ROSI 算法采用原始计算网格完成此次旋转声源定位耗时 23 985.3 s。ROSI-CG4 算法完成此次旋转声源定位共耗时 1 649.4 s,其中 ROSI-Pre 算法过程耗时 632.7 s,CG4 算法过程耗时 2.1 s,ROSI 算法过程耗时 1 014.6 s。ROSI-CG4 算法比使用原有计算网格的 ROSI 算法的计算效率提高了 13.54 倍。

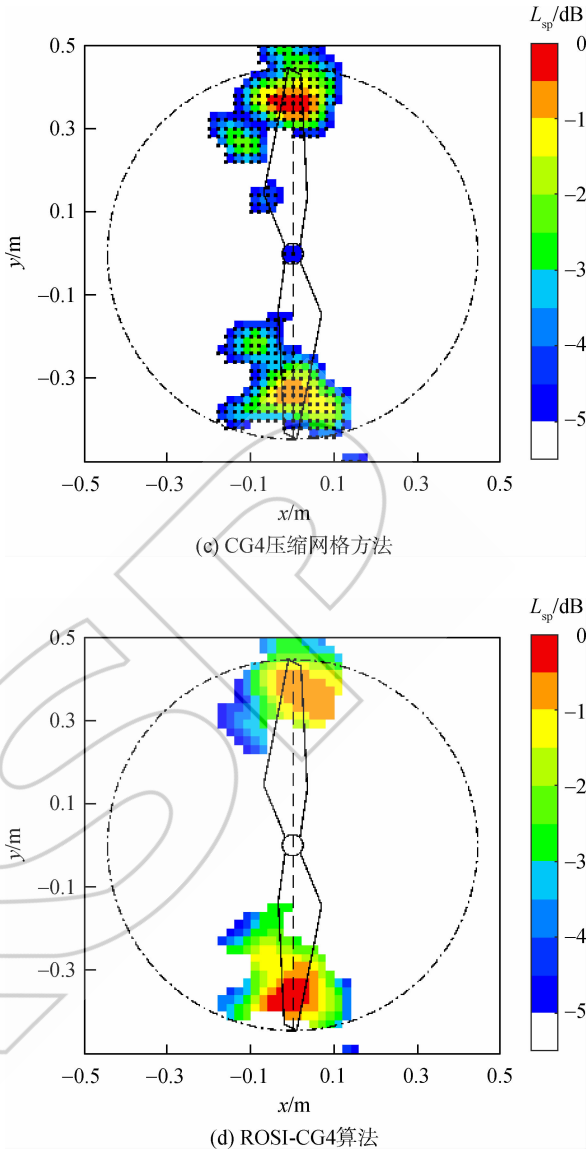
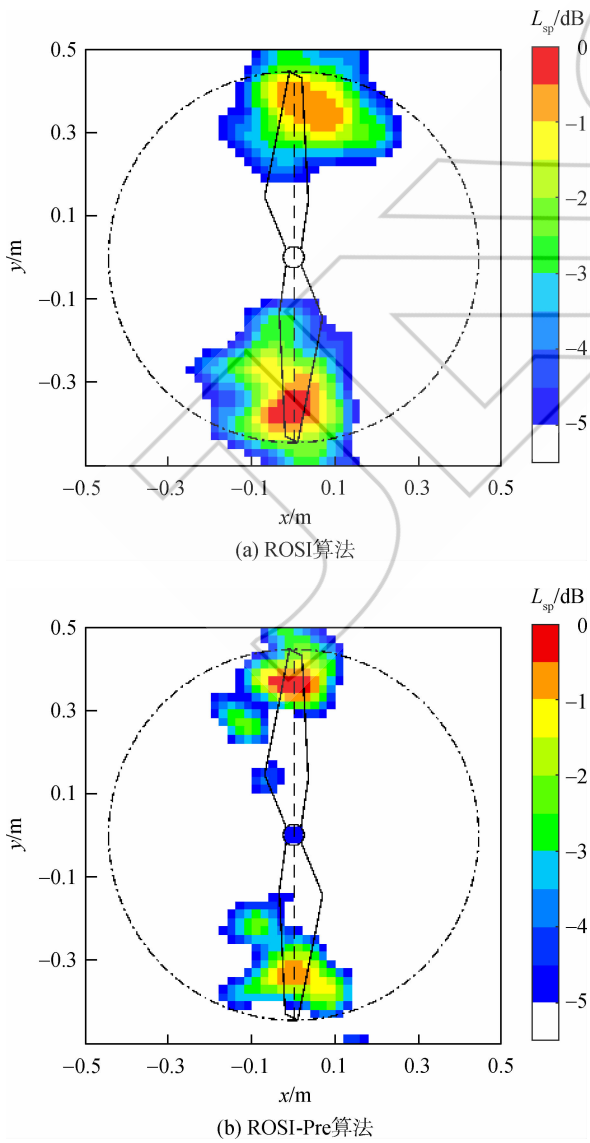


图 5 阵列 II 条件下的波束形成结果
Fig. 5 Experiment results of beamforming with array II

表 2 阵列 II 条件下计算时间			
Table 2 Computational run time with array II			
算法	子算法	计算时间/s	总时间/s
ROSI		23 985.3	23 985.3
	ROSI-Pre	632.7	
ROSI-CG4	CG4	2.1	1 649.4
	ROSI	1 014.6	

