

循环平稳声场的声源定位研究

陈志敏[†] 朱海潮 毛荣富

(海军工程大学振动与噪声研究所, 武汉 430033)

(2011年3月20日收到; 2011年4月7日收到修改稿)

旋转机械产生的辐射声场具有循环平稳特性, 传统的平面近场声全息技术无法准确反映其调制特性, 往往在边频带上出现虚假的能量的分布. 采用循环谱密度取代功率谱密度作为重建物理量, 则可准确提取循环平稳声场的调制和载波信息. 考虑到循环谱密度的计算量以及特征提取的准确性, 提出了循环谱密度组合切片分析法, 并分析了加性白噪声对重建的影响. 仿真分析及实验结果表明, 此方法有较强的噪声抑制能力, 全息重建的结果可准确反映声源的位置.

关键词: 循环平稳声场, 近场声全息, 噪声源定位

PACS: 43.60.Sx, 43.60.Pt

1. 引言

近场声全息 (near-field acoustic holography: NAH) 是一种有效的噪声源定位技术^[1,2], 是当前声学领域一大研究热点, 其在声场分析中一般将声场近似为平稳声场. 但当声场的研究对象为旋转机械时, 其辐射声场具有明显的周期时变特性^[3-5], 因此, 将声场平稳化处理, 不可避免地损失了某些频率成分随时间变化的信息, 这样得到的全息图也就不能准确反映声场的本质特性.

循环统计量理论被广泛的应用于具有旋转结构的机械, 如齿轮箱、滚珠轴承、电机、内燃机等, 工程应用较多而且成熟的是二阶循环统计量, 并取得了一些成果. 文献[6]将二阶循环统计量和 NAH 相结合, 利用循环谱密度取代功率谱密度作为声场的重建量, 提出了循环平稳近场声全息 (cyclostationary near-field acoustic holography: CYNAH) 的概念. 但它是通过时域平滑算法由测量信号直接计算全息面的循环谱密度, 其计算量偏大, 不利于工程应用.

由此, 本文分析了循环自相关函数和循环谱密度的解调性能, 得出了两者具有相同循环频率集的结论. 在此基础上, 提出利用循环自相关的切片分析, 在循环频率轴上提取出感兴趣的峰值循环频率集, 在此频率集下分别计算循环谱密度切片, 通过

组合切片分析来排除谱频率轴上交叉项的干扰, 从而准确提取测量信号的特征频率. 在提取的特征频率下进行基于二维傅里叶变换的平面近场声全息重建, 针对性强, 计算量小, 结合了二阶循环统计量和 NAH 的优势, 可提取声源的特征频率 (或故障频率), 同时将此频率下的能量可视化.

2. 循环谱密度组合切片分析法

2.1. 循环自相关函数与循环谱密度的解调规律

对信号进行循环平稳分析时, 涉及到时变自相关函数、循环自相关函数和循环谱密度函数三个变量, 这三者和原始信号间的关系如图 1 所示.

图中, FT 表示对箭头另一侧的变量进行 Fourier 变换; AT 表示相关变换; CAT 表示循环相关变换. 可见, 循环谱密度的计算分为直接法和间接法两种, 由原始信号直接计算时, 采用的是和功率谱密度计算相似的周期图法, 为获得较高的分析精度, 需要较长的数据积累长度, 虽然有文献提出了快速算法^[7], 计算量及复杂程度仍然很大.

设一典型调幅信号为

$$x(t) = (1 + \cos(2\pi f_2 t)) \cos(2\pi f_1 t), \quad (1)$$

其中, 载波频率 $f_1 = 300$ Hz, 调幅频率 $f_2 = 32$ Hz. 设采样频率为 2048 Hz, 采样时间为 5 s, 首先对此信号

[†] E-mail: czml234567@yeach.net

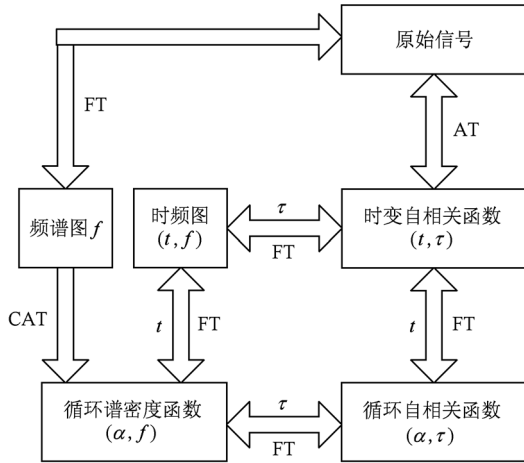


图1 关系图

进行二次非线性变换得到其时变自相关函数为

$$R_x(t, \tau) = E \{ x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) \}. \quad (2)$$

