

# 自适应扫频随机共振方法的研究

邓学欣, 王太勇, 冷永刚, 范胜波

(天津大学机械工程学院, 300072, 天津)

**摘要:** 针对大参数信号二次采样随机共振应用的局限性, 提出了自适应扫频随机共振方法. 该方法根据信号、噪声和系统三者协调作用发生随机共振时的关系, 自动调整采样频率和双稳系统的结构参数, 从而自动获取随机共振状态. 将此方法应用于实际噪声下弱信号的提取, 取得了较好的结果.

**关键词:** 随机共振; 自适应扫频随机共振; 双稳系统; 频谱

**中图分类号:** TM307.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)01-0108-03

## Study on Adaptive Swept Stochastic Resonance Algorithm

Deng Xuexin, Wang Taiyong, Leng Yonggang, Fan Shengbo

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

信号和适量的噪声在非线性系统的作用下, 会产生随机共振(SR)现象<sup>[1-3]</sup>, 据此可达到从噪声中检测信号的目的. 在工程实际测量中, 信号和噪声都是未知的, 不可能通过减少或增加噪声使系统发生随机共振来实现弱信号的检测. 本文在文献[4,5]研究的基础上, 针对工程测量的实际环境和要求, 提出采用自适应扫频随机共振技术, 通过自适应来改变信号采样频率和调整双稳系统的结构参数, 自动获取信号频率处的最大频谱幅值.

### 1 基于随机共振信号的检测

随机共振可用 Langevin 方程来描述, 即

$$dx/dt = \mu x - x^3 + a \sin(2\pi f_0 t) + n(t) \quad (1)$$

式中:  $a$  为被测信号的幅值;  $f_0$  为被测信号的频率;  $n(t)$  为白噪声, 二者之和可看作工程实测信号, 其余部分可视为非线性双稳系统. 通过求解式(1)可得系统随机共振的响应  $x(t)$ , 对于工程实测常见的大参数(大频率强噪声等)信号, 可通过文献[5,6]提出的二次采样随机共振(TSSR)方法来得到  $f_0$  处的随机共振响应谱峰. 虽然二次采样随机共振方法将小参数的随机共振推广到了大参数信号的随机共振, 而且为实际应用也提供了一定的设想, 但真正将该方

法应用到现场还有一定距离, 如系统结构参数如何确定, 设备运行频率的精确确定等. 针对这些实际问题, 本文将在大参数 TSSR 技术的基础上, 提出自适应扫频随机共振方法, 以方便工程的实际应用.

### 2 自适应扫频随机共振算法的设计与实验分析

为能有效利用大参数信号 TSSR 技术处理待测信号的未知特征量(如频率), 并合理调节大参数信号随机共振的参数, 所设计的自适应扫频随机共振算法需要考虑以下 2 个关键因素.

#### 2.1 待测信号的频率确定

由于现场工况环境的变化会使设备的运行状态发生改变, 导致很多物理参数也相应地变化, 因此应用 TSSR 技术时, 某些物理量的准确获取至关重要. 这里由随机共振对频率的敏感特性可知, 当采样频率  $f_s$  一定时,  $f_0$  不能严格按照文献[5,6]中所述的  $f_s$  为  $f_0$  的 50 倍, 那么 TSSR 技术就有可能失效, 进而不能由共振突出表示微弱故障特征的谱信号. 因此, 为能准确捕捉到设备在变化中的运行频率, 算法将在某个频率范围内采用递增(或递减)来

改变采样频率,以扫频获得被观测设备的运行频率的特征,即根据现场的实际工况,设定一个采样频率范围,然后以一个频率增量来不断改变采样频率,并扫频被观测的信号。

### 2.2 Langevin 方程势垒参数的调节

根据文献[4-6]的研究表明,Langevin 方程中势垒参数  $\mu$  的调节在某种程度上将有助于随机共振的实现,这意味着控制势垒高度可调整  $f_0$  处的幅值高度。如果大参数二次采样频率在最优值处不能使  $f_0$  处的频谱幅值成为整个频谱图的最大值,那么适当减小参数  $\mu$  和  $f_0$  处的谱峰会再次被共振突起,而成为可辨识的最高谱峰,从而达到了信号的检测目的。

图 1 是自适应扫频随机共振方案的结构框架。其中,扫频信号采集实现了信号频率变化范围的扫频采样,二次采样的随机共振对每一组采集数据选取二次采样频率,并进行大信号的随机共振,幅值谱检索对应每一个二次采样的随机共振谱图。通过调节  $\mu$ ,判断信号频率处的谱峰是否为整个频谱图的最大值。如果是最大值,则表明得到弱信号,可停止扫频采样。如果不是最大值,则继续扫频采样,直到

