

自适应移频变尺度随机共振在故障诊断中的应用

谭继勇¹, 陈雪峰¹, 雷亚国², 何正嘉¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 加拿大阿尔伯塔大学机械工程系, T6G2G8, 加拿大埃德蒙顿)

摘要: 针对移频变尺度随机共振系统参数选择困难的问题,提出了一种基于时频指标的自适应移频变尺度随机共振算法.该算法选用了最高谱峰位置(频域)及过零间距方差(时域)作为优化目标函数,避开了以信噪比等为目标函数时需要预先知道目标信号确切频率的不足,能够自适应地获取最优系统参数,以最大信噪比检测出微弱周期信号.同时,由于移频变尺度随机共振的选用,该自适应算法突破了传统随机共振系统的限制,因此可以检测实际工程中的高频信号.仿真和故障诊断的工程应用结果表明,该自适应算法简单、易于理解,能有效地从强背景噪声中检测出高频微弱周期信号,具有较强的工程实用价值.

关键词: 时频指标;自适应;移频变尺度随机共振;故障诊断

中图分类号: TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)07-0069-05

Adaptive Frequency-Shifted and Re-Scaling Stochastic Resonance with Applications to Fault Diagnosis

TAN Jiyong¹, CHEN Xuefeng¹, LEI Yaguo², HE Zhengjia¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Mechanical Engineering, University of Alberta, Edmonton T6G2G8, Canada)

Abstract: The difficulty for selecting the best system parameters restricts engineering applications to frequency-shifted and re-scaling stochastic resonance(FRSR). An adaptive FRSR method with time-domain and frequency-domain indexes is developed, where the station of the highest spectral peak and the variance of the zero-crossing distance are chosen as the objective functions, and the optimal parameters are obtained adaptively without predicting the exact frequency of the target signal. Once FRSR is involved, the proposed method is able to detect high frequency, while the traditional stochastic resonance is only for low frequency. The simulation and engineering application on fault diagnosis indicate the ability for weak periodic signals buried in heavy noise.

Keywords: time and frequency indexes; adaptive; frequency-shifted and re-scaling stochastic resonance; fault diagnosis

自从意大利学者 Benzi 等在上世纪 80 年代提出随机共振理论^[1]以来,这种利用噪声来加强有用信号的新型信号处理方法受到了人们的极大关注和深入研究.1998 年意大利佩鲁贾大学的 Gammationi 等^[2]总结了随机共振的经典理论及随机共振的

工程应用,2005 年国防科技大学的杨定新等^[3]对双稳系统数值仿真模型的稳定性进行了定性分析,2005 年天津大学的冷永刚等^[4]对级联双稳系统的随机共振特性进行了研究,2007 年波兰 Jagellonian 大学的 Gora 等^[5]提出了一种有精确解的非线性系统.

参数激励随机共振改变了以前只能靠添加噪声来达到共振的窘境,使得对随机共振的操控更为灵活方便^[6].然而,参数选择一直是困扰参数激励随机共振应用的一大难题,若参数选择不当,便难以达到共振,从而失去了随机共振充分利用噪声的优势.现有参数优化选择的方法多以信噪比等为目标函数,需要预先知道目标信号的确切频率,这在工程实际中往往难以满足^[7-8].移频变尺度随机共振是对参数激励随机共振的改进算法,它利用移频和变尺度的双重手段对信号频率进行压缩,从而实现对大信号(频率、幅值、噪声强度均大于1)的检测,突破了经典随机共振只能分析小信号^[9](频率、幅值、噪声强度均远小于1)的不足.

本文针对周期信号的随机共振检测,在移频变尺度随机共振基础上设计了一种基于时频指标的自适应算法,突破了以前自适应随机共振算法需要预知信号频率等的先天不足,自动获取最优系统参数,以最大信噪比检测出微弱周期信号.同时,由于移频变尺度随机共振的选用,本文的自适应算法可以处理实际工程中的大信号,使得该方法的应用前景更为广阔.

1 移频变尺度随机共振理论

双稳随机共振可以用 Langevin 方程来表示

$$\dot{x} = ax - bx^3 + A\cos(2\pi f_0 t + \varphi) + n(t) \quad (1)$$

式中: A 为信号幅值; f_0 为信号频率; $n(t)$ 是强度为 D 的噪声; a 、 b 为大于0的系统参数.

