

文章编号:1000-8055(2011)03-0603-08

时频展缩随机共振用于航空发动机转子故障检测

王国富^{1,2}, 张海如¹, 张法全¹, 叶金才¹

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 桂林 541004;
2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要: 提出一种基于时频展缩的随机共振算法,用于检测转子早期故障信号,该方法充分利用了随机共振检测弱信号的优势,通过引入时频展缩,消除了随机共振系统对待测信号频率的限制,实现了在绝热近似理论下,从强噪声中提取出转子微弱早期故障信号. 理论分析和实测结果表明:对埋在强噪声中的未知频率的早期故障信号,采用连续的压缩算法,以获得一个适当的输入信号到随机共振体系,根据输出信号共振谐峰的变化,经反变换运算可得待测微弱故障信号的未知频率. 与传统方法相比,计算速度提高了 4 个数量级,能在极限信噪比(信噪比 -50 dB)下,提取出目标信号.

关 键 词: 航空发动机; 转子; 随机共振; 时频展缩; 早期故障检测; 弱信号检测
中图分类号: V231.9 **文献标识码:** A

Incipient fault detection for aero-engine rotor based on frequency compression of stochastic resonance

WANG Guo-fu^{1,2}, ZHANG Hai-ru¹, ZHANG Fa-quan¹, YE Jin-cai¹

(1. School of Information and Communication Engineering,
Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. Xi'an Institute Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: A frequency compression based on stochastic resonance (SR) for detecting incipient fault weak signal was presented because of the benefits of SR for detecting weak signals. The frequency limitation of SR was eliminated by introducing frequency compression. The incipient fault signal was detected from heavy noise under the condition of adiabatic approximation. Theoretical analysis and experiment results show that: to deal with the unknown incipient fault signals mixed with heavy noise, the mixed signal is compressed continuously to achieve a suitable frequency and then input to SR system. According to the change of resonance spectral peak value, the unknown incipient fault frequency can be obtained from heavy noise by inverse transform algorithm. Compared with traditional methods, the computing speed is increased by four magnitudes. The target signal is detected under -50 dB.

Key words: aero-engine; rotor; stochastic resonance (SR); frequency compression; incipient fault signal; weak signal detection

从高速运转的航空发动机转子中提取的早期故障信号一般带有很强的背景噪声,它们往往成

为旋转机械设备故障监测诊断的巨大障碍. 例如,当转子发生故障时,其振动信号中除了故障信号

收稿日期:2010-06-13; 修订日期:2010-10-25

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2008CB317109); 预研基金(A1120106BW0315)

作者简介:王国富(1977—),男,河南平顶山人,副教授,博士,主要从事航空发动机状态检测与故障诊断,非线性转子动力学研究.

E-mail:gfwang@opt. ac. cn

外,还混有能量较大的与转速有关的背景信号和噪声,特别是在故障发生的早期,这些故障信号很微弱往往被噪声所淹没.传统的故障信号检测方法有频谱分析、同步相关检测、取样积分和时域平均等方法^[1-4],然而这些检测方法在抑制噪声的同时,被检测信号也受到不同程度的抑制,因此很难从混有背景信号和噪声的转子振动信号中提取故障信息^[5-9].如果在转子故障发生的初期,能及时发现转子故障的早期征兆,以便采取相应措施,将故障消灭在萌芽状态,就可避免意外停机及恶性事故的发生.

随机共振系统在微弱信号检测中具有突出的优势^[10-16],当信号和噪声之间满足某种匹配关系时,噪声的存在不仅不会淹没信号,反而会将自身能量向信号能量转移,使输入信号的信噪比大幅度地增加,基于该系统的优良性能使其成为研究在强噪声背景下提取弱周期信号的有力工具.自1981年Benzi等公布随机共振方法^[13]以来,人们对其相关理论及其在各个工程领域的应用研究做了大量工作^[10,12],并总结出自然界中广泛存在着随机共振现象.虽然在现有的绝热近似和线性响应理论下,随机共振系统得到了一定程度上的应用,但这些理论仅适用于小参数信号(小幅度、小频率、小噪声).为了拓展随机共振系统的实用范围,使其适用于高频信号检测,人们提出了二次采样随机共振^[14-15]和调制随机共振^[10]两种改进方法,但这些改进方法只能检测频率已知的单一频率的高频信号.此外,还有人提出了随机共振系统检测多频率信号的方法^[16],但该方法只适用于多个小频率信号的检测.接收到的转子早期故障信号是大参数,且各频率分量未知的强噪声背景下的弱信号^[4],因此,传统的随机共振方法并不适用.因此,本文提出一种时频展缩随机共振弱信号检测方法,通过引入时频展缩,消除了随机共振系统对待测目标信号的频率限制,并以共振频率的形式自适应地测出原始早期故障信号中的目标频率.该系统能自适应地检测出全频段的周期弱信号,能准确预测发动机转子早期故障,这对于航空发动机的安全运行意义重大.

