

循环谱密度组合切片分析在近场 声全息中的应用研究

陈志敏 朱海潮 毛荣富 杜向华

(海军工程大学 振动与噪声研究所 武汉 430033)

2010 年 12 月 31 日收到

2011 年 4 月 11 日定稿

摘要 为减小循环谱密度的计算量以及提高其特征提取的准确性, 提出了组合切片法: 取循环自相关切片的各峰值频率作循环频率分别计算循环谱密度切片, 通过组合切片分析来确定声场信号的特征频率。然后采用循环谱密度取代功率谱密度作为平面近场声全息的重建物理量。实验结果表明, 此方法可针对性的提取循环平稳声场的调制特性, 全息重建的结果可准确反映噪声源的位置。

PACS 数: 43.60

Application of cyclic spectral density gathering slice method to the near-field acoustic holography

CHEN Zhimin ZHU Haichao MAO Rongfu DU Xianghua

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

Received Dec. 31, 2010

Revised Apr. 11, 2011

Abstract The need for reducing the computational complexity and improving the precision of feature extracting of the Cyclic Spectral Density (CSD), the CSD gathering slice method was proposed, that is the peak frequencies of Cyclic Autocorrelation Function(CAF) slice are chosen as cyclic frequency to calculate a set of CSD slices and the feature frequencies of sound field signal are extracted by the CSD gathering slices. And the CSD, instead of the power spectrum of sound signal is adopted as reconstructed physical quantity in the planar near-field acoustic holography. The experiment results illustrate that modulation characteristics of cyclostationary sound field can be directly extracted and noise source can be exactly localized.

引言

近场声全息 (NAH: Near-field Acoustic Holography) 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。

文献 6 提出了循环平稳近场声全息 (CYNAH: Cyclostationary Near-field Acoustic Holography) 的概念, 将循环谱密度取代功率谱密度作为声场的重建量。文献 6 采用了时域平滑算法由测量信号直接计算循环谱密度, 然后在三维循环谱密度图上判断所有可能的候选循环频率, 再利用循环频率的检测方法估计实际的循环频率。在单通道的信号处理上, 此方法是可行的, 但对于多通道的近场声全息重建, 在保证测量精度的前提下, 其计算量偏大, 不利于工程的

推广应用。

由此, 本文在文献 6 的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。

1 循环谱密度组合切片分析

循环平稳随机信号 $x(t)$ 的时变自相关函数为:

$$R_x(t, \tau) = E\{x(t + \tau/2)x^*(t - \tau/2)\}, \quad (1)$$

其中 τ 为时间延迟, 时变自相关函数是以时间和时间延迟为变量的二元函数。假定 $x(t)$ 在时间变量上的周期为 T_0 , 以 T_0 为周期采样, 其采样满足循环遍历性, 对其进行 Fourier 级数展开:

$$R_x(t, \tau) = \sum_{\alpha} R_x^{\alpha}(\tau) e^{j2\pi\alpha t}, \quad (2)$$

其中 $\alpha = m/T_0$, 称为循环频率, 其 Fourier 系数为:

$$R_x^{\alpha}(\tau) = \langle x(t + \tau/2)x^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi\alpha t} \rangle_t, \quad (3)$$

其中, $\langle \cdot \rangle_t$ 表示时间平均算子。对离散的循环平稳信号常采用非对称式, 其公式为:

$$R_x^{\alpha}(kT_s) = \langle x(nT_s + kT_s)x^*(nT_s) e^{-j2\pi\alpha nT_s} \rangle_t e^{-j\pi\alpha kT_s}. \quad (4)$$

相对于式 (3), 式 (4) 多了一个校正环节, 其中延迟 $\tau = kT_s$ 。通过研究表明, 循环谱密度和循环自相关函数在循环频率轴上具有相同的循环频率集, 因此峰值循环频率通过时延为零的循环自相关函数获得。得到峰值循环频率集后, 由式 (4) 计算得到特定循环频率下的 $R_x^{\alpha}(kT_s)$, 利用循环维纳-辛钦关系, 对 $R_x^{\alpha}(\tau)$ 的时间延迟量 τ 进行 Fourier 变换, 得循环谱密度为:

$$S_x^{\alpha}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^{\alpha}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau. \quad (5)$$

