

采用形变周期势系统的轴承故障诊断方法

徐浩, 张刚, 张天骐

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 400065, 重庆)

摘要: 针对在高强度噪声环境下的轴承故障信号难以检测的问题,提出一种利用形变周期势系统(DPPS)的轴承故障诊断方法。该方法首先将掺杂噪声的故障信号输入DPPS中,组成以DPPS为核心的随机共振(SR)系统;然后,以功率谱放大倍数(SPA)和幅度响应为测度指标来量化DPPS轴承故障诊断方法对轴承故障特征信号的增强效果,通过矩量法和概率流方法推导SPA和幅度响应的解析式,得到当SPA和幅度响应最大时的DPPS诊断方法的最优设置参数;最后,在相同条件下,将该诊断方法应用于轴承内外圈故障诊断,并与新型幂指三稳势系统(NCETS)轴承故障诊断方法作对比实验。实验结果表明,DPPS轴承故障诊断方法能够利用噪声的能量分别将内外圈故障特征频率的功率谱幅值提高至1 950和2 950 W/Hz,从而可以在功率谱中轻易识别,进而断定轴承的内外圈出现了故障,而NCETS故障诊断方法仅能分别提高至359.2和575.6 W/Hz,证明了采用DPPS的轴承故障诊断方法的有效性和先进性。

关键词: 故障诊断;轴承故障;随机共振;周期势系统

中图分类号: TH133.33 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202008010 **文章编号:** 0253-987X(2020)08-0077-07



OSID 码

A Bearing Fault Diagnosis Method Using Deformable Periodic Potential System

XU Hao, ZHANG Gang, ZHANG Tianqi

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: A bearing fault diagnosis method using the deformation periodic potential system (DPPS) is proposed to solve the problem that the bearing fault signal is difficult to detect in a high-intensity noise environment. The method first inputs the noise-doped fault signal into the DPPS to form a stochastic resonance (SR) system with DPPS as the core and to detect the bearing fault characteristic frequency from the environmental noise and judge the bearing fault type. Then, the spectral power amplification (SPA) and amplitude response are used as measurement indicators to quantify the enhancement effect of the method on the bearing fault characteristic signal. Analytical formulas of SPA and amplitude response are derived using the method of moments and the probability flow method, and the optimal setting parameters of the DPPS diagnosis method are obtained when SPA and amplitude response are maximum. Finally, the DPPS diagnosis method is applied to the fault diagnosis of bearing inner and outer rings, and compared with the bearing fault diagnosis method that uses the novel combined exponential

tristable potential system (NCETS) under the same conditions. Experimental results show that the DPPS diagnosis method uses the noise energy to increase the power spectrum amplitudes of fault characteristic frequency of inner and outer rings to 1 950 and 2 950 respectively. Therefore, it can be easily identified in the power spectrum and then faults of the inner and outer rings of the bearing can be detected. While the NCETS diagnosis method can only increase them to 359.2 and 575.6 respectively. The effectiveness and advancement of the bearing fault diagnosis method using DPPS are proved.

Keywords: fault diagnosis; bearing fault; stochastic resonance; periodic potential system