1 时频展缩的随机共振航空发动机转子故障信号检测方法

1.1 随机共振原理

随机共振系统通常以非线性朗之万方程作为研究的理论模型,在强噪声背景下的周期激励作

用下,考虑Brownian质点在双稳态势中的过阻尼运动^[13]

$$\begin{cases} \ddot{x} = -V'(x) + s(t) + n(t) \\ \langle n(t) \rangle = 0; \\ \langle n(t), n'(t') \rangle = 2D\delta(t-t') \end{cases} \quad (1)$$

式中 $V(x)$ 表示映像对称平方势.

$$V(x) = -\frac{a}{2}x^2 + \frac{b}{4}x^4 \quad (2)$$

式(1)可写为

$$\ddot{x} = ax - bx^3 + s(t) + n(t) \quad (3)$$

式中 $s(t)$ 表示目标信号, $n(t)$ 表示零均值 D 强度的高斯白噪声, x 表示系统输出序列, a 和 b 为随机共振系统的动态参数,当 $s(t) = A\cos(\omega t + \Phi)$ 时,余弦信号在高斯噪声的驱动下提供外力作用,通过调整参数 a 和 b ,该余弦信号可在双势阱之间发生跃迁,产生随机共振现象. ω 表示信号的频率, Φ 表示目标信号的相位角, A 表示目标信号的幅度, A 和 D 为无量纲.在无含噪信号输入时,方程(3)表征为具有两个对称势阱的非线性系统,其底部在 $x_{1,2} = \pm \sqrt{a/b}$ 处,中央势垒的高度是 $\Delta V = 0.25a^2/b$.

1.2 时频展缩原理

对信号进行时频展缩变换,首先假设时域信号为 $n_k(t)$,其对应的频域信号为 $N_k(j\omega)$,则时域信号 $n_k(mt)$ 对应的频域信号为 $\frac{1}{|m|}N_k(j\omega)\left[j\frac{\omega}{m}\right]$,其中要求 m 不等于零.对时域信号压缩 m 倍,映射到频域中其频谱相应地扩展 m 倍,反之亦然.因此,可将强噪声环境中检测到的故障信号的频率降低到低频率,输入随机共振系统,产生共振后,提取频域压缩后的目标信号的共振频率,再还原得到目标信号频谱.

1.3 算法步骤

时频展缩随机共振转子早期故障弱信号检测算法步骤如实现流程图所示(图1).

步骤1) 将含噪声信号 $n_k(t)$ 输入随机共振系统.

步骤2) 判断系统是否发生共振,若引起了共振,则保存共振频率 f_i ;否则,执行步骤4).

判断系统是否发生共振的方法为:首先,将纯噪声信号 $n(t)$ 输入随机共振系统,对系统输出信号进行功率谱估计,得到纯噪声的功率谱强度 P_n ;然后,将含噪信号 $n_k(t)$ 输入随机共振系统,对系统输出的信号进行功率谱估计,若输出信号

的功率谱中有满足功率谱强度 $P_{f_i} > 300 \times P_n$ 的频率分量 f_i , 即产生了共振现象, 此时 f_i 即为共振频率。

步骤3) 从信号 $n_s(t)$ 中, 将步骤2) 中检测到的所有共振频率分量 f_i 滤除, 得到新的信号 $n_s(t)$, 执行步骤1)。

步骤4) 设定记录压缩倍数的标记号为 m , 初值等于1, $m = m \times N$, N 为正整数, 通常 $N = 10$ 。当 m 小于待测目标信号最高频率的10~100倍时, 用时频展缩特性将信号 $n_s(t)$ 的频率压缩 m 倍, 得到新的信号 $n_s(t)$, 之后执行步骤1); 如果 m 不小于待测目标信号最高频率的10~100倍, 则执行步骤5)。

在具体的应用领域中, 待测目标信号的频率范围是可以预先估算出来的, 为了保证能将目标信号的全部频率分量提取出来, 将估算的待测目标信号的最高频率扩大10~100倍, 作为 m 的上限值。