以时延 τ 为定值、时间 t 为变量对 $R_x(t, \tau)$ 进行 Fourier 变换得到循环自相关函数 $R_x^\alpha(\tau)$, 见图2. 对 $R_x^\alpha(\tau)$ 的时延 τ 进行 Fourier 变换得到循环谱密度 $S_x^\alpha(f)$ 其等高图见图3.

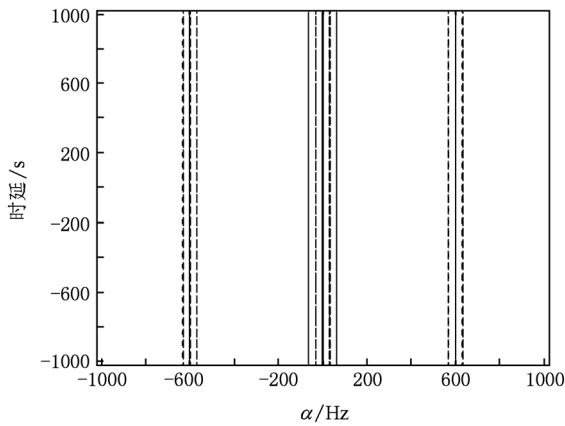


图2 循环自相关函数

如图2所示,循环自相关函数有效的实现了载波频率和调制频率的分离,将调制频率及其倍频成分分离在循环频率轴的低频段,在高频段则是二倍的载波频率以及和调制频率和差的边带成分. 如图3所示,循环谱密度的支撑域在双频率 (α, f) 平面上为一菱形区域,在循环频率轴上的取值范围和循环自相关函数完全相同,通过选取不同的循环频率可有效的提取载波频率和调制频率. 当 $\alpha = 0$ 时,循环谱密度就退化为传统的功率谱密度.

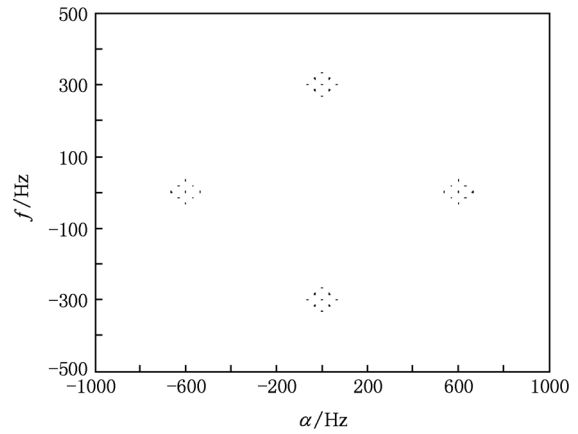


图3 循环谱密度

2.2. 循环谱密度组合切片法

通过信号的时变自相关函数来计算循环谱密度,相比于利用周期图法由信号直接计算清晰明了得多,但其计算量仍然相当大. 由图3可知,循环谱密度仅在循环频率处取值,在非循环频率处值为零,由此考虑首先获取循环平稳信号的循环频率集.

通过上面的分析可知,循环自相关函数和循环谱密度具有相同的循环频率集. 因此,取循环自相关函数时延为零时的切片,此时,其在循环频率域取最大值,选择其中感兴趣的峰值循环频率作为循环频率集,在特定的循环频率下分别计算 $R_x^\alpha(\tau)$ 和 $S_x^\alpha(f)$.

对离散的循环平稳信号,计算 $R_x^\alpha(\tau)$ 时常采用非对称式,其公式为

$$R_x^\alpha(kT_s) = \langle x(nT_s + kT_s) x^*(nT_s) e^{-j2\pi\alpha nT_s} \rangle_l \times e^{-j\pi\alpha kT_s}, \quad (3)$$

其中多了一个校正环节,主要是对计算 $S_x^\alpha(f)$ 时,在频谱域的频率移位补偿. 由3式的结果,仅进行一次 Fourier 变换就可得到特定循环频率下的循环谱密度切片,可大大的减少计算量.