相比于由测量信号直接计算, 此方法仅需 $n * k$ 次乘法和一次 Fourier 变换就可得到特定循环频率下的循环谱密度切片, 将三维计算简化为二维计算, 显然计算量大大减小。同时, 通过这些切片组合, 就可有针对性的选取 α 和 f , 避免干扰。

2 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 NAH 技术, 全息面的声压数据由扫描法获得。对于平稳声场, 其声场重建量是声信号的频谱或功率谱; 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 为扫描时间延迟), 其中 $x(t)$ 为参考信号, $v(t)$ 为延时后的参考信号, 则其循环谱密度为:

$$S_v^{\alpha}(f) = S_x^{\alpha}(f) e^{-j2\pi\alpha\tau_0}. \quad (6)$$

参考信号 $x(t)$ 与全息面测点信号 $z(t)$ 之间为一时不变系统, 则全息面测点信号可表示为 $z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau)x(t - \tau)d\tau$, 由循环谱密度的滤波性质有:

$$S_z^{\alpha}(f) = S_{zx}^{\alpha}(f) S_x^{\alpha}(f) / S_x^{\alpha}(f), \quad (7)$$

其中, $S_{zx}^{\alpha}(f)$ 和 $S_x^{\alpha}(f)$ 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式 (6) 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, 利用式 (7) 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 $f_{xz} = f - \alpha/2$ 和 $f_{zx} = f + \alpha/2$ 。

3 实验研究

3.1 音箱实验

实验在空间较大的厂房中完成, 通过电脑产生一路调幅信号, 分别接到两个相距为 14 cm 的音箱, 调幅信号为:

$$x(t) = \sin(2\pi f_1 t)[1 + 0.9 \sin(2\pi f_2 t)], \quad (8)$$

式中, 载波频率 $f_1 = 400$ Hz, 调幅频率 $f_2 = 32$ Hz, 在距离音箱表面 4 cm 处, 采用 SW-MPA416 传声器通过扫描法测量得到全息面声压。试验中, 采样频率为 4096 Hz, 采样时间为 10 s。全息面的大小为: 60 cm(x 向, 即水平方向) $\times$ 50 cm(y 向, 即垂直方向), 测量网格点数为 13(x 向) $\times$ 11(y 向), 两个方向上的测

量点之间的间距均为 5 cm。由于两音箱产生的是相干声场, 所以只需一个参考传声器, 参考传声器固定在两音箱中间。

通过参考传声器测得的音箱信号, 为典型的循环平稳信号。首先对其进行延时为零的循环自相关切片分析, 如图 1 所示。

由图 1 所示, 选择 α 为 0 Hz, 32 Hz, 768 Hz, 800 Hz, 832 Hz 作为峰值循环频率集, 然后分别做循环谱密度切片, 其频率集下的组合切片图见图 2。图 3 为由参考信号直接计算的循环谱密度等高图。

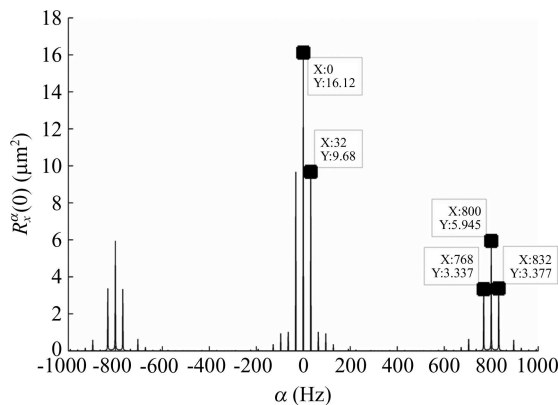


图 1 循环自相关函数 ($\tau = 0$)