步骤5) 将检测到的所有共振频率 f_i 进行还原, 即各频率分量 f_i 分别乘以其对应的 m 值, 得到待测目标信号的真实频率。

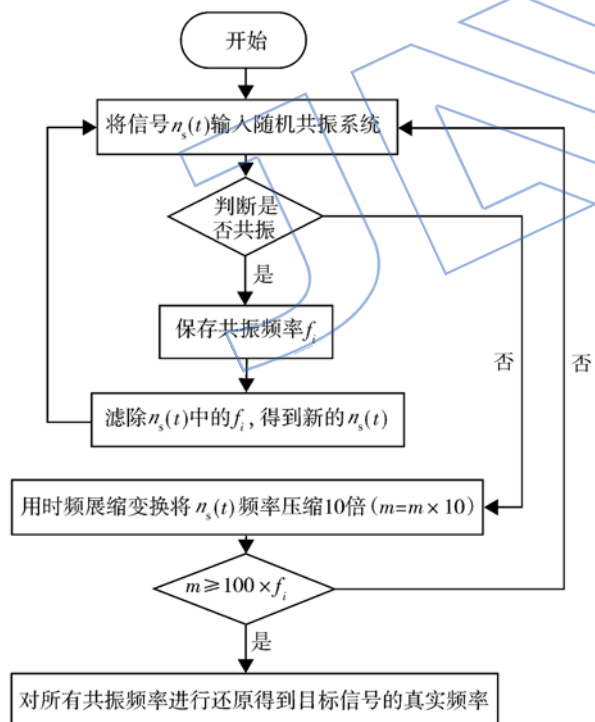


图1 时频展缩算法流程图

Fig.1 Process of frequency compression

2 数值仿真和实验结果

2.1 数值仿真

以下仿真为了验证该算法对高频未知信号

的检测能力。

对式(1), 输入含加性噪声的信号 $n_s(t) = s(t) + n(t)$, $s(t)$ 为目标信号, $s(t) = \sum A_i \cos(\omega_i t)$ 为多个多频率叠加信号, 其中 A_i 为目标信号幅度, 其大小对系统影响很小, 不作考虑; ω_i 为目标信号频率; ω_i 范围是1~100 000 Hz. $n(t)$ 是强度为 $D \approx 48.5$ 的高斯白噪声, 所用随机共振系统参数为 $a = 0.1, b = 1$, 此时假设目标信号频率未知。

按照时频展缩算法, m 从1递增至100时, 依次输入随机共振系统如图2~图4所示。

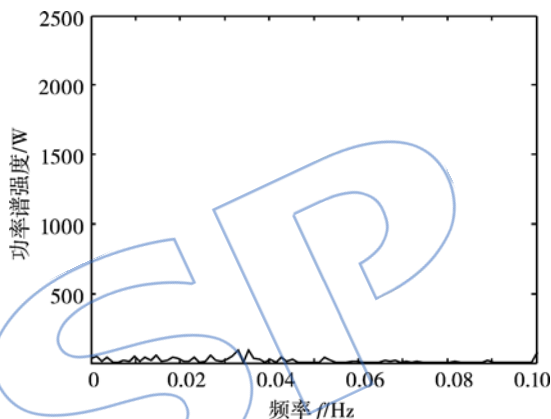


图2 无频率分量共振图 ($m=1$)

Fig.2 No resonance frequency ($m=1$)

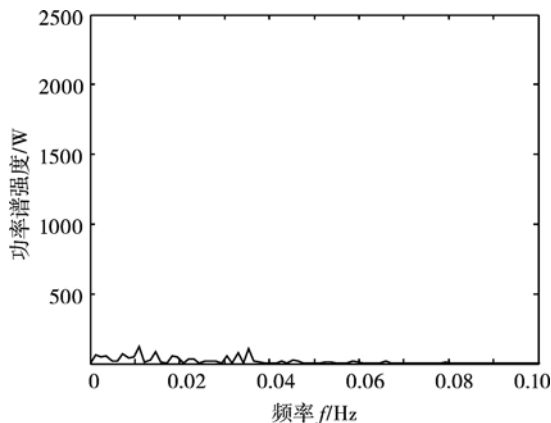


图3 无频率分量共振图 ($m=10$)

Fig.3 No resonance frequency ($m=10$)

如图2~图4所示, 当 $m=1, 10, 100$, 未发生共振, 亦即原始信号没有含小频率分量。

当 $m=1000$ 时, 信号输入随机共振系统, 如图5所示, 频率为0.03275 Hz时发生共振。

滤除32.72 Hz频率成分, 其余信号再压缩10倍(即: $m=10000$)时, 剩余信号输入随机共振系

统,如图6和图7所示。

表1是对图2~图13实测结果的总结。

从表1可以看出:原始信号压缩1000倍时,频率为0.03275 Hz时发生共振,反变换知道原始

信号含有为32.75 Hz频率成分;此时滤除32.75 Hz信号,再继续压缩10倍,频率为0.00999,

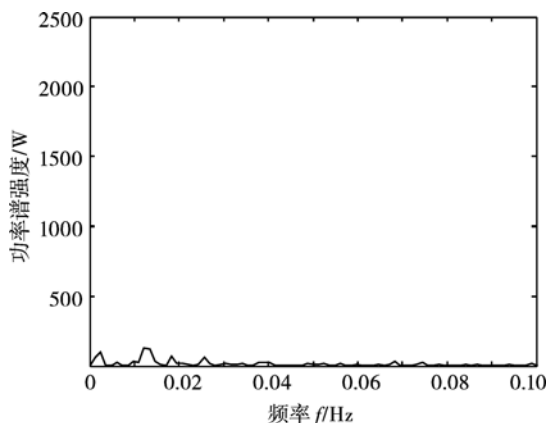


图4 无频率分量共振图($m=100$)