对(1)式的调幅信号进行时延为零的循环自相关切片分析,见图4. 取各峰值循环频率分别计算 $S_x^\alpha(f)$, 其组合切片图见图5. 图5所显示的信息和图3完全相同,通过这些切片组合,就可有针对性的选取 α, f , 避免干扰.

3. 循环平稳声场近场声全息重建

本文采用基于二维 Fourier 变换算法的平面

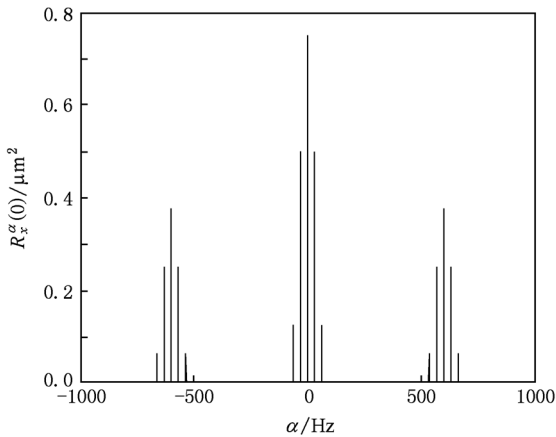


图4 循环自相关函数($\tau=0$)

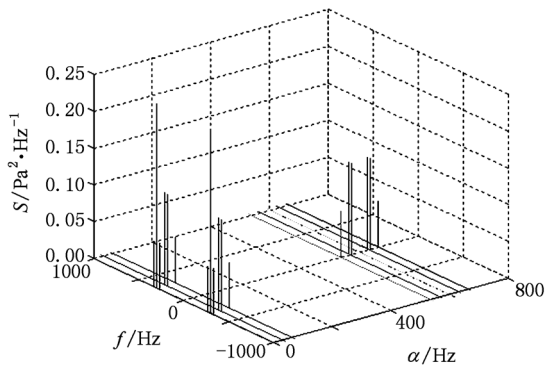


图5 循环谱密度组合切片图

NAH 技术,全息面的声压数据由扫描法获得. 对于平稳声场,其声场重建量是声压的频谱或功率谱;对于循环平稳声场,则采用声压的循环谱密度作为重建量,由于循环谱密度是 f 和 α 双频率决定的,其在物理性质上较功率谱密度有所不同,则要在重建算法上有所改进.

循环谱密度与功率谱密度相比,具有时延的敏感性,设信号 $v(t) = x(t - \tau_0)$ (τ_0 为时间延迟),则其循环谱密度为

$$S_v^\alpha(f) = S_x^\alpha(f) e^{-j2\pi\alpha\tau_0}. \quad (4)$$

设信号 $x(t)$ 经过一时不变系统,其输出信号可表示为 $z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau)x(t-\tau)d\tau$,由循环谱密度的滤波性质有

$$S_z^\alpha(f) = S_{zx}^\alpha(f) S_{xz}^\alpha(f) / S_x^\alpha(f), \quad (5)$$

其中, $S_{zx}^\alpha(f)$ 和 $S_{xz}^\alpha(f)$ 为 $x(t)$ 和 $z(t)$ 的一对循环互谱密度.

由于循环谱密度没有空间相位关系,相位关系

由参考信号和全息面测量信号之间的循环互谱密度获得. 通过扫描法获得的全息面声压和参考声压,转化为循环谱密度后由(4)式消除扫描过程中的时延影响;由循环谱密度的滤波性质可知,要对全息面测点声压与参考声压的一对消除了时延影响的互循环谱密度进行两次空间变换,利用(5)式才能得到重建面声压的循环谱密度分布. 两次空间变换的实际重建频率为 $f_{zx} = f - \alpha/2$ 和 $f_{xz} = f + \alpha/2$. 全息重建公式的推导见参考文献[6]. 当 $\alpha = 0$ 时,循环平稳声场 NAH 重建就退化成了平稳声场的 NAH 重建.

4. 仿真

4.1. 循环平稳声场重建

仿真声场由一嵌在无限大刚性障板上的活塞声源产生,活塞表面振速均匀,振速信号 $x(t)$ 为式(1),是一典型的循环平稳信号. 采样频率为 2048 Hz,采样时间为 5 s.