传统的随机共振技术只能检测小信号,而对于实际工程中的大信号,其应用受到很大限制.本文采用了移频变尺度随机共振技术^[9],通过移频、变尺度双重手段进行频率压缩,克服了高采频、大样本的缺点,可以方便高效地从强背景噪声中检测出大信号,从而提高了随机共振的实用性.

移频变尺度随机共振共分为5个步骤,如图1所示.恢复频率为

$$f_0 = \Delta f + f_c = \Delta f_r R + f_c \quad (2)$$

$$\Delta f_r = (f_0 - f_c)/R = \Delta f/R \quad (3)$$

式中: f_c 为调制频率; f_r 为变尺度差频; R 为变尺度压缩率.为显示方便,将移频变尺度随机共振的输出只恢复出 Δf .

2 移频变尺度随机共振及仿真

一般来说,自适应算法都是一个寻优问题,当某一目标函数达到某一标准值时为最优.目标函数的

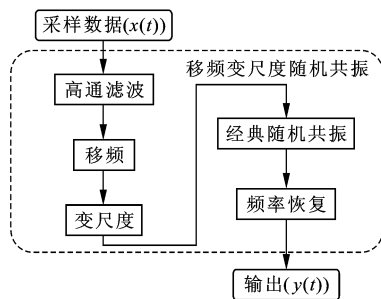


图1 移频变尺度随机共振流程图

选择直接关系到自适应算法的优劣,本文选择频域指标(最高谱峰位置)和时域指标(过零间距方差)作为目标函数来进行参数选择.

2.1 最高谱峰位置

最高谱峰位置即是频谱中最高谱线对应的频率,当信号对应的谱峰是频谱中的最高谱峰时,该信号就比较容易识别.因此,选择最高谱峰位置作为优化指标来初选参数.令谱峰序列为

$$Y(k) = 2X(k)/N \quad 1 \leq k \leq N/2 \quad (4)$$

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n) e^{-j2\pi(k-1)(n-1)/N} \quad 1 \leq k \leq N/2 \quad (5)$$

式中: $x(n)$ 为时间序列; N 为时间序列的长度.令序列 $\{Y(k)\}$ 中最大值为 $Y(k_0)$,采样频率为 f_s ,则对应的最大频率为

$$f_{\max} = (k_0 - 1)f_s/N \quad (6)$$

式(6)即为本文频谱对应的最高谱峰位置.

下面讨论势垒参数 a 变化的情形.最高谱峰位置图即为最高谱峰位置随 a 变化的趋势图,其他参数变化的情况可类推获得.随机共振是在一段参数范围内产生的,即在最佳参数的某一邻域内存在一系列的次优参数,使得系统达到次优共振状态.因此,最高谱峰位置图中的水平线段对应的参数段可能是有效参数的范围.当 a 太小时,势垒 $\Delta U = a^2/4b$ 较低,噪声很容易引起质点在两势阱中跃迁,导致共振输出噪声太大,谐波性不强,在最高谱峰位置图上体现为短平线或不规律折线.当 a 太大时, ΔU 过高,只有偶尔的信号峰值加上噪声才能跃过势垒,造成跃迁,这样共振结果中就会出现漏峰,最高谱峰位置图上体现为较低(即低频区)的水平线或折线.值得注意的是,随机共振不仅存在阈下共振,也存在阈上共振^[10].如果参数选择合适,最大谱峰位置图上可能会出现2条等高(即频率相同)的水平线,而当 a 较小时,对应的系统对周期信号的检测效果更好.

2.2 过零间距方差

过零间距是指信号与横轴相交点的间距,过零间距方差则是指这些间距的方差.根据方差的数学意义,过零间距方差越小,过零间距波动也越小,信号与横轴相交点就越具有周期性,该信号的稳定性也可能更好.为减小噪声对过零点的影响,让过零间距更直接地反映随机共振的效果,可以选择一些平滑的方法对共振结果进行初处理,如局部平均、曲线拟合等.本文选择3次B样条曲线拟合算法对共振结果进行平滑处理.设共振结果序列为 $\{x(k), k=1, 2, \dots, N\}$,记拟合结果为 B_x .寻找所有的序列过零点

$$H(i) = \{B_x(n_i); B_x(n_i + 1)\} \quad 1 \leq n_i \leq N-1 \quad (7)$$

即若 $B_x(n_i) > 0 (< 0)$,则必有 $B_x(n_i + 1) < 0 (> 0)$.