Fig. 4 No resonance frequency ($m=100$)

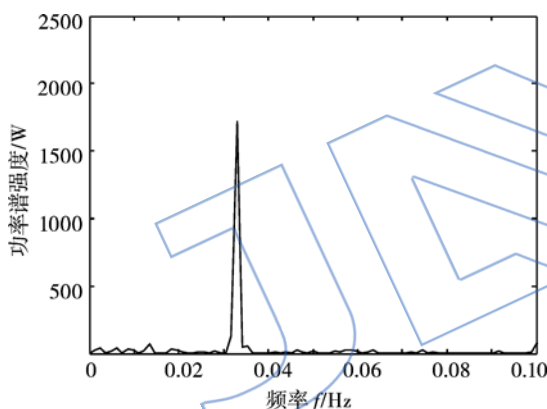


图5 0.03275 Hz 频率分量共振($m=1000$)

Fig. 5 0.03275 Hz resonance ($m=1000$)

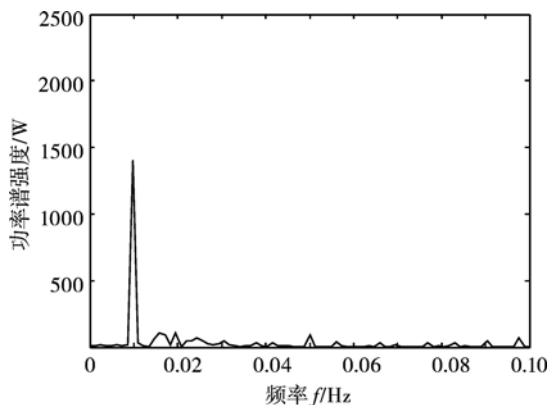


图6 0.00999 Hz 频率分量共振($m=10000$)

Fig. 6 0.00999 Hz resonance ($m=10000$)

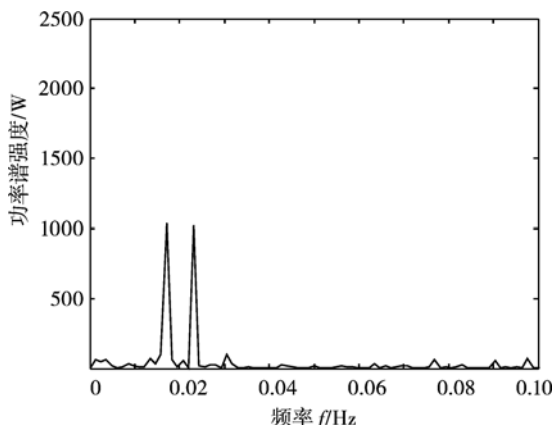


图7 0.0166,0.0233 Hz 频率分量共振($m=10000$)

Fig. 7 0.0166,0.0233 Hz resonance ($m=10000$)

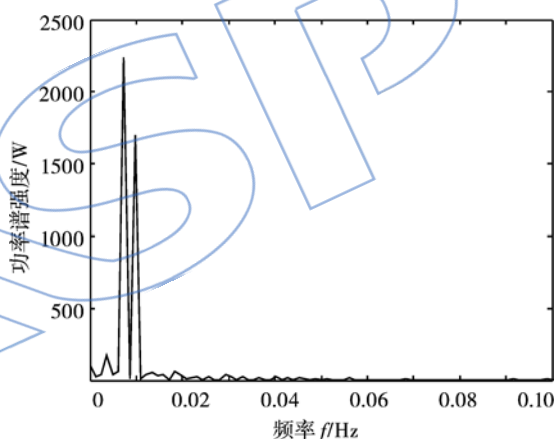


图8 0.00767,0.00967 Hz 频率分量共振($m=100000$)

Fig. 8 0.00767,0.00967 Hz resonance ($m=100000$)

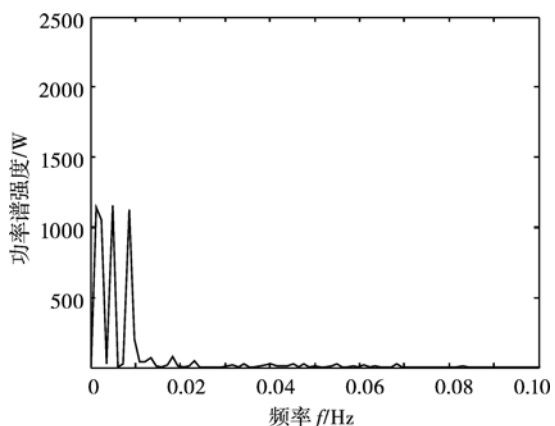


图9 0.00300,0.00500,0.00833 Hz

频率分量共振($m=100000$)