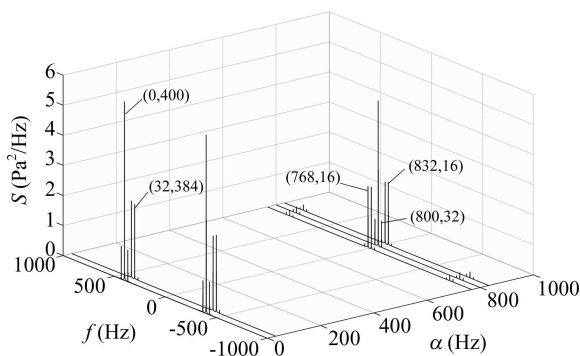


图 2 循环谱密度组合切片图

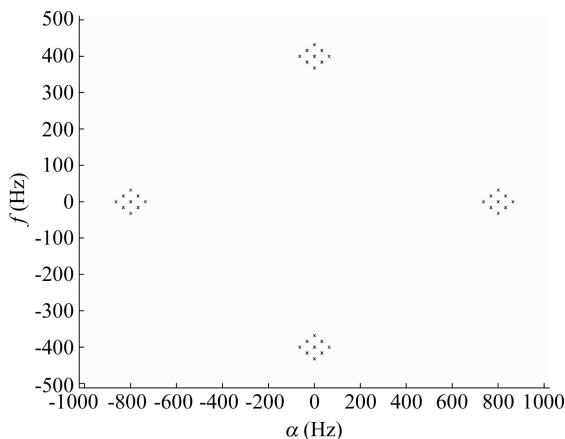


图 3 循环谱密度图

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, 仅在循环频率处取值, 在非循环频率处值为零, 图 3 和图 2 显示的信息也完全相同。由此可以看出, 如果采用循环谱密度组合切片法, 就可以避免大量在非循环频率处的谱相关计算。

由循环谱密度组合切片图分析可知, 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 400 Hz 的边频带出现的; 当 $\alpha = 32$ 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 $\alpha = 768$ Hz 和 832 Hz 时, 在谱频率轴上仅出现二分之一倍调幅频率; 当 $\alpha = 800$ Hz 时, 调幅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 $\alpha = 0$ Hz 和 800 Hz 分别进行 NAH 重建, 图 4 为 $\alpha = 0$, $f = 32$ Hz 时, 重建面上功率谱密度分布, 图 5 为 $\alpha = 0$, $f = 432$ Hz 时, 重建面上功率谱密度分布。在重建时, 为减小重建算法中的卷绕误差和泄露误差, 对全息测量数据进行处理, 通过在测量孔径周围填零形成保护带, 形成远大于测量孔径的虚拟孔径, 同时在波数域内采用常用的 K 空间滤波器, 截止频率 K_c 通过 L 曲线法获得。

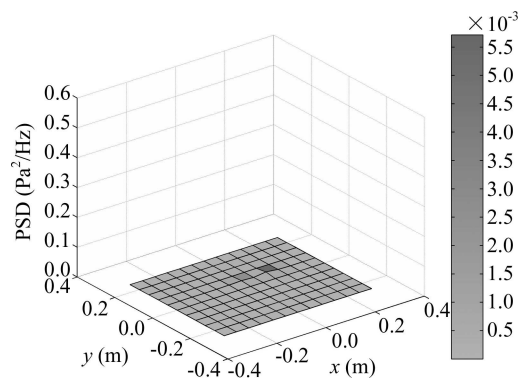


图 4 重建面上功率谱密度分布 ($\alpha = 0$ Hz, $f = 32$ Hz)