获得最大谱峰的弱信号。整个自适应算法的软件实现采用采样频率和势垒高度双参数线性定步长的搜索方法,在采样频率的每个遍历值上,势垒高度因子在允许范围内自动减小,并实时计算输出频谱中被观测信号频率处的幅值。

实验方案如图 2 所示,其中计算机 1 产生的正弦和白噪声混合信号由 D/A 卡输出,经功放驱动激励台振动,激励台上安装有加速度测振传感器,加速度信号由本算法经 A/D 进行扫频数据采集,采集的数据由计算机 2 进行自适应随机共振分析。图 3 是

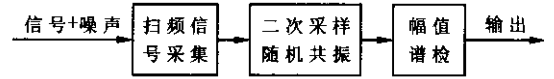


图 1 自适应扫频随机共振系统

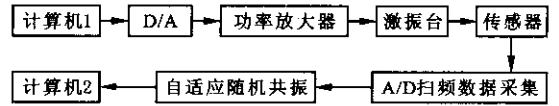
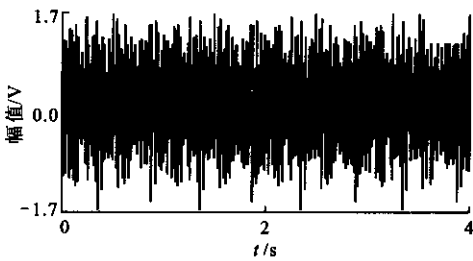
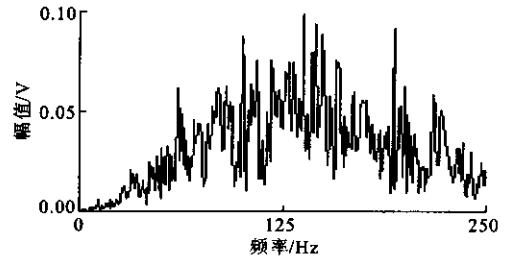


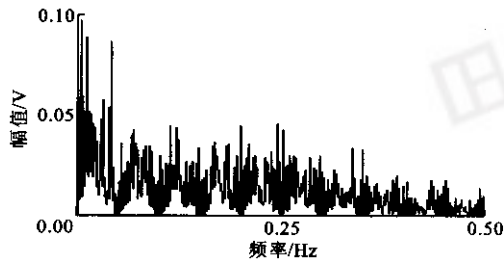
图 2 实验方案的框架结构



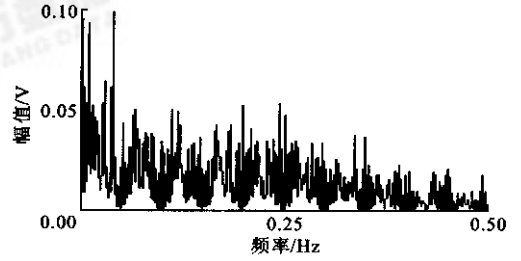
(a) 输入信号时域波形



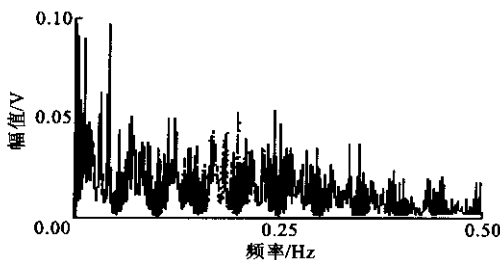
(b) 输入信号频谱图



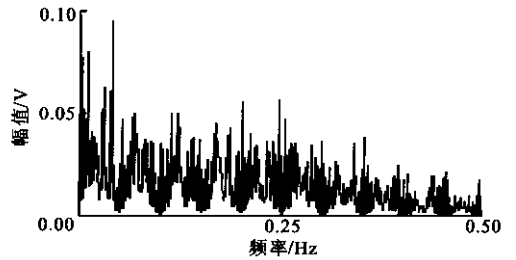
(c)  $\mu=0.5$



(d)  $\mu=0.48$



(e)  $\mu=0.45$



(f)  $\mu=0.42$

实验结果,其中正弦信号幅值为 0.1 V,频率为 20 Hz,白噪声幅度为 3 V,此混合信号的信噪比为 -27.7 dB,  $f_s$  为 1 kHz,经随机共振二次采样后,其时频图为图 3a 和图 3b. 在图 3 中的低频段,看不到 20 Hz 的明显谱峰,而在图中 125 Hz 左右处却出现了较大的谱峰,这是由于 B-K4809 型激振台自身固有特性造成的. 当把  $f_s$  定在 950 ~ 1 050 Hz 间进行扫频数据采集时,二次采样频率  $f_{sr} = 2$  Hz. 当  $\mu$  从 0.5 ~ 0.425 变化时,系统在  $f_s = 1$  kHz 和  $\mu = 0.475$  处自动停止,其频谱对应图 3d. 图 3c ~ 图 3f 为该采样频率下的随机共振过程,其中图 3e 和图 3f 为手动调整结果,可以看到  $f_r = 0.04$  Hz 时的谱峰逐渐凸现出来,随机共振现象逐渐明显. 当按线性压缩比恢复该频率为 20 Hz 时,所加入的  $f_0 = 20$  Hz,由此不仅证明了本算法的正确性,而且说明该算法并没有只是追求最佳的随机共振效果(图 3f),而只需  $f_0$  处的幅值在整个频带中为最大值就停止跟踪(图