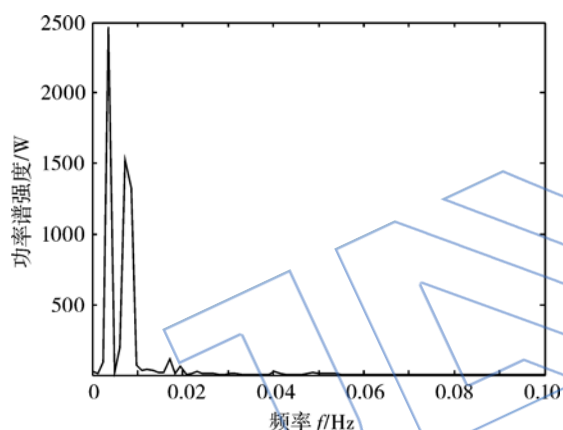
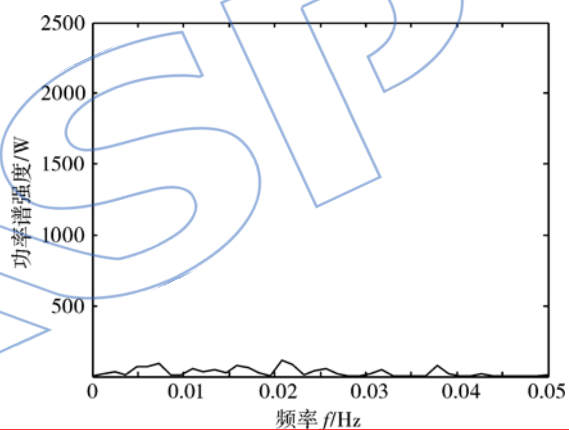
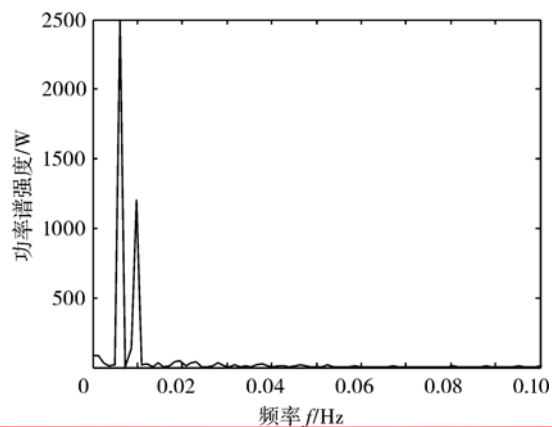
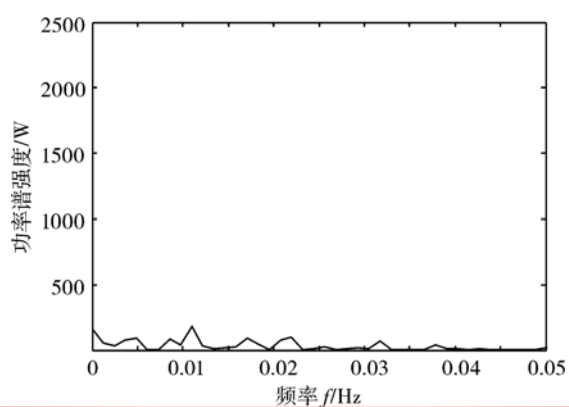
Fig. 9 0.00300,0.00500,0.00833 Hz resonance

($m=100000$)

表1 时频展缩随机共振弱信号检测过程

Table 1 Process of detection for weak signal based on frequency compression of stochastic resonance

压缩次数	压缩倍数 m	共振频率 f_i/Hz	反变换后信号频率/Hz
初始	1	无	无
1	10	无	无
2	100	无	无
3	1000	0.03275	32.75
4	10000	0.00999, 0.0166, 0.0233 0.00300, 0.00366, 0.00434, 0.00500,	99.9, 166, 233 300, 366, 434, 500,
5	100000	0.00567, 0.00632, 0.00699, 0.00767, 0.00833, 0.00901, 0.00967	567, 632, 699, 767, 833, 901, 967
6	1000000	无	无
7	10000000	无	无

图10 0.00366, 0.00699 Hz 频率分量共振 ($m=100\,000$)Fig. 10 0.00366, 0.00699 Hz resonance ($m=100\,000$)图12 无频率分量发生共振 ($m=1\,000\,000$)Fig. 12 No resonance frequency ($m=1\,000\,000$)图11 0.00434, 0.00567 Hz 频率分量共振 ($m=100\,000$)Fig. 11 0.00434, 0.00567 Hz resonance ($m=100\,000$)图13 无频率分量发生共振 ($m=10\,000\,000$)Fig. 13 No resonance frequency ($m=10\,000\,000$)

