

文章编号: 0253-9993(2007)10-1098-04

基于随机共振理论的低速重载设备故障诊断

张家凡^{1,2}, 黄之初²

(1. 武汉工业学院 机械工程系, 湖北 武汉 430023; 2. 武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 基于随机共振理论, 结合包络解调分析研究微弱低频幅值调制信号的增强与提取, 并应用于低速重载设备的故障诊断. 运用信号自含噪声或外加噪声, 通过变步长数值算法和调节非线性双稳系统结构参数, 来实现微弱低频幅值调制信号的随机共振现象. 模拟调幅信号和实测低速重载齿轮箱振动信号的分析结果, 证实了本文提出的方法在检测微弱低频幅值调制信号上, 明显优于传统的 FFT 谱分析和包络解调方法.

关键词: 随机共振; 低速重载设备; 故障诊断

中图分类号: TH165.3 **文献标识码:** A

Fault diagnosis of low-speed and heavy-duty equipments based on stochastic resonance theory

ZHANG Jia-fan^{1,2}, HUANG Zhi-chu²

(1. Department of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Enhancement and extraction of the weak low-frequency amplitude-modulated signal were studied using the combination of the stochastic resonance (SR) and envelope demodulation analysis, which was applied to the fault diagnosis of low-speed and heavy-duty equipments. The signal was firstly input into a nonlinear bistable system to realize the SR effect, which then was demodulated using the envelope analysis. The SR effect of the signal was realized based on the step-changed numerical algorithm and the adjustment of the bistable system parameters. Both simulated signals and real vibration signals of a low-speed and heavy-duty gearbox were presented to illustrate that the proposed method was superior to the spectra analysis and envelope demodulation methods in detecting the weak low-frequency amplitude-modulated signal.

Key words: stochastic resonance; low-speed and heavy-duty equipment; fault diagnosis

目前, 对大多数机械故障而言, 基于振动信号采集分析的故障诊断技术被认为最可靠有效、且易于实施. 但是, 低速重载设备局部损伤及由缺陷类故障所引起的振动信号成分, 其能量在信号总能量中所占比例很少, 并且其频率较低, 容易受到设备正常工况的宽频振动信号及其它背景噪声等干扰信号所淹没而难以分离识别. 由于早期缺陷故障引起的周期性微弱冲击响应和调幅信号具有以上特征, 从现有文献看, 频谱分析 (包括细化谱、倒频谱)、冲击脉冲法、时域指标分析 (如均方根值、峰值因子、峭度) 等诊断方法都受到了限制; 虽然, 包络解调分析 (包括共振解调) 以及结合小波 (包) 信号分解重构具有良好时频局部细化分析特性, 在一些低速重载齿轮箱、滚动轴承故障诊断上表现出较好效果^[1-7], 但在信噪比低、正常工况的宽频干扰信号幅值大的情况下, 包络解调谱仍无法有效识别故障特征频率谱线.

本文提出一种检测微弱周期信号的非线性信号处理方法——随机共振理论^[8]与包络分析等相结合,

收稿日期: 2007-03-20 责任编辑: 高雪梅

基金项目: 国家“863”计划引导项目 (2005AA001120)

作者简介: 张家凡 (1963-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士研究生. Tel: 027-83950091, E-mail: jfzhang01@21cn.com

用于低速重载齿轮箱、滚动轴承的故障诊断研究. 例如, 低速输出轴上齿轮状况可先在其啮合频率的某个倍频附近进行数字带通滤波, 再经随机共振放大增强低频微弱故障特征信号 (调制信号), 然后作包络解调谱; 低速滚动轴承振动信号可直接经随机共振识别周期性微弱冲击响应信号频率, 或先进行自适应谱线增强滤波 (adaptive line enhancer), 剔除强大的齿轮啮合信号, 其残差信号主要包含轴承振动信号, 再经随机共振 (或结合包络分析) 识别轴承故障特征信号频率. 通过对部分模拟信号和重载齿轮减速箱低速输出轴齿轮振动信号的应用, 说明本文方法能有效弥补振动信号诊断技术在低速重载设备上的不足.