随机共振(SR)^[1]作为一种新兴的微弱信号检测方法,其基本原理是利用一定强度的涨落力来增强非线性系统的有序性输出。与使用滤波器等传统的降噪方法相比,利用非线性系统的SR不仅能够保证目标信息的完整性,还能利用涨落力的能量来显著地增强目标信号的能量,因此SR被广泛地应用于诸多学科和应用领域内,诸如生物细胞学^[2-3]、物理力学^[4-5]、电化学^[6-7]和微弱信号检测^[8-10]。随着SR研究的深入,SR研究从经典的双稳态系统^[8-10]被拓展到单稳态系统和多稳态系统。谢勇等研究了过阻尼搓板周期势系统中的SR现象,以矩量法发现功率谱放大倍数(SPA)随噪声强度的增加呈现单峰型趋势,揭示了不同参数的变化对系统SR效应的影响规律并论证了矩量法的误差范围^[11]。王慧等提出一种改进型双稳态势系统,通过改变势阱形状发现其在微弱信号检测领域中比经典双稳态系统的性能更优异,将该系统进一步应用于轴承故障诊断中,并验证了该方法的有效性和先进性^[12]。Nicolis等通过研究经典一维余弦型周期势系统发现一定数量内稳态势阱的增多能够提高系统对微弱周期外力的响应,通过调节系统的势阱数量可以获得最大响应^[13]。针对经典多稳态势系统不能较好地从高强度噪声中检测微弱信号的问题,本文提出一种采用形变周期势系统(DPPS)的轴承故障诊断方法,首先根据在加性高斯白噪声(AWGN)和乘性三值色噪声(MTCN)下受周期驱动的DPPS的SR现象,得到最佳设置条件,再基于最佳设置条件,将该方法应用于微弱周期信号检测 and 实际工业轴承故障诊断中。实验结果证明了DPPS诊断方法的有效性和先进性。

1 DPPS 理论分析

1.1 形变周期势函数

DPPS在AWGN和MTCN以及输入信号的共同激励下的朗之万方程为

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\gamma \frac{dx}{dt} - \frac{\partial U(x,r)}{\partial x} + \varepsilon(t) + \xi(t) \quad (1)$$

式中: γ 为DPPS的阻尼系数; $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega_0 t) \beta(t)$ 为输入信号, $\beta(t)$ 为调制输入信号的MTCN; $\xi(t)$ 为高斯白噪声; $\xi(t)$ 的统计特性服从下式

$$\left. \begin{aligned} \langle \xi(t) \rangle &= 0 \\ \langle \xi(t) \xi(t') \rangle &= 2\gamma k_B T \delta(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

根据涨落耗散定理^[14], $\xi(t)$ 的噪声强度为 $D_\xi = \gamma k_B T$,其中 k_B 为玻尔兹曼常数, T 为热室温度,本节所有物理量均采用无量纲形式。

$\beta(t)$ 在 $u = [u_0, u_1, u_2]$ 之间的取值概率为

$$\left. \begin{aligned} p_\beta(u_0) &= p_\beta(u_2) = q_u \\ p_\beta(u_1) &= 1 - 2q_u \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$\beta(t)$ 在 $u = [u_0, u_1, u_2]$ 之间的跃迁条件概率为

$$\left. \begin{aligned} p_t(u_1, t' | u_0, t) &= p_t(u_1, t' | u_2, t) = \\ &= (1 - 2q_u)(1 - e^{-(t-t')/\tau_{\text{cor}}}) \\ p_t(u_0, t' | u_1, t) &= p_t(u_2, t' | u_1, t) = \\ p_t(u_2, t' | u_0, t) &= p_t(u_0, t' | u_2, t) = \\ &= q_u(1 - e^{-(t-t')/\tau_{\text{cor}}}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: τ_{cor} 为 $\beta(t)$ 的相关时间。 $\beta(t)$ 的统计特性为

$$\left. \begin{aligned} \langle \beta(t) \rangle &= 0 \\ \langle \beta(t) \beta(t') \rangle &= \langle u^2 \rangle e^{-|t-t'|/\tau_{\text{cor}}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由此可得 $\beta(t)$ 的噪声强度为

$$D_\beta = 2\tau_{\text{cor}}[(u_0^2 q_u + u_1^2(1 - 2q_u) + u_2^2 q_u) - (u_0 q_u + u_1(1 - 2q_u) + u_2 q_u)^2] \quad (6)$$