活塞大小为 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$,将其表面划分为 10×10 的矩形网格,各网格中心坐标为 $(x_i, y_i, 0)$. 以活塞的中心为坐标原点,所在平面为 XOY 平面建立坐标系,全息面与重建面均与 XOY 平面平行,两个面的中心均在 Z 轴上,如图6所示. 全息面距活塞所在平面为 0.1 m ,重建面距活塞所在平面为 0.05 m . 设定全息面尺寸为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,全息阵由 17×17 的测量点组成,测量采用快照法. 由于循环谱密度没有空间相位关系,设定参考信号在 Z 轴上距离活塞中心 0.02 m 处.

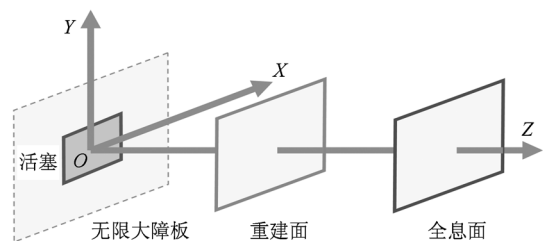


图6 空间坐标图

对振速信号 $x(t)$ 进行 Fourier 变换得到活塞表面振速的频谱 $\tilde{X}(f)$,然后采用瑞利积分公式的离散形式直接计算全息面各采样点在频率 f 处的复声压值,其公式为

$$p(x, y, z, f) = j\rho f \Delta x \Delta y \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} \tilde{X}(f) e^{j2\pi f r_{ij}/c} / r_{ij}, \quad (6)$$

式中, $r_{ij} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_j)^2 + z^2}$, 空气介质密度 $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$, 声速 $c = 343 \text{ m/s}$. 对得到的复声压进行逆 Fourier 变换, 就可得到各采样点的声压时域信号.

首先对参考信号进行循环谱密度组合切片分析, 其结果见图 5. 从图中可以看出, 当 $\alpha = 0$ 时, 循环谱密度就成为了传统的功率谱密度, 调幅频率 32 Hz 是以载波频率 300 Hz 的边频带出现的; 当 $\alpha = 32 \text{ Hz}$ 时, 调幅频率和载波频率出现交叉干扰, 在谱频率轴上是载波频率和二分之一倍调幅频率的和差形式出现; 当 $\alpha = 568 \text{ Hz}, 632 \text{ Hz}$ 时, 在谱频率轴上仅出现二分之一倍调幅频率; 当 $\alpha = 600 \text{ Hz}$ 时, 调幅频率被清晰的分离出来了; 当 $\alpha = 64 \text{ Hz}$ 时, 载波频率被清晰的分离出来了.

为了比较以功率谱密度和循环谱密度进行重建的不同, 选择 $\alpha = 0, 600 \text{ Hz}$ 分别进行平面 NAH 重建, 图 7 为 $\alpha = 0, f = 32 \text{ Hz}$ 时, 重建面上功率谱密度分布, 图 8 为 $\alpha = 0, f = 332 \text{ Hz}$ 时, 重建面上功率谱密度分布.

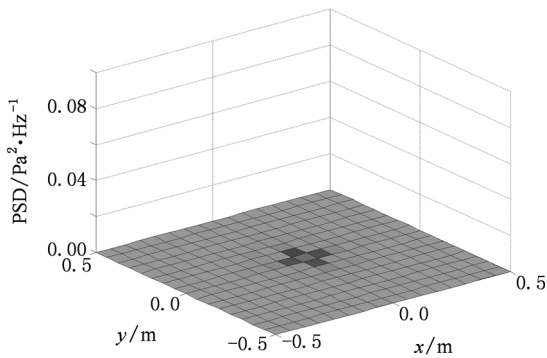


图 7 功率谱密度分布 ($\alpha = 0, f = 32 \text{ Hz}$)

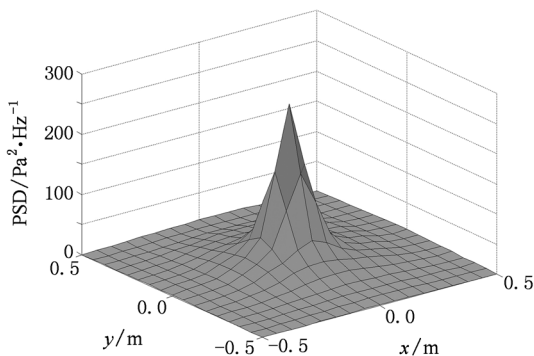


图 8 功率谱密度分布 ($\alpha = 0, f = 332 \text{ Hz}$)

如图 7 所示, 如果仅从功率谱来分析, 重建面上在调制频率处就得不到其能量场分布, 而在并不存在的边频带上出现了虚假的能量分布 (如图 8). 图 9 是选择 $\alpha = 600 \text{ Hz}, f = 32 \text{ Hz}$ 时, 重建面上的循环谱密度分布, 可见反映声源特性的调制成分被分离出来了, 这是以功率谱作为重建量的 NAH 技术所得不到的.