假设序列过零点对共有 m 对,即 $i=1, 2, \dots, m$.对每个序列过零点对采用线性插值,得到过零点对对应的时间值 $t_{zi} = n_{zi}T$,其中 T 为采样周期,且

$$n_{zi} = n_i + \frac{B_x(n_i + 1)}{B_x(n_i) - B_x(n_i + 1)} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

求过零间距

$$P_0(i) = t_{z(i+1)} - t_{zi} \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (9)$$

选用 $f_{\max}$ 倒数的一半作为过零间距的期望值,则过零间距方差

$$V_0 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} \left(P_0(i) - \frac{1}{2f_{\max}} \right)^2 \quad (10)$$

为了体现噪声的影响,引入一个惩罚函数 p ,其值为 P_0 中小于某阈值的数目(野点数),本文中取阈值为 $4T$,则野点集合为

$$Y_{p0} = \{P_0(i) \mid P_0(i) \leq 4T, i = 1, 2, \dots, p\} \quad (11)$$

$$V_0 = \frac{p}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} \left(P_0(i) - \frac{1}{2f_{\max}} \right)^2 \quad (12)$$

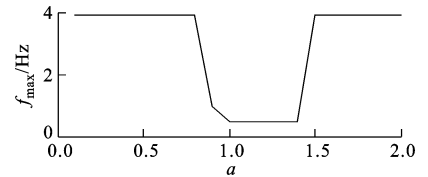
当参数设置不合适时,可能会出现仅有1次或2次出现过零点的情况,即几乎没有跃迁,这种情况是势垒过高所致,即信号只能在单个势阱里面波动.由于某时刻较大噪声的叠加,跃过势垒,又到另一个势阱中波动,因此会产生过零点.当参数设置合适时,双稳系统中也可能会出现阱内共振,但从目前的文献上来看,双稳系统用于检测周期信号时,多注重其阱间共振,认为这样的共振效果更好.因此,本文也以检测阱间共振为目标,从而将出现仅1次或者2次过零点时的情况归结为参数设置错误,而把过零间距

方差设置为0.

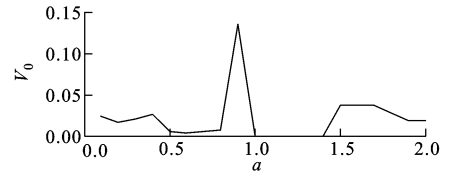
2.3 算法流程与仿真

时频指标自适应移频变尺度随机共振的实现如下:①初始化系统势垒参数 (a, b) (本文中固定 b),并设定参数搜索范围以及搜索步长;②计算每一组参数 (a, b) 对应移频变尺度随机共振输出的最高谱峰位置及过零间距方差;③在估计的信号频率(以差频形式)范围内,查找最高谱峰位置图中的水平线,如果有这样的水平线存在,则在对应的参数范围内,从过零间距方差图中查找非零最小且过零间距方差对应的参数值,如果没有这样的水平线存在,则重新设置搜索范围,转入②;④由③得到的参数即为设定范围内的最优参数,代入移频变尺度随机共振系统可得最佳共振结果.

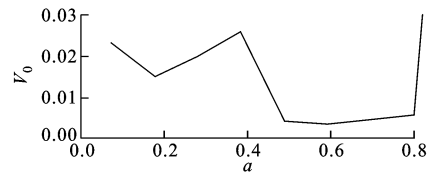
为验证方法的有效性,设输入频率为58 Hz的余弦信号的幅值为0.4,添加强度为2的高斯噪声,采样率为500 Hz,数据长度为1 024,利用移频变尺度随机共振,设置调制频率为54 Hz,变尺度压缩率为200.将 b 固定为0.1, a 的搜索范围为 $[0.1, 2.0]$,步长为0.1.仿真的优化指标随 a 的变化曲线如图2所示.在图2a中,差频4 Hz(由于频率分辨率的原



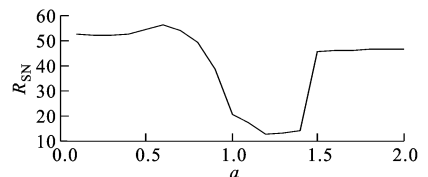
(a) $f_{\max}$ 随 a 的变化曲线



(b) V_0 随 a 的变化曲线



(c) 图2b的局部放大曲线



(d) 信噪比随 a 的变化曲线

图2 移频变尺度随机共振仿真变化曲线

因,表现为 3.9 Hz)处出现 2 段水平线[0.1, 0.8]和 [1.5, 2.0]. 从图 3a 中可以看出,由于噪声很大,时域图中很难发现有周期信号,所以图 3c 中 58 Hz 的谱峰并不明显. 图 3b 中的周期信号成分已经相当明显,且图 3d 中对应 58 Hz 与调制频率 54 Hz 的差频 (3.9 Hz)处出现很明显的谱峰,因此能够很好地检测出周期信号.