DPPS的势函数为^[15-16]

$$U(x, r) = W(r) \frac{1 + c \cos x}{[1 + r^2 + 2r \cos(x/m)]^p} \quad (7)$$

式中: r, c, m, p 为势函数 $U(x, r)$ 的形变系数; $W(r)$ 为 $U(x, r)$ 的分类系数,当 $W(r) = (1 - r)^2$ 时, $U(x, r)$ 为正弦型对称周期势(SSPP),当 $W(r) = (1 - r^2)^2$ 时, $U(x, r)$ 为正弦型非对称周期势(SAPP),当 $W(r) = (1 - r)^4$ 时, $U(x, r)$ 为对称双稳态型周期势(SBPP)。当 $m = p = 1, c = -1, r = 0.1$ 时,DPPS的三类势函数的具体结构如图1所示。

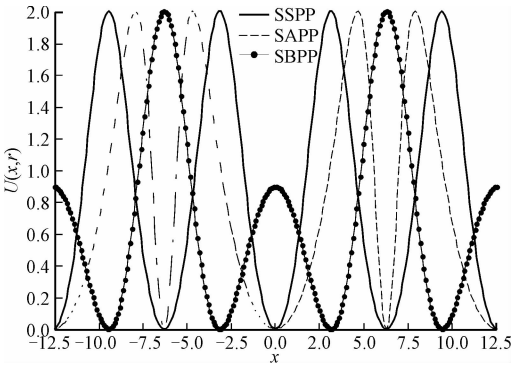


图 1 DPPS 的三类势函数

1.2 SR 机理分析

式(1)的等效 Fokker-Planck 方程^[4-5]为

$$\frac{\partial \rho(x, v, t)}{\partial t} = D_\xi \frac{\partial^2 \rho(x, v, t)}{\partial x^2} - v \frac{\partial \rho(x, v, t)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial v} \left\{ \left[\gamma v + \frac{\partial U(x, r)}{\partial x} - \varepsilon(t) \right] \rho(x, v, t) \right\} \quad (8)$$

式中: $v = \frac{dx}{dt}$; $\rho(x, v, t)$ 表示 x 的概率密度函数。当 $t \rightarrow \infty$ 时, 可得式(8)的稳态解为

$$\rho_0(x, v) = Z^{-1} \exp[-\gamma v^2 / 2D_\xi - \gamma U(x, r) / D_\xi] \quad (9)$$

式中: Z 为 $\rho_0(x, v)$ 的归一化常数。根据弗洛凯理论^[14-16], 存在函数 $F(x, v, t)$ 满足

$$\frac{\langle F(x, v, t) \rangle}{dt} = D_\xi \langle \frac{\partial^2 F}{\partial v^2} \rangle + \langle v \frac{\partial F}{\partial x} \rangle - \langle \left[\gamma v + \frac{\partial U(x)}{\partial x} - \varepsilon(t) \right] \frac{\partial F}{\partial v} \rangle \quad (10)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 表示求平均值。

将 $\rho(x, v, t)$ 变换为如下形式

$$\rho(x, v, t) = \rho_0(x, v) \sum_{n=0}^{\infty} w_n(x, v) \exp(in\omega t) \quad (11)$$

则可得 $F(x, v, t)$ 的数学期望为

$$F(tx, v, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \langle F w_n \rangle_0 \exp(in\omega t) \quad (12)$$

式中, $F(tx, v, t)$ 为未受扰动时 $\rho_0(x, v)$ 的数学期望。将式(12)代入式(10)可得

$$in\omega \langle F w_n \rangle_0 = -D_\xi \langle \frac{\partial F}{\partial v} \frac{\partial w_n}{\partial v} \rangle_0 + k_B T \langle \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial w_n}{\partial v} - \frac{\partial F}{\partial v} \frac{\partial w_n}{\partial x} \rangle_0 + \langle \frac{\partial F}{\partial v} w_{n-1} \rangle_0 \quad (13)$$

将 $w_n(x, v)$ 表示为 x 的幂级数和 v/v_t 的埃尔米特多项式级数^[14-16]

$$w_n(x, v) = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} w_{n,j,k} H_j(v/v_t) x^k \quad (14)$$