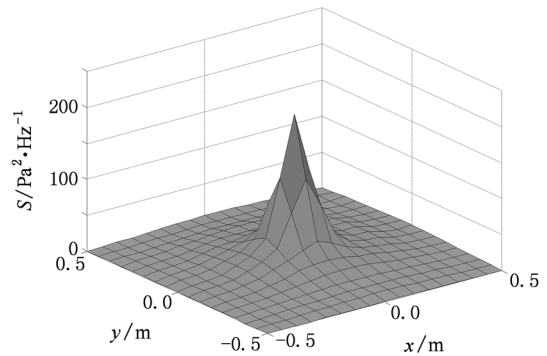


图 9 重建面上循环谱密度分布 ($\alpha = 600 \text{ Hz}, f = 32 \text{ Hz}$)

4.2. 加性白噪声对重建的影响

实际 NAH 测量中会受到各种噪声的影响, 噪声可能是随机的、平稳的或者是周期的. 由上述分析可知, 二阶循环统计量可提取信号特定的周期分量 (取不同的循环频率), 而噪声并不存在这样的周期成分, 即使是周期性的噪声, 也可选取不同的循环频率予以分离. 因此, 二阶循环统计量在理论上可完全抑制噪声的干扰, 但测量的信号长度有限, 其噪声的抑制能力与采样点数有关^[8,9].

在上面的仿真实例中, 选择 $\alpha = 600 \text{ Hz}, f = 32 \text{ Hz}$ 进行重建, 将各测点信号中加入均值为 0, 方差为 σ^2 的白噪声来模拟实际测量中的噪声, 定义信噪比 SNR 为全息面上左上角测点上的信噪比

$$\text{SNR} = 20 \log \frac{ph_{rms}}{\sigma}, \quad (7)$$

其中, ph_{rms} 为全息面左上角测点信号的 rms 值.

定义重建误差指标 Error 为

$$\text{Error} = \| S - S_{ref} \| / \| S_{ref} \| \times 100\%, \quad (8)$$

其中, S 为重建得到的声压循环谱密度, S_{ref} 为重建面上理论声压的循环谱密度, $\| \cdot \|$ 表示矩阵的 F -范数.

由表 1 可知, 当 σ 取不同值时, 利用 (7) 式定义的信噪比, 随着噪声的增大, 重建误差也逐渐增大, 但即使在较低的信噪比下, 重建的精度也相当高.

表1 重建误差(含加性白噪声)

| σ | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 15 | 20 |
|----------|-----|-----|------|------|------|-------|-------|
| SNR/dB | 7.3 | 1.3 | -2.2 | -4.7 | -6.5 | -10.1 | -12.7 |
| Error/% | 1.7 | 4.2 | 5.5 | 6.4 | 9.4 | 13.1 | 20.5 |

由此可见,利用循环谱密度取代功率谱密度作为NAH的重建量,有非常强的噪声抑制能力.

5. 实验

实验的对象为Y280M-6型三相异步交流电机,其额定转速为980 r/min,其基础为某一实验用隔振平台,实验时,电机以额定转速空载. 数据采集利用自行研制的NAH近场测量系统,采用扫描测量法. 测量网格点数为19(x 向) \times 12(y 向),两个方向上的测量点间距均为8 cm,全息面距离电机外表面为33 cm,参考传声器固定在电机正前方,采样频率为2048 Hz,采样时间为10 s. 实验现场如图10.

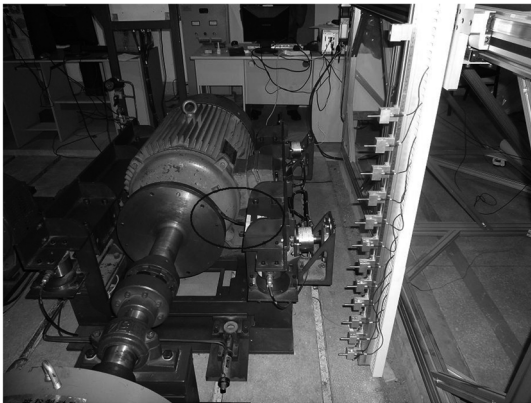


图10 实验现场图

设置两个实验条件:一是电机空载状态;二是电机空载状态下,在联轴节上(现场图椭圆处)放置一铁片,一端固定在台架上,另一端和联轴节摩擦产生机械噪声.