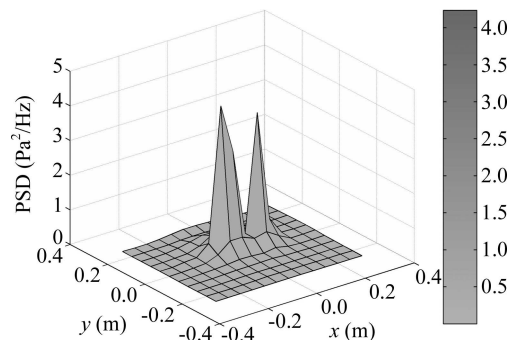


图 5 重建面上功率谱密度分布 ($\alpha = 0$ Hz, $f = 432$ Hz)

如果仅从功率谱来分析, 全息面上在调制频率处就得不到其声场分布 (如图 4), 而在并不存在的边频带上出现了虚假的声场分布 (如图 5)。图 6 是选择 $\alpha = 800 \text{ Hz}$, $f = 32 \text{ Hz}$ 时, 音箱表面的循环谱密度分布, 可见反映声源特性的调制成分被明显的分离出来了, 这是以功率谱作为重建量的 NAH 技术所得不到的。

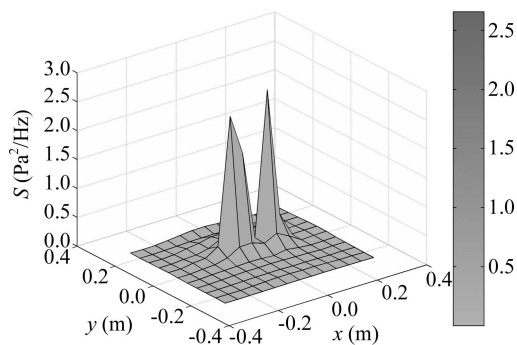


图 6 音箱表面的循环谱密度分布 ($\alpha = 800 \text{ Hz}$, $f = 32 \text{ Hz}$)

在音箱实验中, 通过参考传声器测得的信号进行循环自相关切片 ($\tau = 0$) 分析, 选取峰值循环频率集, 然后利用循环谱密度组合切片分析排除干扰循环频率。循环谱密度相比于功率谱密度, 包含有循环平稳信号分量和平稳信号分量, $\alpha = 0$ 时, 循环平稳声场的近场全息重建就成了平稳声场的近场全息重建。

3.2 空压机实验

实验的对象为 CZ-20-C 型空压机, 其驱动电机的转速为 2990 r/min, 压气机曲轴的转速为 1000 r/min。实验时, 为了抑制地面反射, 在空压机的下面铺垫了绒毯。测量网格点数为 27(x 向) $\times$ 24(y 向), 两个方向上的测量点之间的间距均为 8 cm, 全息面距离空压机护罩表面距离为 10 cm, 参考传声器固定在空压机正前方, 采样频率为 2048 Hz, 采样时间为 10 s。

对参考传声器测得空压机声压信号进行延时为零的循环自相关分析, 见图 7。

由循环自相关的解调性能分析, 调制频率及其倍频成分出现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调制频率的边带成分。17 Hz 是空压机上压缩机的转频, 压缩机是空压机的主要振源, 也是其辐射声场的主要调制成分。因此, 通过图 7, 选择峰值循环频率为 0 Hz, 17 Hz, 68 Hz, 219 Hz, 407 Hz, 507 Hz, 729 Hz, 图 8 为其循环谱密度组合切片图。