式中 $v_t = \sqrt{2k_B T}$, 则 $F(x, v, t)$ 满足

$$F(x, v, t) = H_s(v/v_t) x^r$$

$$s = 1, 2, \dots; r = 1, 2, \dots \quad (15)$$

联立式(13)和式(15)可得

$$\mathbf{A}_s \mathbf{w}_{n,s} + \mathbf{B}_s \mathbf{w}_{n,s+1} + \mathbf{C}_s \mathbf{w}_{n,s-1} = \mathbf{d}_s \quad (16)$$

式(16)中各拓展矩阵满足

$$(\mathbf{A}_s)_{r,k} = (\gamma s + in\omega) \langle x^{r+k} \rangle_0 \quad (17)$$

$$(\mathbf{B}_s)_{r,k} = -r \sqrt{2D_\xi / \gamma} (s+1) \langle x^{r+k-1} \rangle_0 \quad (18)$$

$$(\mathbf{C})_{r,k} = k \sqrt{D_\xi / 2\gamma} \langle x^{r+k-1} \rangle_0 \quad (19)$$

级数矩阵满足

$$(\mathbf{d}_s)_r = \left(\sum_{k=0}^{\infty} w_{n-1,s-1,k} \langle x^{r+k} \rangle_0 \right) / \sqrt{2k_B T} \quad (20)$$

$$\mathbf{w}_{n,s} = \text{tr}[\mathbf{w}_{n,s,0}, \mathbf{w}_{n,s,1}, \mathbf{w}_{n,s,2}, \dots] \quad (21)$$

DPPS 的 n 阶谐波极化率^[14-16]为 $\chi^{(n)} = Q \int_0^{2\pi/\omega_0} \int_{-\infty}^{\infty} v w_n(x, v) dv dx$, 其中 Q 为 n 阶谐波极化率的归一化系数。对式(14)和式(16)进行截断, 分别取 $j=0, 1, \dots, 5; k=0, 2, 4, \dots, 10$ 。联立式(14)、式(16)可得 DPPS 系统的 SPA 为

$$\eta = |\chi^{(n)}|^2 = \left| \sum_{k=0}^{10} w_{n,0,k} \langle x^{k+1} \rangle_0 \right|^2 \quad (22)$$

设置 $\varepsilon(t) = 0.01 \cos(0.02\pi t) \beta(t)$, $m = p = 1$, $c = -1, r = 0.1$ 。图 2、图 3 分别为 DPPS 的 SPA 随

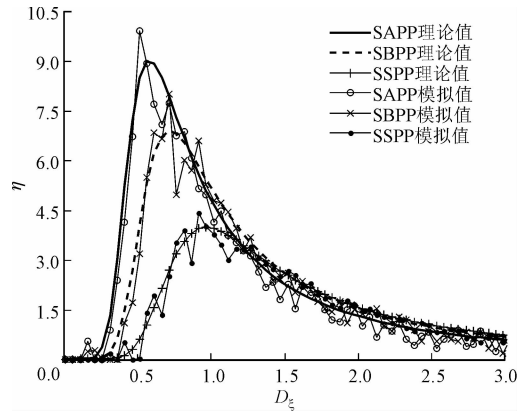


图 2 DPPS 系统的 SPA 随 D_ξ 的演化曲线

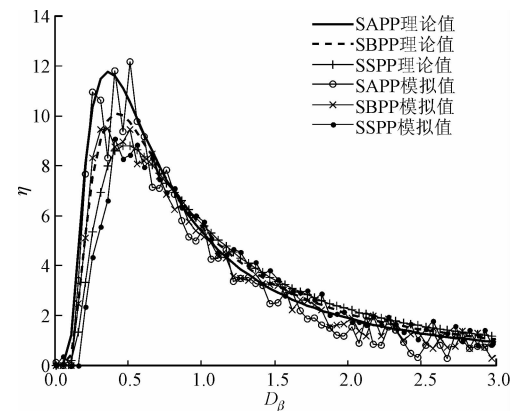


图 3 DPPS 系统的 SPA 随 D_β 的演化曲线

着 D_ε 和 D_β 变化的理论曲线和数值模拟曲线,可见 SPA 随着 D_ε 和 D_β 的增加呈现单峰趋势,表明 DPPS 发生了 SR 现象。对比分类势函数可见, SAPP 的峰值最高, SBPP 次之, SSPP 的峰值最低,说明势阱的非对称性和势垒高度的降低能增强系统的 SR 效应。SPA 的理论值曲线和模拟值曲线基本吻合,证明了理论推导的正确性。