电机的辐射噪声有三个主要成分:机械噪声、电磁噪声和空气噪声^[10]. 机械噪声主要是转子和轴承的配合误差产生;电磁噪声主要是电机定子产生的交变磁力激励壳体产生;空气噪声则是风机冷却机体时产生的.

首先,按传统的分析方法,假设电机的辐射声场为平稳信号,参考传声器测得的电机声压信号功率谱密度如图11所示,电机在条件1和条件2下,

其辐射声场功率谱图没有明显变化,铁片摩擦噪声的频率成分不能确定,也就无法准确定位.

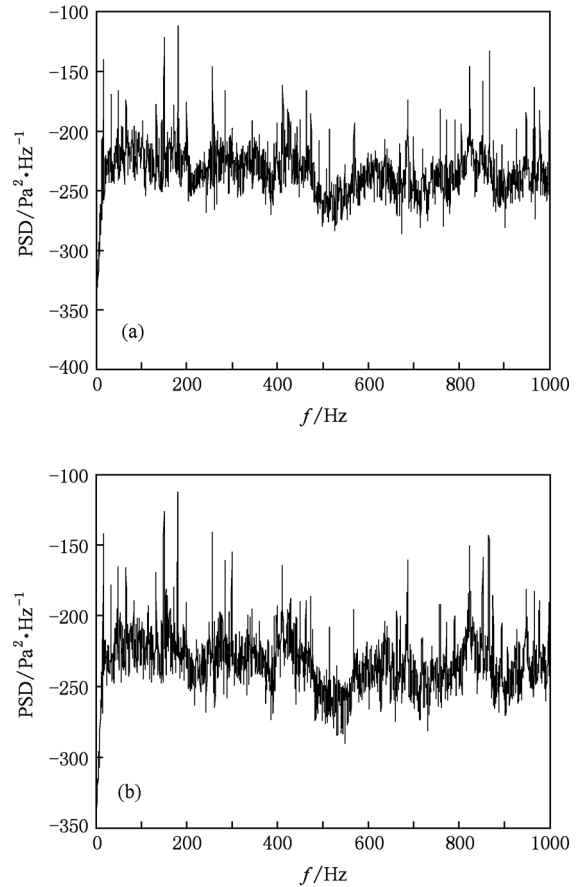


图11 参考信号功率谱密度 (a)条件1;(b)条件2

电机的辐射声场具有明显的周期时变特性,因此对参考信号进行时延为零的循环自相关分析,如图12.

对比图12中(a),(b)两图可以发现,在条件2中出现了电机轴转频16 Hz的周期成分. 在条件2中,铁片与联轴节摩擦产生的噪声频率是未知的,这与铁片的性质有关,但可以肯定的是其噪声中含有电机轴转频的周期成分. 由此,对条件2提取 $\alpha = 16$ Hz做循环谱密度单切片分析,见图13.

由图13可以看出,在谱频率轴上出现的峰值谱线间隔为16 Hz,也就说明了此切片图上出现的频率成分含有16 Hz的周期成分,取其最大峰值频率188 Hz作为分析频率进行循环平稳声场重建. 重建频率为 $\alpha = 16$ Hz, $f = 188$ Hz,设重建距离 $d = Z_c - Z_h$,其中 Z_c 为重建面位置、 Z_h 为全息面位置,以电机中心为原点,指向全息面方向为正方向,分别进行两次正向重建和两次逆向重建, $d = \pm 0.2$ m,