1 随机共振理论

信号通过非线性系统时, 随着所含或外加噪声的增加, 输出信噪比会达到极大值, 这一现象被称为随机共振 (stochastic resonance, SR)^[8]. 与各种抑噪方法相比, 它不是消除噪声而是充分利用噪声来增强弱信号, 以提高信噪比达到识别弱信号. 随机共振形成的 3 个要素是双稳或多稳非线性系统, 输入信号和噪声. 通常, 以最简单的双稳系统 $dy/dt = ay - by^3$, 弱周期信号 $s(t)$ 和白噪声 $n(t)$ 为研究对象, 如图 1 和式 (1) 的朗之万 (Langevin) 方程模型所示.

$$dy/dt = -dU(y)/dy + s(t) + n(t) = ay - by^3 + s(t) + n(t), \quad (1)$$

式中, $x(t) = s(t) + n(t)$ 为双稳系统的输入信号, 通常取 $s(t) = A\sin(2\pi f_0 t)$ 为被检测弱周期信号; $n(t) = \sqrt{2D}g(t)$ 为白噪声, D 为噪声强度, $g(t)$ 是均值为 0、方差为 1 的白噪声, 使得 $E[n(t)] = 0$, $E[n(t)n(t-\tau)] = 2D\delta(t)$; 对称双稳势阱 (势函数) $U(y) = ay^2/2 + by^4/4$ 表示非线性双稳系统; a, b 是大于 0 的非线性系统结构参数; $y(t)$ 为双稳系统的输出信号. 随机共振即双稳系统在信号 $s(t)$ 和噪声 $n(t)$ 的协同作用下, 其输出响应 $y(t)$ 产生 SR 现象, 从系统输出的频谱上看, 在信号的频率 f_0 处出现明显的谱峰. 需要指出: (1) SR 现象的产生可以通过调节噪声强度 D 和/或系统结构参数 a, b 的大小来实现; (2) 随机共振已有的绝热近似和线性响应理论仅适用于小参数信号 (小幅值、小频率、小噪声), 即要求 $A \ll 1$, $D \ll 1$ 且 $f_0 \ll 1$. 而工程实际中的信号可能频率较高或噪声强度较大 (大参数信号), 为了利用随机共振从强噪声、大参数信号中提取微弱信号, 人们分别提出了通过二次采样将较高频率变换为较低频率来产生随机共振^[9], 以及将混于噪声中的较高频率的弱信号经调制变为一差频的低频信号, 通过连续调节载波信号的频率以获得一个适当的差频信号输入到随机共振体系, 根据输出信号共振谱峰的变化经解调而求得待检弱信号未知频率的方法^[10]; (3) 式(1)是一种非线性随机微分方程, 此类方程不存在精确解的表达式, 基于龙格-库塔算法的数值求解是有效的手段, 而且通过适当改变计算步长 h (令 $h > 1/f_s$), 在满足 $50f_0 < f_s$ 条件下, 通过变步长 h 和调节非线性系统结构参数 a 来改善非线性系统或输出信号的频带宽度, 从而获得所要提取的弱周期信号. 试验证明, 该算法可以同时适用于大、小参数条件下的随机共振^[11]. 式 (1) 的基于 4 阶龙格-库塔法的改进数值算法如下:

$$y_{n+1} = y_n + [k_1 + (2 - \sqrt{2})k_2 + (2 + \sqrt{2})k_3 + k_4]/6 \quad (n = 0, 1, \dots, N-1),$$

$$k_1 = h(ay_n - by_n^3 + x_n), \quad k_2 = h[a(y_n + k_1/2) - b(y_n + k_1/2)^3 + x_n],$$

$$k_3 = h\{a(y_n + k_2/2) - b[y_n + (\sqrt{2} - 1)k_1/2 + (2 - \sqrt{2})k_2/2]^3 + x_{n+1}\},$$

$$k_4 = h\{a(y_n + k_3) - b[y_n - \sqrt{2}k_2/2 + (2 + \sqrt{2})k_3/2]^3 + x_{n+1}\},$$

其中, y_n, x_n 分别为双稳系统输出 $y(t)$ 与输入 $x(t)$ 的第 n 步数值.

2 模拟与实测振动信号的应用

2.1 含强噪声的微弱低频幅值调制信号

$$x(t) = 0.5[1.0 + 0.3\cos(2\pi f_1 t)]\cos(2\pi f_2 t) + n(t).$$

$$x(t) = s(t) + n(t) \rightarrow \boxed{\text{双稳非线性系统 } U(y)} \rightarrow y(t)$$

图 1 双稳随机共振系统

Fig. 1 A nonlinear bistable stochastic resonance system

调制频率 $f_1 = 0.45$ Hz, 载波频率 $f_2 = 100$ Hz, 采样频率 $f_s = 300$ Hz, 噪声 $n(t) = 2g(t)$, 双稳随机共振系统参数 $a = 0.1$, $b = 1.0$, 变步长的龙格-库塔算法步长 $h = 0.01$. 图 2 为模拟的低频幅值调制信号; 图 3 (a) 为其平方包络解调幅值谱, 0.45 Hz 谱峰不突出; 图 3 (b) 为其经随机共振, 然后作平方包络解调后的幅值谱, 可见 0.45 Hz 及其倍频处出现最突出明显的谱峰, 微弱低频幅值调制信号成分得到增强.