将式(8)改写为

$$\frac{\partial \rho(x, v, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(-\frac{\partial \psi(x, t)}{\partial x} \right) \rho(x, v, t) \right] + D_\varepsilon \frac{\partial^2 \rho(x, v, t)}{\partial x^2} \quad (23)$$

式中, $\psi(x, t) = U(x, r) - x\varepsilon(t)$ 为等效势函数。根据绝热近似理论^[15], 势阱间的跃迁率为 $R(t) = \sqrt{|\psi''_{\text{un}} \psi''_{\text{s}}|} \exp[-\Delta\psi(x, t)/D_\varepsilon]/2\pi$, 下标 un 和 s 分别表示势阱的不稳定点和稳态点, 则各稳态间跃迁的概率流方程组为

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \mathbf{M}\mathbf{P} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$ 为各势阱的概率量组成的列向量, 表示粒子驻留在各吸引域内的概率; $\mathbf{M}$ 为 n 阶跃迁率三对角方阵, $\mathbf{M}$ 中元素为

$$\left. \begin{aligned} M_{11} &= -R_{12}(t) \\ M_{ii} &= -[R_{i,i-1}(t) + R_{i,i+1}(t)], \quad 2 \leq i \leq n-2 \\ M_{mm} &= -R_{n,n-1}(t) \\ M_{i,i+1} &= R_{i+1,i}(t), \quad 1 \leq i \leq n-1 \\ M_{i-1,i} &= R_{i-1,i}(t), \quad 2 \leq i \leq n \\ R_{i,i\pm 1}(t) &= R_{i,i\pm 1}^{(0)} \exp[-\Delta x(i, i\pm 1)\varepsilon(t)/D_\varepsilon] \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

其中, $R_{i,i\pm 1}^{(0)} = \sqrt{|U''_{\text{un}} U''_{\text{s}}|} \exp[-\Delta U(i, i\pm 1)/D_\varepsilon]/2\pi$ 。

将 $\mathbf{M}$ 方阵分解为初始项和受扰动项

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_0 + \mathbf{A}\varepsilon(t) \quad (26)$$

式中: $\mathbf{M}_0$ 为与 $\mathbf{M}$ 同形式的初始跃迁率三对角方阵, $\mathbf{M}_0$ 中元素为对应的 $R_{i,i\pm 1}^{(0)}$; $\mathbf{A} = R_{i,i\pm 1}^{(0)} \Delta x(i, i\pm 1)/D_\varepsilon$ 为受扰动项组成的矩阵。将式(26)代入式(24), 可得

$$\frac{d\Delta\mathbf{P}}{dt} = \mathbf{M}_0\Delta\mathbf{P} + \mathbf{A}\varepsilon(t)\mathbf{P}_0 \quad (27)$$

式中: $\mathbf{P}_0 = [P_1^{(0)}, P_2^{(0)}, \dots, P_n^{(0)}]^T$ 为式(24)的长时间稳态解; $\Delta\mathbf{P} = [\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n]^T$ 为受扰动概率流项, 满足 $\sum_{i=1}^n \Delta P_i = 0$ 。当 $t \rightarrow \infty$ 时, 式(27)的稳态解为

$$\Delta\mathbf{P} = (\mathbf{A}\cos\omega_0 t + \mathbf{B}\sin\omega_0 t) = \mathbf{\Gamma}\sin(\omega_0 t + \mathbf{\Phi}) \quad (28)$$