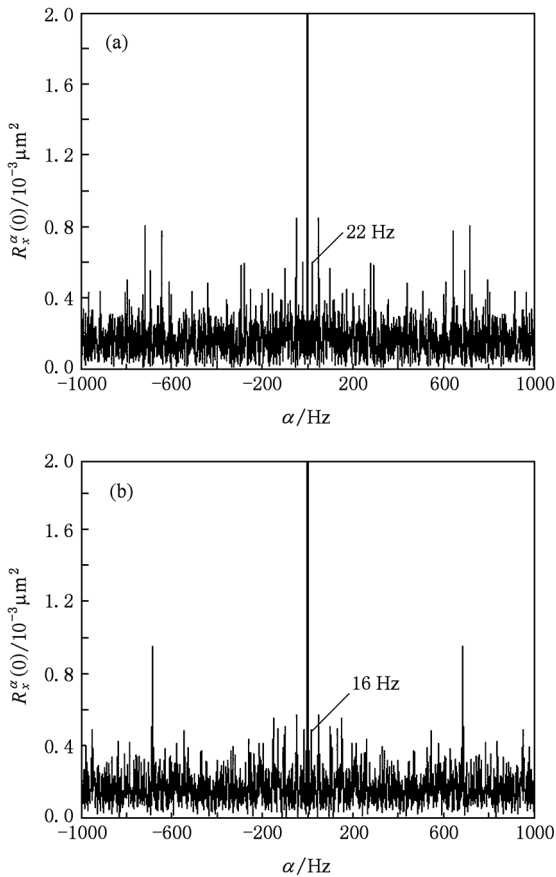


图12 循环自相关函数($\tau=0$) (a)条件1;(b)条件2

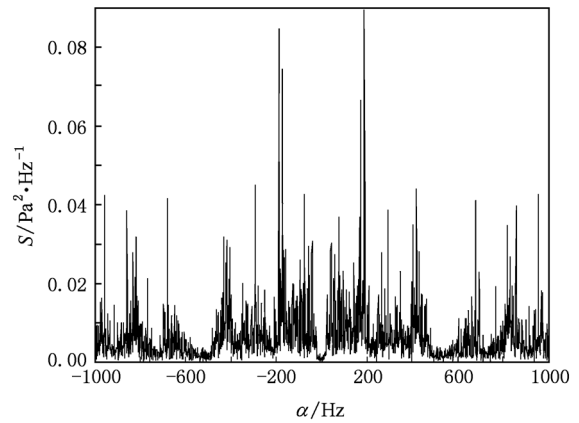


图13 循环谱密度切片($\alpha=16$ Hz)

± 0.1 m,重建结果见图14.

由图14可看出,铁片与联轴节产生的摩擦噪声被清晰的分离出来了(图中左端的声源).图中中间部分即是交变电磁力激励定子壳体产生的电磁噪声,右边是风机的冷却风噪声,电机的电磁噪声和空气噪声仍是重建频率下的主要噪声源,随着辐射距离的增大,电机的主要辐射噪声源以这两种噪声源为主.如果采用功率谱作为NAH的重建量,就忽略了铁片摩擦噪声的周期成分,在功率谱图上就无