由图 8 可知, $\alpha = 0$ 是参考信号的功率谱密度, 当 α 取其它值时, 在 f 轴上分别出现了 25 Hz, 17 Hz,

60 Hz, 237 Hz, 204 Hz, 93 Hz 的频率成分, 这些频率的边带上均出现了 17 Hz 的成分, 其中 25 Hz 对应驱动电机的二分之一倍转频, 其它频率成分是由压缩机工作而产生的。

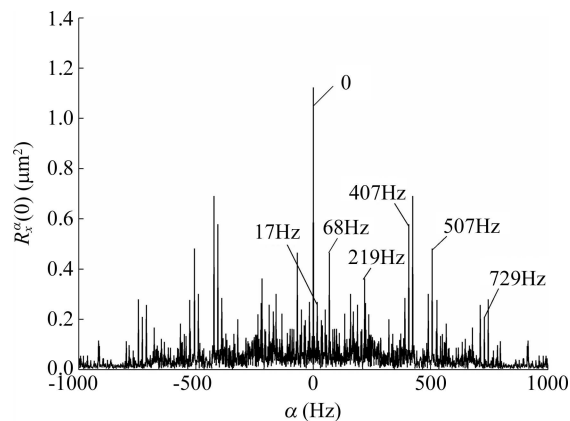


图 7 循环自相关函数 ($\tau = 0$)

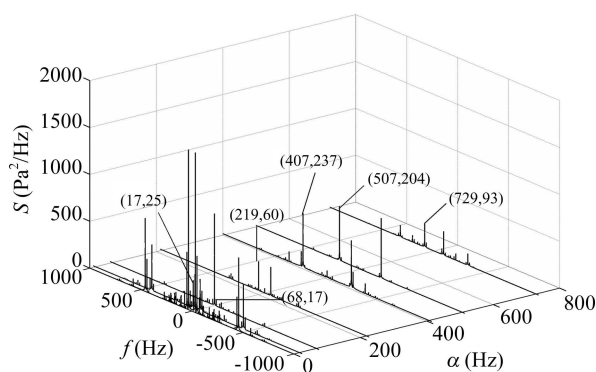


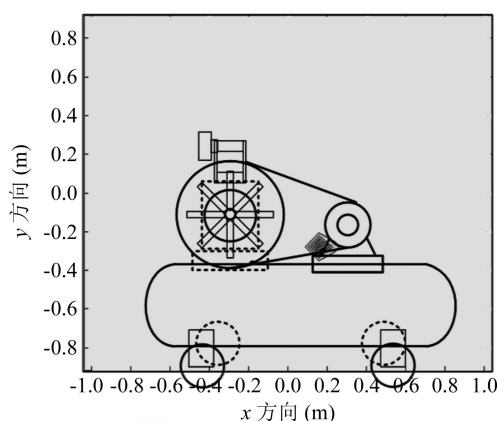
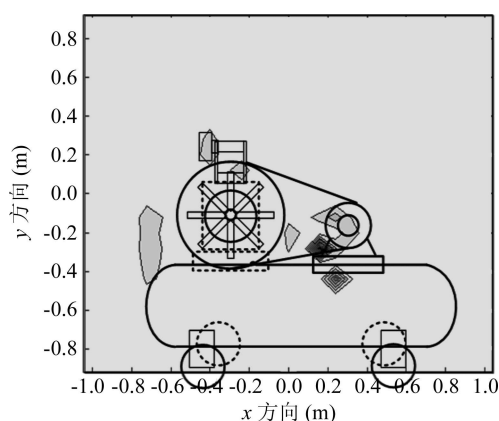
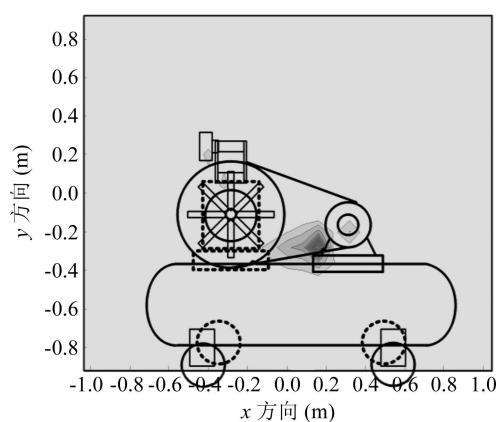
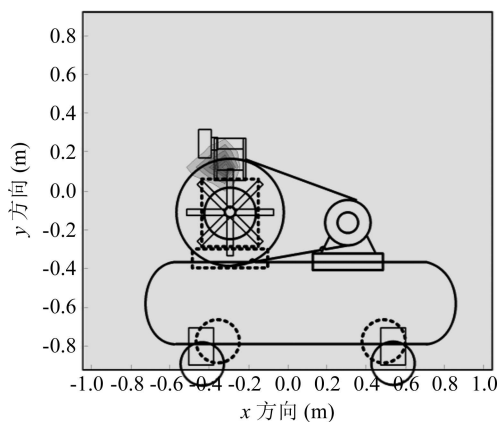
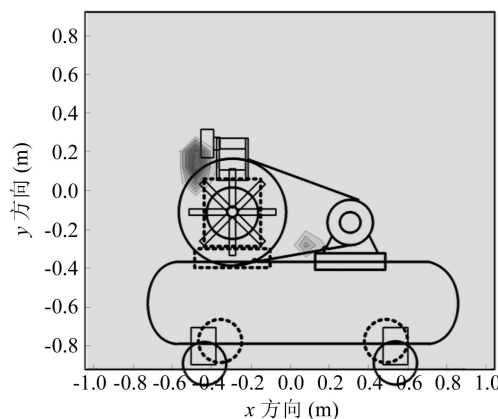
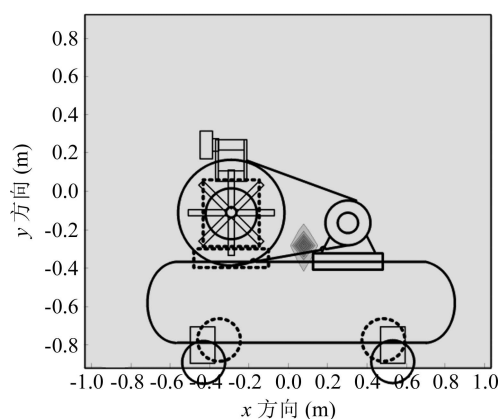
图 8 空压机参考信号循环谱密度组合切片图