式中: $\mathbf{\Gamma} = [\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n]^T = \sqrt{(\mathbf{A}_i^2 + \mathbf{B}_i^2)}$ 为幅度响应; $\mathbf{\Phi} = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n]^T = \arctan(\mathbf{B}_i/\mathbf{A}_i)$ 为各势阱的相移; $\mathbf{A} = [A_1, A_2, \dots, A_n]^T$ 和 $\mathbf{B} = [B_1, B_2, \dots, B_n]^T$ 表示各势阱响应的幅度分量。

将式(28)代入式(27), 可得

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} &= -\omega_0 (\mathbf{M}_0^2 + \omega_0^2 \mathbf{E})^{-1} (\mathbf{A}\mathbf{P}_0) \\ \mathbf{B} &= -\mathbf{M}_0 (\mathbf{M}_0^2 + \omega_0^2 \mathbf{E})^{-1} (\mathbf{A}\mathbf{P}_0) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

假设 $\mathbf{M}_0$ 的特征值为 $\lambda_k (k=1, 2, \dots, n)$, 初始状态下各势阱的概率服从均匀分布。当 $p=0, c=1, r=0.5, m=2$ 时, 联立式(27)、式(28)、式(29)进一步可得幅度响应分量的具体解析式为

$$A_i = \frac{8\pi R_{i,i\pm 1}^{(0)}}{\gamma k_B n T} \sum_{k=2}^{2(i+1)} \left[\frac{\omega_0}{(\lambda_k^2 + \omega_0^2)} \cos \frac{(k-1)\pi}{2n} \cdot \cos \frac{(2i-1)(k-1)\pi}{2n} \right] \quad (30)$$

$$B_i = \frac{8\pi R_{i,i\pm 1}^{(0)}}{\gamma k_B n T} \sum_{k=2}^{2(i+1)} \left[\frac{\lambda_k}{(\lambda_k^2 + \omega_0^2)} \cos \frac{(k-1)\pi}{2n} \cdot \cos \frac{(2i-1)(k-1)\pi}{2n} \right] \quad (31)$$

当 $\varepsilon_0 = 0.01$ 时, 图4所示为1号势阱的幅度响应, 可见随着势阱数 n 的增加, 单势阱幅度响应呈现先增大后波动递减的趋势, 且随着 ω_0 增大, 幅值响应减小, 峰值位置左移, 说明对于给定的 $\varepsilon(t)$, 存在一特定的势阱数 $n=5$ 使得各势阱的幅度响应最大, 而这一特定势阱数 n 为驱动频率 ω_0 所影响。

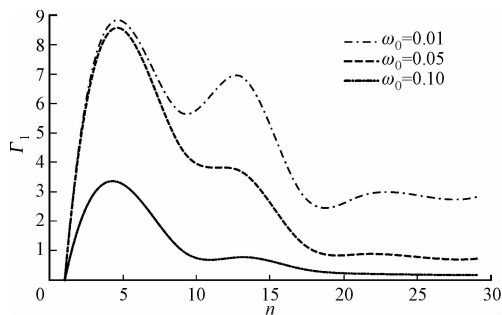


图4 单势阱的幅度响应 ($i=1$)

2 微弱信号检测与轴承故障诊断

2.1 微弱信号检测

为了检验 DPPS 诊断方法的性能优劣, 选用一种性能优秀的 NCETS^[17] 诊断方法进行对比, 其势函数为

$$U(x)_N = a_1 x - b_1 x^3 - 2v_1 x e^{(-x^2/r_1^2)}/r_1^2 \quad (32)$$

图5为 NCETS 的势函数, 其系数为 $a_1=6, b_1=4.5, v_1=2, r_1=0.3$, 由图5可见, NCETS 的左右势阱以中间势阱为中心呈对称分布, 两侧势垒高度