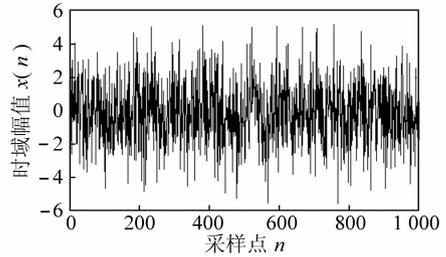


图 2 含强噪声的微弱低频幅值调制信号
Fig. 2 Weak low-frequency amplitude-modulated signals embedded in strong noises

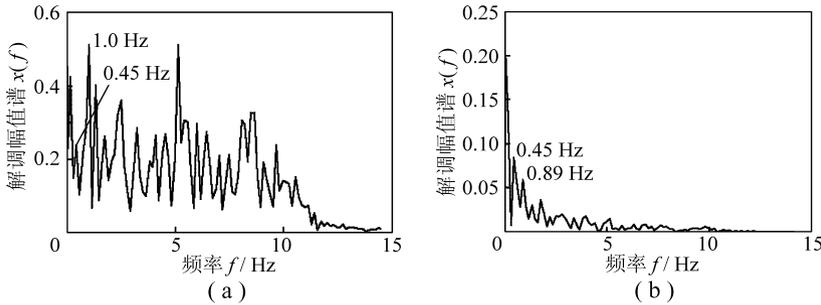


图 3 含强噪声的微弱低频幅值调制信号包络解调幅值谱 (a) 及随机共振-包络解调幅值谱 (b)
Fig. 3 Envelope demodulation spectra (a) and stochastic resonance-envelope demodulation spectra (b) of the weak low-frequency amplitude-modulated signals embedded in strong noises

2.2 重载齿轮减速箱低速输出轴齿轮振动信号

图 4 为一台管磨机齿轮减速箱传动及振动测点布置. 该齿轮减速箱出现箱体振动异常, 并伴有较大噪声, 减速箱箱顶振动速度监测传感器检测到振动速度有效值远超过设置的报警停机上限值. 减速箱各轴转频和啮合频率见表 1.

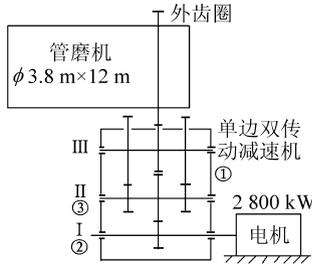


图 4 管磨机齿轮减速箱传动及测点布置
Fig. 4 The tube mill gearbox transmission and its vibration measuring points layout

①~③为测点, ①点在轴 II 上方箱顶上;
②, ③点分别在轴 I, II 非电机端轴承座上

表 1 减速箱各轴转频和啮合频率
Table 1 Rotation frequency and meshing frequency of the gearbox

传动轴	电机转速为 995 r/min	
	转频/Hz	啮合频率/Hz
轴 I	16.500 一级传动	330.00
轴 II	8.050 二级传动	152.95
轴 III	2.185 三级传动	67.74

多点测试分析表明: 轴 I, II 上齿轮一级传动啮合频率 (330 Hz) 及其倍频、三倍频幅值较大, 占绝对主导 (图 5), 对应一级啮合齿轮出现较严重均匀磨损. 由于管磨机采用边缘传动, 其齿轮减速箱的低速输出齿轮外露, 并与磨机筒体上外齿圈啮合传动, 而工作环境粉尘较多, 灰尘、杂质易进入箱体; 另外, 虽然齿轮减速箱采用油站强制润滑, 若换油不及时, 或者滤油器清洗更换不及时等原因, 导致润滑不良, 通常会造成轮齿非正常均匀磨损. 由图 5 可见, 二、三级传动啮合频率及其高阶倍频成分十分微弱, 在它们附近频带是否有轴 II, III 转频为调制频率的边带, 这些轴上齿轮啮合状况如何? 在二级传动啮合频率 3 倍频 (459 Hz) 附近 (图 5 频率轴上圆圈线所示部分) 取通带, 对轴 II 轴承座 (非电机端) 垂直向振动加速度信号进行带通滤波, 图 6 (a) 即是其包络解调幅值谱, 可发现微弱的轴 III 转频调制谱峰; 若

将带通滤波信号及外加的白噪声 (这里加入的是均值为 0、方差为 1 的白噪声) 一起输入到双稳系统 (式 (1)), 调节计算步长 h 和系统结构参数 a 实现随机共振, 然后作平方包络解调幅值谱 (双稳系统参数 $a = 0.1$, $b = 1.0$, 龙格-库塔算法步长 $h = 0.02$). 由图 6 (b) 可知, 轴 III, II 转频 2.185 Hz 和 8.050 Hz 处有突出明显的谱峰, 说明带通滤波信号中包含有微弱 2.185 Hz 调制信号, 这通常可认为轴 III 上二级传动齿轮有轻微局部损伤.