在重建前先讨论实验设置对重建精度的影响。以循环谱密度作为重建量, 有两次空间变化, 则重建频率有两个, 取各次重建的最高频率 $f + \alpha/2 = 457.5 \text{ Hz}$, 其对应波长 $\lambda = c/(f + \alpha/2) \approx 0.7505 \text{ m}$ 。由文献 7 和文献 8 可知, 相邻测点间距与重建波长之比应在 0.1 左右, 可提高重建精度。同时, 全息面与声源表面距离应小于重建波长的 1/3, 可见此实验设置满足测量精度要求。

首先以传统的功率谱作为重建量, 选择重建频率 $\alpha = 0$, $f = 17 \text{ Hz}$ 和 $\alpha = 0$, $f = 204 \text{ Hz}$, 重建面在空压机护罩表面。

如图 9 和图 10 所示, 如果忽略了空压机辐射噪声的周期时变性, 不论是以压缩机的轴频 17 Hz 还是解调出来的其它频率 204 Hz 作为重建频率, 空压机的主要噪声源均在驱动电机的机脚处, 这样的全息图结果并不能反映实际机械设备的辐射特性。

下面选择分析频率 25 Hz, 17 Hz, 204 Hz 和 93 Hz 在对应的循环频率下做全息重建, 重建面选择在空压机护罩表面。

图 9 功率谱密度分布 ($\alpha = 0 \text{ Hz}$, $f = 17 \text{ Hz}$)图 10 功率谱密度分布 ($\alpha = 0 \text{ Hz}$, $f = 204 \text{ Hz}$)图 11 循环谱密度分布 ($\alpha = 17 \text{ Hz}$, $f = 25 \text{ Hz}$)图 12 循环谱密度分布 ($\alpha = 68 \text{ Hz}$, $f = 17 \text{ Hz}$)图 13 循环谱密度分布 ($\alpha = 507 \text{ Hz}$, $f = 204 \text{ Hz}$)图 14 循环谱密度分布 ($\alpha = 729 \text{ Hz}$, $f = 93 \text{ Hz}$)