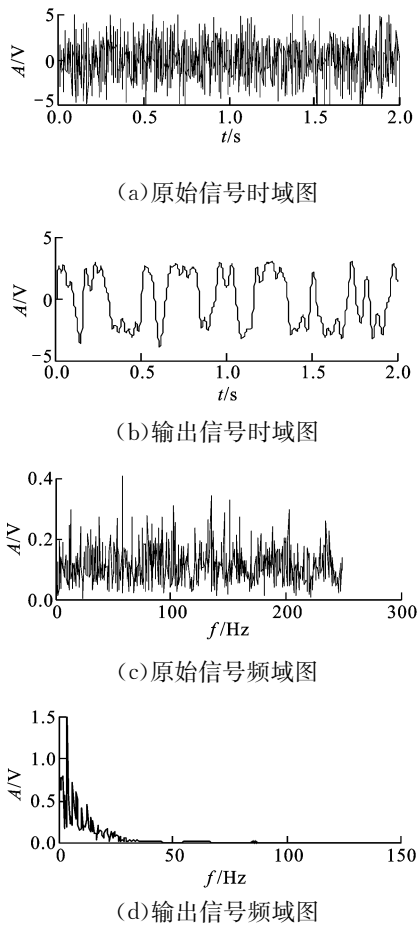


图 3 移频变尺度随机共振仿真图

3 移频变尺度随机共振的工程应用

在高速重载下运行的滚动轴承长时间工作在恶劣的环境中,其内外表面常出现裂纹、凹痕、碰伤、剥落、电蚀、锈蚀,甚至出现破碎和缺损等情况,其故障往往会迅速扩大,在短时间内会造成热轴、燃轴、切轴,最终导致列车颠覆等重大行车事故. 对怀疑有故障的某客运型电力机车的轮对滚动轴承进行检测,测试实验装置如图 4 所示. 检测的滚动轴承安装在一个液压驱动的实验台架上,加速度传感器获取的振动信息由 Sony EX 收集,实验装置尽可能模拟实

际工况. 采用液压系统来驱动和加载,获取振动信号的加速度传感器没有直接吸附在轴承外圈表面,而是吸附在加载模块下方,经过加载模块对信号的传递和削弱,使获取的信号衰减,因此更符合实际情况.

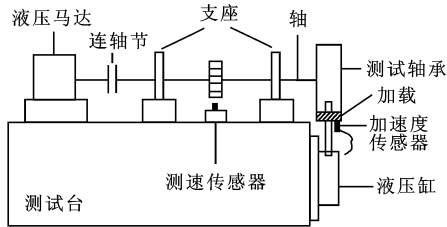


图 4 实验装置简图

该轴承的相关参数如表 1 所示,根据相关公式可得轴承外圈故障特征频率为 78.17 Hz. 实验采用 1 600 Hz 的采样频率,截取的数据长度为 2 048. 由于轴承故障多表现为调制现象,因此采用 Hilbert 变换对其进行解调处理,如图 5 所示.

表 1 轴承的实验参数

轴承型号	552732QT
载荷/kg	500
内圈直径/mm	160
外圈直径/mm	290
滚动体直径/mm	34
滚动体个数	17
接触角/(°)	0
转速/r · min ⁻¹	650

采用自适应移频变尺度随机共振对信号进行进一步的分析,设定高通滤波器的通过频率和截止频率分别为 70 和 68 Hz,调制频率为 68 Hz,变尺度压缩率为 200. 设置 b 恒为 1. a 在 [0.01, 2.00] 中变化,搜索步长为 0.02. 在信号频率与调制频率的差频 10.17 Hz 附近的 10.18 Hz 处出现了一段水平线,对应参数段 [0.01, 0.99]. 图 5c 所示是相应参数段的过零间距方差,在 $a=0.53$ 时发现了过零间距方差的最小值,将其代入移频变尺度随机共振重新计算,得到了非常清晰的检测结果,时域中有明显的周期信号存在. 由于在 10.18 Hz 处的谱峰相当显著,这样原信号中 78.18 Hz 的成分就以差频形式被检测出来,表明轴承可能存在外圈故障. 拆开轴承后发现外圈有轻微擦伤,如图 5f 所示.