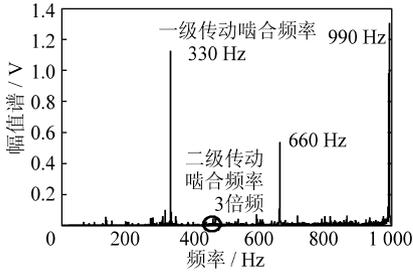


图 5 管磨机齿轮减速箱轴 II 轴承座 (非电机端) 垂直向振动加速度幅值谱 (测点②)

Fig. 5 Vertical acceleration spectra graph for the bearing housing of non-drive-end of shaft II (measuring point ②)

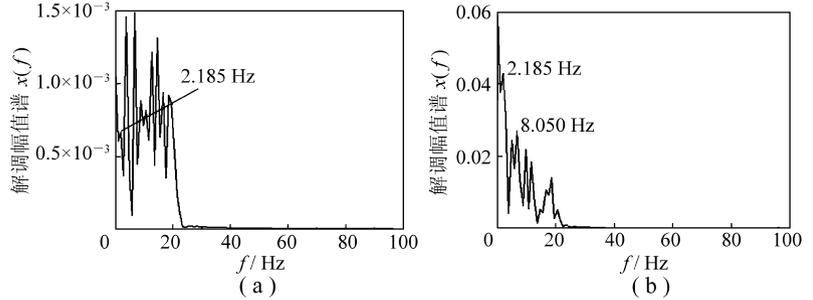


图 6 齿轮减速箱二级传动啮合频率 3 倍频 (459 Hz) 附近的包络解调幅值谱 (a) 及随机共振-包络解调幅值谱 (b)

Fig. 6 Envelope demodulation spectra (a) and stochastic resonance-envelope demodulation spectra (b) around the third-order harmonic of the secondary meshing frequency (459 Hz) of the gearbox

3 结 语

由于非线性双稳系统在输入噪声和微弱周期信号协同作用下会产生 SR 现象, 使弱周期信号得以放大增强; 又由于非线性双稳系统具有在噪声能量集中的低频区域才能产生随机共振的特性, 使得随机共振理论更适合低速重载设备部件故障的振动信号分析与诊断. 本文提出对微弱低频调幅信号先进行随机共振处理, 然后作包络分析的方法. 该方法比传统的 FFT 谱分析及包络解调方法有着明显的优越性.

参考文献:

- [1] Wang Y F, Kootsookos P J. Modeling of low shaft speed bearing faults for condition monitoring [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1998, 12 (3): 415 ~ 426.
- [2] Mechefskse C F, Mathew J. Fault detection and diagnosis in low speed rolling element bearings part I: the use of parametric spectra [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1992, 6 (4): 297 ~ 307.
- [3] 吴晚云, 赵飞鹏. 大型重载滚动轴承的状态监测与故障诊断 [J]. 北方工业大学学报, 1996, 8 (3): 29 ~ 33.
- [4] 高立新, 张建宇, 崔玲丽, 等. 基于小波分析的低速重载设备故障诊断 [J]. 机械工程学报, 2005, 41 (12): 222 ~ 227.
- [5] 荆双喜, 行志刚. 基于同态滤波的低速重载齿轮故障诊断研究 [J]. 煤炭学报, 2006, 31 (3): 405 ~ 408.
- [6] 冷军发, 荆双喜, 陈东海, 等. 基于小波包与同态滤波的低速重载齿轮箱故障诊断研究 [J]. 煤炭学报, 2006, 31 (5): 470 ~ 473.
- [7] 王志刚, 李友荣, 朱瑞荪, 等. 一种用于低速重载轴承故障诊断的共振解调法 [J]. 振动与冲击, 2002(8): 74 ~ 76.
- [8] Benzi R, Sutera A, Vulpiana A. The mechanism of stochastic resonance [J]. Phys. A, 1981, 14: 453 ~ 457.
- [9] 冷永刚, 王太勇, 郭 焱, 等. 二次采样随机共振的工程应用研究 [J]. 中国机械工程, 2004, 15 (20): 1 847 ~ 1 852.
- [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): 3 277 ~ 3 282.
- [11] 李 强, 王太勇, 冷永刚, 等. 基于变步长随机共振的弱信号检测技术 [J]. 天津大学学报, 2006, 39 (4): 432 ~ 437.