3d),因此提高了系统的实时性.

#### 参考文献:

- [1] Gammaitoni L, Hänggi P. Stochastic resonance[J]. Rev Mod Phys, 1998,70(1): 223-246.
- [2] Bulsara A R, Gammaitoni L. Tuning in to noise[J]. Phys Today, 1996(49): 39-45.
- [3] 秦光戎,龚德纯,胡岗,等. 随机共振的模拟实验[J]. 物理学报, 1992,41(3):360-368.
- [4] 冷永刚,王太勇,邓学欣,等. 变尺度随机共振用于电机故障的监测诊断[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11):110-115.
- [5] 冷永刚,王太勇. 二次采样随机共振频谱研究与应用初探[J]. 物理学报, 2004, 53(3):717-723.
- [6] 冷永刚,王太勇. 二次采样用于随机共振从强噪声中提取弱信号的数值研究[J]. 物理学报, 2003, 52(10):2 432-2 437.

(编辑 管咏梅)

(上接第 107 页)

收集液的 COD 小于  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,从而证实 SCWO 能快速高效地实现污泥的减量、减容和无害化处理.

(2)反应时间和温度对城市污泥 SCWO 影响显著,随着反应时间的延长和温度的升高,污泥去除率增加. 在氧化剂充分过量的情况下,COD 去除率能从 50 s、400 °C 时的约 95% 升高到 155 s、450 °C 时的 99.98% 以上. 当氧化剂达到一定过量后(本实验中为 325%),其对 COD 去除率的影响可以忽略不计,而在此前影响比较显著.

(3)反应压力对 COD 去除率有影响,并且低压区强于高压区. 本文从过渡态理论出发对这一现象加以解释,即  $\ln k$  与压力  $p$  不呈线性关系,且随压力增加  $(\partial \ln k / \partial p)_T$  呈现出递减特征.

(4)在本实验条件下,当氧化剂足够过量时,城市污泥的反应级数为 1,氧化剂的级数为 0,反应活化能  $E_a$  为  $(39.11 \pm 2.216) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,频率因子  $k_0$  为  $(45.1 \pm 17.2) \text{ s}^{-1}$ ,模型计算值与实验值的误差在  $\pm 8\%$  以内.

#### 参考文献:

- [1] Juan R, Portela J, Nebot E, et al. Elimination of cutting oil wastes by promoted hydrothermal oxidation[J]. Journal of Hazardous Materials B, 2001,88(6): 95-106.
- [2] 丁军,秀秀,陈数据,吴素芳,等. 苯胺在超临界水中氧化反

应动力学研究[J]. 高校化学工程学报, 2001, 15(1):66-70.

- [3] 曾元峰,王树众,段百齐,等. 超临界水氧化技术的研究进展[J]. 石油化工, 2004,33(2):184-189.
- [4] Shaw R W, Bill T B, Cliffor A A, et al. Supercritical water—a medium for chemistry[J]. Chem Eng News, 1991,69(51):26-39.
- [5] Holgate H R, Tester J W. Oxidation of  $\text{H}_2$  and CO in sub-and Supercritical water: reaction kinetics, pathway, and water-density effect of experimental results[J]. J Phys Chem, 1994, 98(3):800-809.
- [6] Koo M, Lee W K, Lee C H. New reactor system for supercritical water oxidation and its application on phenol destruction[J]. Chem Eng Sci, 1997, 52(7):1 201-1 214.
- [7] Portela J R, Nebot E, Martinez O E. Generalized kinetic models for supercritical water oxidation of cutting oil wastes[J]. Journal of Supercritical Fluid, 2001, 21(3):135-145.
- [8] Li R, Savage P E. 2-chlorophenol oxidation in SCW: global kinetics and reaction products[J]. AIChE J, 1993, 39(1):178-187.
- [9] Goto M, Nada T, Kodama A, et al. Kinetic analysis for destruction of municipal sewage sludge and alcohol distillery wastewater by supercritical water oxidation[J]. Ind Eng Chem Res, 1999, 38(5):1 863-1 865.

(编辑 荆树蓉)