由图 11—图 14 所示, 25 Hz 对应的驱动电机噪声源主要在其机脚处, 17 Hz 的压缩机轴频噪声源主要在压缩机中部, 204 Hz 和 93 Hz 的噪声源则主要分布在压缩机压缩空气的出口与储气箱的进口处。由全息图可知, 空压机的主要辐射噪声源除了驱动电机和压缩机两个辐射源外, 产生的压缩空气的压缩腔、压缩空气的进出口两端均是主要辐射源。

4 结论

研究表明, 采用循环谱密度取代功率谱密

度作为 NAH 的重建量, 可提取常规 NAH 技术所不能提取的信息, 鉴于循环谱密度计算复杂, 利用循环谱密度组合切片分析, 可准确提取循环平稳声场的特征信息, 针对性强, 计算量小, 充分结合循环谱密度和 NAH 技术两者的优势, 促进了循环平稳声场近场声全息技术在工程上的应用。

参 考 文 献

- 1 Maynard J D, Williams E G, Lee Y. Near field acoustic holography I. theory of generalized holography and the development of NAH. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1985; **78**(4):

- 1395—1413
- 2 Veronesi W A, Maynard J D. Near-field acoustic holography (NAH) II: holographic reconstruction, algorithms and computer implementation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1987; **81**(5): 1307—1322
 - 3 Randall R B, Antoni J, Chobsaard S. Comparison of cyclostationary and envelope analysis in the diagnostics of rolling element bearings. ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing – Proceedings, 2000; **6**: 3882—3885
 - 4 Randall R B, Antoni J, Chobsaard S. The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2001; **15**(5): 945—962
 - 5 Antoniadis I, Glossiotis G. Cyclostationary analysis of rolling-element bearing vibration signals. *Journal of Sound and Vibration*, 2001; **248**(5): 829—845
 - 6 万泉, 蒋伟康. 循环平稳声场近场声全息理论与实验研究. *声学学报*. 2005; **30**(4): 379—384
 - 7 何元安, 何祚镛, 商德江等. 基于平面声全息的全空间场变换: II 水下大面积平面发射声基阵的近场声全息试验. *声学学报*, 2003; **28**(1): 45—51
 - 8 何祚镛, 何元安, 王曼. 近场声全息技术应用有关物理问题研究. *声学学报*, 2007; **32**(2): 137—143

声学消息

《声学学报》2010 年度优秀论文奖颁奖

根据声学学报最佳论文评选办法, 中国声学学会声学学报编辑委员会对 2010 年度发表于《声学学报》的论文进行了两轮推荐投票, 根据推荐结果选出了获得声学学报 2010 年度优秀论文奖论文。

编委会认为, 2010 年我国声学科学的研究有相当发展, 这一点在声学学报所发表的论文中有充分的体现, 具体表现在声学各个分支方向都有不错的文章发表。

编委会认为: 钱梦騄、赵亚军、程茜等同志的“扫描探针声显微镜轻敲模式中相位像的反差机理”(声学学报, 2010 年第 35 卷第 3 期 289—297 页)一文及其相关的研究工作, 对扫描探针声显微镜轻敲模式的力学关系进行了深入分析, 得出了解析计算公式, 对纳米金刚石像中的相位差值的计算结果表明, 预测值与实测值十分吻合, 合理地解释了实验得到的光学薄膜试样相位像反差的形成机理, 验证了理论结果的正确性。从理论和实验上证明了 SPAM 轻敲模式的相位成像是一种高分辨率测量材料表面物理性质的成像技术。文章基础性、创新性强, 内容正确、概念清楚, 工作系统完整, 具有很好的学术意义和实际应用价值。决定授予声学学报 2010 年度优秀论文奖。

《声学学报》2010 年度优秀论文奖于 2011 年 11 月 19 日在中国声学学会第九届青年学术会议上颁奖, 同济大学声学研究所程茜代表获奖作者领奖并发表了获奖感言。

中国声学学会《声学学报》编辑委员会
2011 年 11 月 19 日