5 讨 论

ROSI-CG2 算法和 ROSI-CG4 算法不仅成功提高了 ROSI 算法的计算效率,同时保留了 ROSI 算法准确识别旋转噪声源的能力。在声源定位的

空间分辨率方面,ROSI、ROSI-CG2 算法和 RO-SI-CG4 算法均能成功识别主要旋转噪声辐射源,三者的声源定位结果空间分辨率大致相当。在所需计算时间方面,ROSI-CG2 算法和 ROSI-CG4 算法均极大的提高 ROSI 算法的计算效率。同时 ROSI-CG4 算法比 ROSI-CG2 算法在计算效率方面实现了更大的提升。在工业应用推广方面,近年来 ROSI 算法能够准确地识别旋转声源,但是计算效率不高一直困扰着研究人员。ROSI-CG2 算法和 ROSI-CG4 算法利用压缩网格技术很好地提高了 ROSI 算法的计算效率,为实际工业旋转声源定位中提供了新的算法旋转。

在 ROSI-CG4 算法中如何去定量 ROSI-Pre 算法中使用的小样本数据量? 理论上讲,待测旋转声源完整转动一圈的时间里,麦克风阵列收集到的声音信号数据已经能够满足 ROSI-Pre 算法过程的要求。但是由于实际工程应用中,旋转声源转速一般不恒定,真实环境下信噪比较低等因素的存在,待测声源旋转一圈获取的信号数据往往无法满足 ROSI-Pre 算法的要求。在本文中,总采样时间为 10s,螺旋桨转速为 1000 r/min,ROSI-Pre 算法中使用小样本数据定量为螺旋桨旋转四圈时间里,麦克风阵列采集到的数据,即在 0.24 s 时间里采集到的数据。从结果来看,本次 ROSI-CG4 算法取得了理想的加速效果。在工业实际旋转声源的识别定位中,采样时间往往远远大于 10s,因此小样本数据量的采集时间也建议根据实际情况适当增加。

在麦克风阵列平面与扫描面垂直的条件下,CB 算法对旋转声源的定位就失效了,这直接导致 ROSI-CG2 算法无法在该条件下使用,这无疑限制了 ROSI-CG2 算法在工业实践中的进一步推广。如何改进优化 CB 算法,使其在麦克风阵列平面与扫描面平面垂直的条件下,不遗漏任何旋转声源,将是下一阶段的一个研究方向。

6 结 论

本文利用两种压缩网格技术,对经典时域旋转声源波束形成 ROSI 算法进行优化加速。利用小型螺旋桨旋转噪声识别定位实验对优化后的算法进行验证,主要的结论有:

1) 本文提出的两种压缩网格方法:基于传统波束形成的 CG2 压缩网格方法和基于小样本数据的 CG4 压缩网格方法,均能够在不影响 ROSI 算法定位效果的前提下,成功提高 ROSI 算法的

旋转声源定位计算效率,并在一定程度上提高 ROSI 算法的声源定位结果的空间分辨率。

2) 与基于传统波束形成的 CG2 压缩网格方法相比,基于小样本数据的 CG4 压缩网格方法在计算效率方面实现了更大的提升,同时在麦克风阵列平面与旋转声源平面垂直条件下,仍能准确进行声源定位。

参考文献:

[1] 乔渭阳,王良鋒.航空发动机气动声学[M]. 西安:西北工业大学出版社,2016.

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

[3] MERINO-MARTINEZ R,SIJTSMA P,SNELLEN M,et al. A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays[J]. CEAS Aeronautical Journal,2010,10 (1):197-230.

[4] 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.

[5] LOWIS C,JOSEPH P. Inversion technique for determining the strength of rotating broadband sources in ducts[R]. AIAA-2005-3018,2005.

[6] LOWIS C,JOSEPH P. Determining the strength of rotating broadband sources in ducts by inverse methods[J]. Journal of Sound and Vibration,2006,295 (3/4/5): 614-632.

[7] LOWIS C,JOSEPH P. A focused beamformer technique for separating rotor and stator-based broadband sources [R]. AIAA-2006-2710,2006.

[8] DOUGHERTY R, WALKER B. Virtual rotating microphone imaging of broadband fan noise[R]. AIAA-2009-3121,2009.

[9] TOTH B, KALMAR-NAGY T, VAD J. Rotating beamforming with uneven microphone placements[R]. Berlin: the 7th Berlin Beamforming Conference,2018.

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

[11] OERLEMANS S, SIJTSMA P, LPEZ B. Location and quantification of noise sources on a wind turbine[J]. Journal of Sound and Vibration,2007,299(4/5):869-883.

[12] MINCK O,BINDER N,CHERRIER O,et al. Fan noise analysis using a microphone array[R]. Senlis, France:2012 International Conference on Fan Noise, Technology, and Numerical Methods,2012.

[13] DEBROUWERE M, ANGLAND D. Airy pattern approximation of a phased microphone array response to a rotating point source[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,2017,141(2):1009-1018.

[14] BROOKS T,HUMPHREYS W. 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.

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

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

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

[18] MA W, LIU X. Compression computational grid based on functional beamforming for acoustic source localization [J]. Applied Acoustics, 2018, 134: 75-87.

[19] WANG J, MA W. Deconvolution algorithms of phased microphone arrays for the mapping of acoustic sources in an airframe test[J]. Applied Acoustics, 2020, 164: 107283. 1-107283. 13.

[20] 杨洋, 褚志刚, 倪计民, 等. 除自谱的互谱矩阵波束形成的噪声源识别技术[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(4): 145-148. YANG Yang, CHU Zhigang, NI Jimin, et al. Research on algorithm of sound source identification based on cross-spectral beamforming with exclusion of autospectra[J]. Noise and Vibration Control, 2011, 31(4): 145-148. (in Chinese)

[21] HUANG X. Real-time algorithm for acoustic imaging with a microphone array[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 125(5): EL190-195.

(编辑: 陈 越)