0.0166, 0.0233 Hz 的信号发生共振, 反变换可得原始信号含有 99.9, 166, 233 Hz 频率; 再滤去 99.9, 166, 233 Hz, 再继续压缩 10 倍, 频率为 0.00300, 0.00366, 0.00434, 0.00500, 0.00567, 0.00632, 0.00699, 0.00767, 0.00833, 0.00901, 0.00967 Hz 发生共振, 反变换可得原始信号含有 300, 366, 434, 500, 567, 632, 699, 767, 833, 901, 967 Hz; 再滤去 300, 366, 434, 500, 567, 632, 699, 767, 833, 901, 967 Hz, 继续压缩 10 倍, 无任何频率发生共振; 再继续压缩 10 倍时仍旧没有新频率发生共振; 根据假设原始信号的频率范围可知 (1~100 000 Hz), 再无更高的频率出现, 因此算法终止. 此时已提取出全部的目标信号频率. 此仿真实例证明, 时频展缩算法不但可以提取单一频率的高频信号, 也可以提取连续频率的高频信号.

2.2 实验结果

承力机匣、压气机静子、涡轮静子和其他机匣构成了发动机的主框架. 高压压气机、高压涡轮通过一根长轴连为一体, 形成高压转子. 低压转子的结构与高压转子类似. 高压转子和低压转子通过承力机匣的轴承安装在发动机中, 低压转轴穿过高压转轴将低压压气机和低压涡轮相连. 高压轴中还有中介轴承. 发动机通过主安装节和辅助安装节安装在地面试车台上, 各种附件安装在发动机机匣上. 振动信号是分布安装在发动机中介机匣垂直方向上和涡轮转子支撑轴承垂直方向上的加速度传感器采集得到, 抗混频滤波器带宽为 6 kHz, 保证了其主要成分是转子振动, 采样频率为 26 kHz.

图 14 所示是现场采集的发动机低压涡轮转

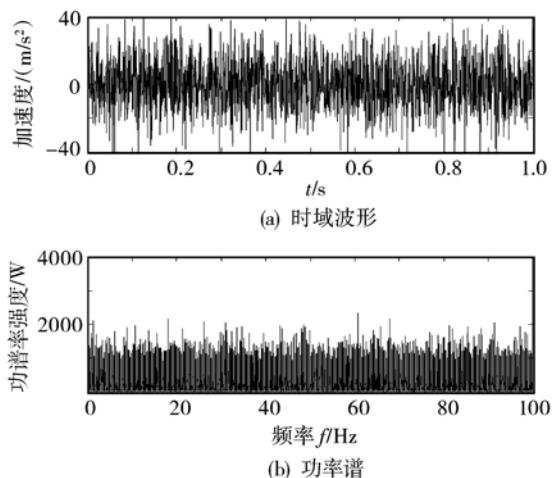


图 14 某航空发动机低压涡轮转子振动加速度信号
Fig. 14 Vibration acceleration signal of the low-pressure turbine rotor of an aero-engine

子振动加速度的时域波形和频域功率谱图, 在时域和频域图上都无明显的故障信息. 利用时频展缩算法, 压缩 10 000 倍后输入随机共振系统, 如图 15 所示, 输出信号在 0.0051 Hz 处发生共振, 继续压缩时无共振频率输出, 经反变换可知系统在原始信号含有 51 Hz 周期信号, 此频谱大约是低压涡轮转子试车转速的 25 Hz 的两倍频程, 这种倍频的谱峰特征, 预示着主轴机械可能存在松动, 而不是轴承断裂的原因, 经检查发现, 低压涡轮转子由于一个前支撑轴承游隙过大, 导致转子不平衡, 不对中导致主轴松动.

图 16 是某航空发动机低压涡轮转子后滚动轴

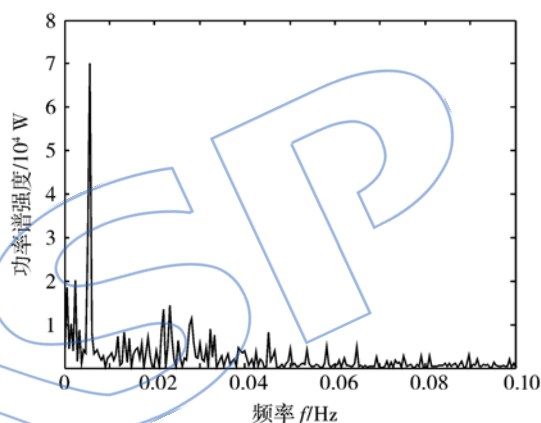


图 15 输出信号在频率 0.0051 Hz 处发生共振 ($m=10000$)

Fig. 15 Output power spectrum of the bistable system at 0.0051 Hz ($m=10000$)