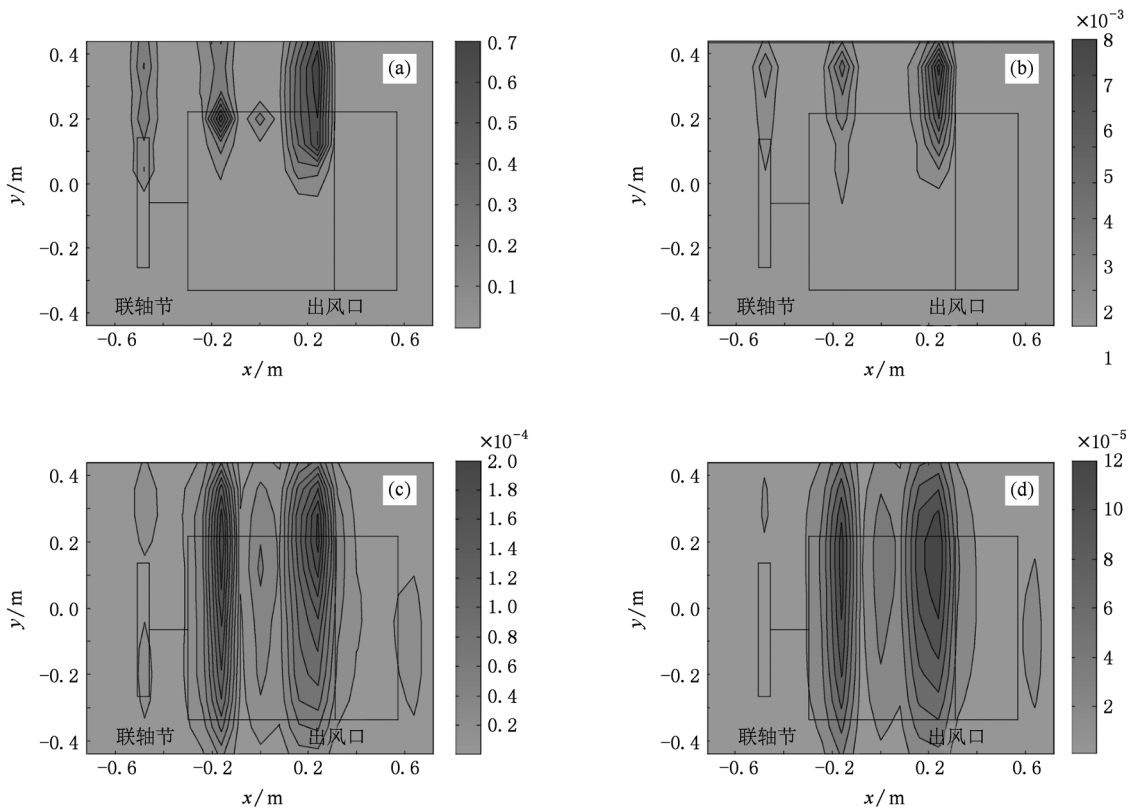


图14 不同重建距离下的循环谱密度分布($\alpha=16$ Hz, $f=188$ Hz) (a) $d=-0.2$ m;(b) $d=-0.1$ m;(c) $d=0.1$ m;(d) $d=0.2$ m

法准确提取噪声的频率,在全息图上也就不能反映摩擦噪声的能量分布.

6. 结 论

通过对循环自相关函数和循环谱密度的解调性能分析,提出了循环谱密度组合切片分析法,可

针对性的提取循环平稳声场的特征信息,计算量小. 仿真和实验的结果表明,采用循环谱密度取代功率谱密度作为 NAH 的重建量,对加性白噪声有很强的抗干扰能力,可提取常规 NAH 技术所不能提取的信息,此方法充分结合了二阶循环统计量和 NAH 技术两者的优势,促进了循环平稳声场噪声源定位技术在工程上的应用.

- | | |
|---|--|
| <p>[1] Maynard J D, Williams E G, Lee Y 1985 <i>J. Acoust. Soc. Am.</i> 78 1395</p> <p>[2] Veronesi W A, Maynard J D 1987 <i>J. Acoust. Soc. Am.</i> 81 1307</p> <p>[3] Randall R B, Antoni J, Chobsaard S 2000 <i>ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings</i> 6 3882</p> <p>[4] Randall R B, Antoni J, Chobsaard S 2001 <i>Mechanical Systems and Signal Processing</i> 15 945</p> <p>[5] Antoniadis I, Glossiotis G 2001 <i>Journal of Sound and Vibration</i>, 248 829</p> | <p>[6] 万 泉、蒋伟康 2005 <i>声学学报</i> 30 379</p> <p>[7] Roberts R S, Brown W A, Loomis H H 1991 <i>Computationally efficient algorithms for cyclic spectral analysis. Signal Processing</i> 4 38</p> <p>[8] Schell S V 1995 <i>IEEE Trans. Signal Processing</i> 43 173</p> <p>[9] 于宏毅、保 铮 1999 <i>西安电子科技大学学报</i> 26 133</p> <p>[10] Timar P L, Fazekas A, Kiss J 1989 <i>Amsterdam: Elsevier Science Publishers</i></p> |
|---|--|

Research on localization of the source of cyclostationary sound field

Chen Zhi-Min[†] Zhu Hai-Chao Mao Rong-Fu

(*Institute of Noise and Vibration, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*)

(Received 20 March 2011; revised manuscript received 7 April 2011)

Abstract

The conventional planar near-field acoustic holography technology cannot exactly refectact the modulation characteristics of cyclostationary sound field radiated from the rotating machineries, and the spurious energy distribution of sidebands exists in its hologram. When the cyclic spectral density (CSD), instead of the energy spectrum of sound pressure is adopted as a reconstructed physical quantity, the modulating wave and carrier wave components of the cyclostationary sound field can be extracted exactly. Focusing on the complicated nature of calculation and the accuracy of feature extracting, the CSD gathering slice method is proposed, and the effect of the additive white noise on the reconstruction is analyzed. The results of the simulation and experiments show that the method has the better anti-noise performance and sound source can be localized exactly.

Keywords: cyclostationary sound field, near-field acoustic holography, noise source localization

PACS: 43.60. Sx, 43.60. Pt

[†] E-mail: czm12345678@yeah.net