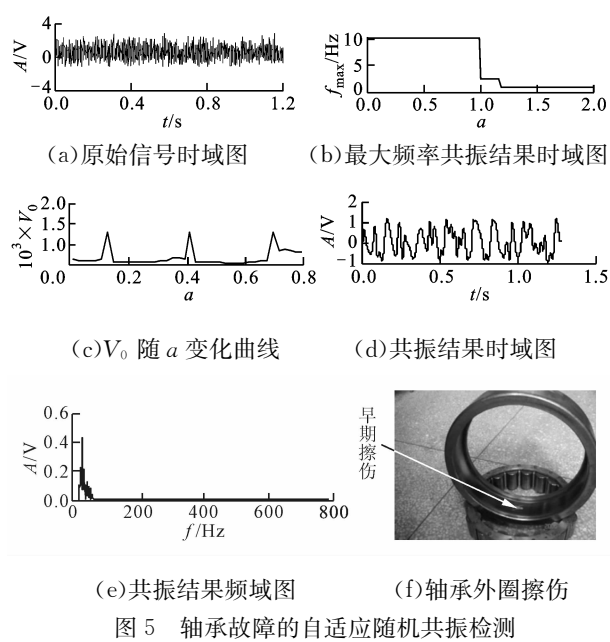


图 5 轴承故障的自适应随机共振检测

4 结 论

本文简述了移频变尺度随机共振理论,重点研究了最高谱峰位置及过零间距方差的定义、特点、相互联系,以及它们与随机共振的映射关系.在此基础上,以两者为目标函数,提出了一种基于时频指标的自适应移频变尺度随机共振算法.该算法避免了传统自适应算法需要预先知道确切信号频率的缺陷,算法简单,物理意义明确,相对于其他随机共振算法具有低采频、短数据的优点.仿真和实验表明,该算法对于微弱周期信号的检测是方便有效的,并具有较强的工程实用价值.

参考文献:

[1] BENZI R, SUTERA A, VULPIANA A. The mechanism of stochastic resonance [J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1981, 14(11): L453-L457.

[2] GAMMAITONI L, HÄNGGI P, JUNG P, et al. Stochastic resonance [J]. Reviews of Modern Physics,

1998, 70(1): 223-287.

[3] 杨定新,胡芑庆,温熙森. 双稳系统数值仿真模型的稳定性分析 [J]. 系统仿真学报,2005,17(10):31-33. YANG Dingxin, HU Niaoqing, WEN Xisen. Stability analysis for numerical simulation model of bistable system [J]. Acta Simulate Systematica Sinica, 2005, 17(10):31-33.

[4] 冷永刚,王太勇,郭焱,等. 级联双稳系统的随机共振特性 [J]. 物理学报,2005,54(3):1118-1125. LENG Yonggang, WANG Taiyong, GUO Yan, et al. Stochastic resonance behaviors of bistable systems connected in series [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(3):1118-1125.

[5] GORA P F. An exactly solvable nonlinear model: constructive effects of correlations between Gaussian noises [J]. Physica: A, 2007, 378(2):201-210.

[6] XU B, DUAN F, BAO R, et al. Stochastic resonance with tuning system parameters: the application of bistable systems in signal processing [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2002, 13(4): 633-644.

[7] MITAIM S, KOSKO B. Adaptive stochastic resonance IEEE Special issue on intelligent signal processing, [J]. 1998, 86(11): 2152-2183.

[8] 邓学欣,王太勇,冷永刚,等. 自适应扫频随机共振研究 [J]. 西安交通大学学报,2005,39(1):108-110. DENG Xuexin, WANG Taiyong, LENG Yonggang, et al. Study on adaptive swept stochastic resonance algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(1):108-110.

[9] TAN Jiyong, CHEN Xuefeng, WANG Junying, et al. Study of frequency-shifted and re-scaling stochastic resonance and its application to fault diagnosis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009(23): 811-822.

[10] STOCKS N G. Suprathreshold stochastic resonance in multilevel threshold systems [J]. Physical Review Letters, 2000, 84(11):2310-2313.

(编辑 管咏梅)

[本刊相关文献链接]

放大转发异步协作通信系统中的差分空时频传输方案. 西安交通大学学报,2009,43(6):62-66.

总体平均经验模式分解与 1.5 维谱方法的研究. 西安交通大学学报,2009,43(5):94-98.

基于小世界原理的模型降阶优化研究. 西安交通大学学报,2009,43(1):108-1103.

气动阀间歇性排气噪声辐射规律的研究. 西安交通大学学报,2008,42(9):1091-1095.