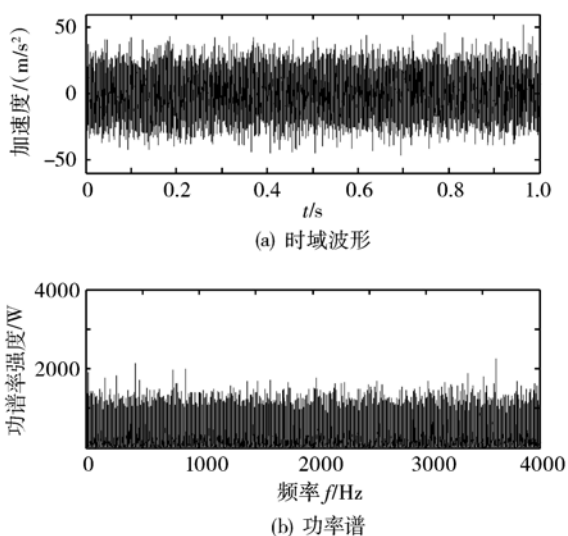


图 16 某航空发动机低压涡轮转子后滚动轴承振动加速度信号

Fig. 16 Vibration acceleration signals of the low-pressure turbine rotor rear bearing of an aero-engine

轴承振动加速度时域波形和频域功率谱图,在时域和频域图上也都没有明显的故障信息,但当压缩原始信号 100 000 倍输入随机共振系统,如图 17 所示,输出信号在 0.0201 Hz 处发生共振,滤去 2010 Hz 频率,重新输入系统,0.0302 Hz 发生共振,再滤去 3 020 Hz 频率,重新输入系统,0.0399 Hz 发生共振,滤去 3 990 Hz 频率,重新输

入系统,没有发生共振,继续压缩 10 倍,也没有发生共振.因此,知道原始信号含有 2 010,3 020,3 990 Hz 的微弱信号成分,而这一信号恰好是后滚动轴承固有频率 1010 Hz 的 2,3,4 倍频成分,因此怀疑是后轴承本身出现故障.在系统更换了后轴承后,系统信号经压缩变换后无谐振峰输出,证明原来轴承有缺陷的判断是正确的结论.

3 结 论

航空发动机转子的故障在发生初期表征非常微弱,这对弱信号检测技术是一个挑战.传统的检测方法在降噪的同时目标信号也会受到一定的抑制,对于这种极限情况的微弱信号(-50 dB),基本上无法提取出目标信号.随机共振现象是噪声能量向信号能量转移而表现出来的,但仅在低频、单一的高频已知频率信号的情况下有高强度的信号输出.本文利用时频展缩改进随机共振系统,可使高频未知信号经过连续的时频展缩后,再通过非线性双稳系统发生共振,经反变换即可得到原始信号所含的频率.与文献[10]提出的调制与解调方法相比,调制与解调信号频率必须很接近(相差 0.005 Hz),例如本文的航空发动机转子所含 51 Hz 的频率,文献[10]的算法要经过 10 200 次扫频($51/0.005$)的调制与解调才有可能找到此频率,而且每个频率的调制与解调均需要找到不同的随机共振参数(a, b, D),这在实际的在线辨识中是不现实的.如果共振频率变大,扫频次数还将急剧增加.而本文所提时频展缩的随机共振方法,在同样的 51 Hz 频率处仅需要 5 次($51/10^m$),(m 依次取 0,1,2,3,4)即可提取出,且无需调整随机共振系统的参数.本方法与传统的相关分析,FFT (fast Fourier transformation) 谱分析以及普通的滤波等方法相比,有效地解决了传统降噪方法对特征信号的保留能力不足、数据采集量大、处理速度慢的缺陷,实现了在全频率范围内从强噪声中检测转子故障微弱信号.

参考文献:

- [1] Chiang H W D, Kuan C P, Li H L. Turbomolecular pump rotor-bearing system analysis and testing [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2009, 27(5): 1196-1203.
- [2] Wen P, Lu T W. Decoupling control of a twin rotor mimo system using robust deadbeat control technique [J]. Control Theory & Applications, IET, 2008, 2(1): 999-1007.
- [3] Yang S M, Huang C L. A hall sensor-based three-dimen-

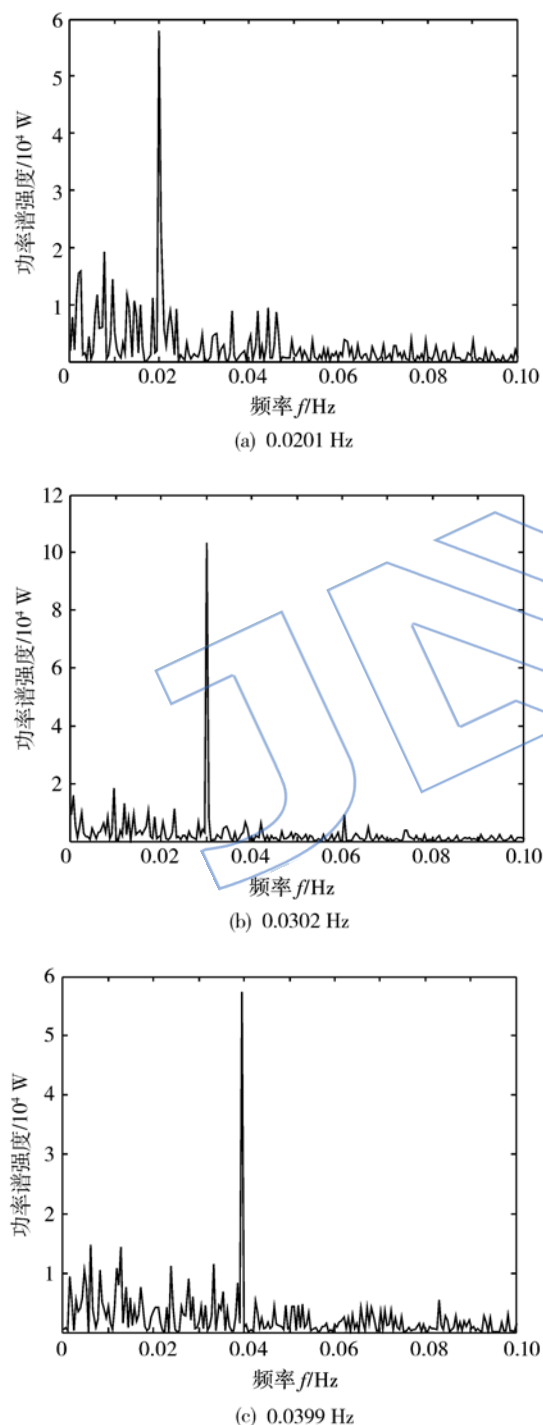


图 17 频率分量共振 ($m=100\,000$)

Fig. 17 Resonance frequency ($m=100\,000$)

- sional displacement measurement system for miniature magnetically levitated rotor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(12): 1872-1878.
- [4] Drrell D G, Cossar C. A vibration-based condition monitoring system for switched reluctance machine rotor eccentricity detection[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(9): 2204-2214.
- [5] Zhou J B, Meng G, Chen J Y. Bifurcation analysis of ultra short self-acting gas journal bearings for MEMS[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(8): 3188-3194.
- [6] 陈果, 李兴阳. 航空发动机整机振动中的不平衡-不中-碰摩擦耦合故障研究[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(10): 2277-2284.
- CHEN Guo, LI Xingyang. Study on imbalance-misalignment-rubbing coupling faults in aero-engine vibration[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(10): 2277-2284. (in Chinese)
- [7] Chau K T, Chan C C, Liu C H. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(6): 2246-2257.
- [8] 周海仑, 陈果. 航空发动机双转子-滚动轴承-机匣耦合系统动力学分析[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(6): 1284-1291.
- ZHOU Hailun, CHEN Guo. Dynamic response analysis of dual rotor-ball bearing-stator coupling system for aero-engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(6): 1284-1291. (in Chinese)
- [9] 鲁峰, 黄金泉. 航空发动机部件性能参数融合预测[J]. *航空学报*, 2009, 30(10): 1795-1800.
- LU Feng, HUANG Jinquan. Engine component performance prognostics based on decision fusion[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(10): 1795-1800. (in Chinese)
- [10] 林敏, 黄咏梅. 调制与解调用于随机共振的微弱周期信号检测[J]. *物理学报*, 2006, 55(7): 3277-3282.
- LIN Min, HUANG Yongmei. Modulation and demodulation for detecting weak periodic signal of stochastic resonance[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(7): 3277-3282. (in Chinese)
- [11] Chen H, Pramod K, Michels J H. Noise enhanced parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(10): 5074-5081.
- [12] Benzi R, Srueter A, Vulpiani A. The mechanism of stochastic resonance[J]. *Physics Letters A*, 1981, 4(11): 453-457.
- [13] Hartmann F, Hartmann D, Kowalzik P, et al. Stochastic resonance in a nonsocial Y-branch switch[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(17): 7210-7216.
- [14] Sowers R B. Averaging of stochastic flows, twist maps and escape from resonance[J]. *Stochastic Processes and Their Applications*, 2009, 119(10): 3549-3582.
- [15] Takatsugu A, Keiichi K, Daichi N, et al. Internal noise determines external stochastic resonance in visual perception[J]. *Vision Research*, 2008, 48(14): 1569-1573.
- [16] Mirko L, Massimiliano I, Leone F, et al. The rate matching effect: a hidden property of a periodic stochastic resonance[J]. *Physics Letters A*, 2008, 372(15): 2608-2913.