相同。为了使对比的系统均能发生显著的 SR 现象,使用遗传算法(GA)^[18]进行自适应参数寻优,精度截取至小数点后 3 位,算法步骤如下。

(1)使用实数编码将待寻优参数转换为“染色体”,选择 SPA 作为适应度函数。初始化参数个数和取值范围,设置种群大小和最大迭代次数。

(2)计算出所有个体的适应度,在评价过程中寻找 SPA 最大的个体。在每一次评估之后,SPA 最大的个体直接存活到下一代中。

(3)种群中的单个基因交叉互换。如果在交叉过程中满足突变条件,则根据变异概率判断是否发生基因变异。

(4)根据判断条件是否达到最大迭代次数,确定算法是否结束。

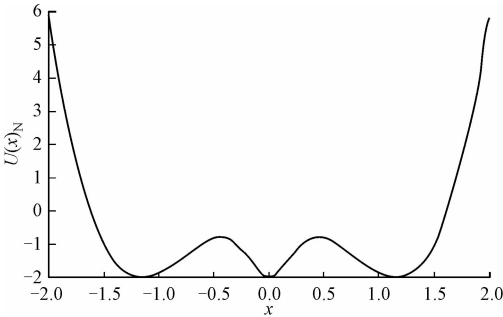


图 5 NCETS 的势函数

当输入信号为 $\epsilon(t)=0.1\cos(50\pi t)\beta(t)$ 、噪声强度为 $D_\epsilon=3$ 、 $D_\beta=1.25$ 时,图 6 和图 7 展示了系统性能随 D_ϵ 、 D_β 的演化曲线。其中:使用 GA 寻获的 SSPP 的输出参数为 $m=2.372$, $p=2.164$, $c=1.413$, $r=0.461$; SAPP 的参数为 $m=1.937$, $p=2.142$, $c=1.317$, $r=0.868$; SBPP 的参数为 $m=2.157$, $p=2.220$, $c=2.206$, $r=0.913$; NCETS 的参数为 $a_t=6.472$, $b_t=4.553$, $v_t=2.160$, $r_t=0.364$ 。从图 6 和图 7 可见,DPPS 方法在微弱周期信号检测方面的性能优于 NCETS 方法,且 DPPS 中以 SAPP 性能最优。将图 6、图 7 与图 2、图 3 作比较,可见调节式(30)(31)中的势阱数 n 能够显著地提高 SPA,验证了上一节的理论分析结果。

2.2 轴承故障诊断

将两种诊断方法进一步应用于工业轴承的内外圈故障信号检测,轴承故障数据来自美国凯斯西储大学数据库^[20],轴承型号为 SKF 6205-2RS 深沟滚动轴承,转动频率为 29.93 Hz,滚珠直径为 0.312 6 cm,节径为 1.537 cm,滚珠为 9 个。外圈故障特征频率为 107.3 Hz,内圈故障特征频率为 162.2 Hz。

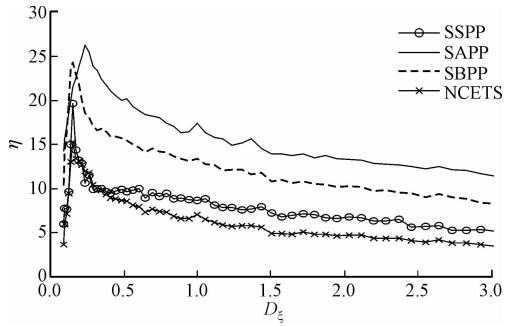


图 6 系统性能随 D_ϵ 的演化曲线

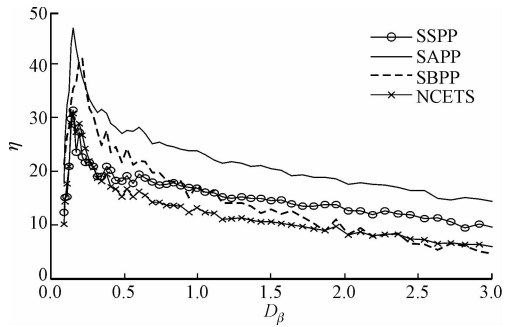
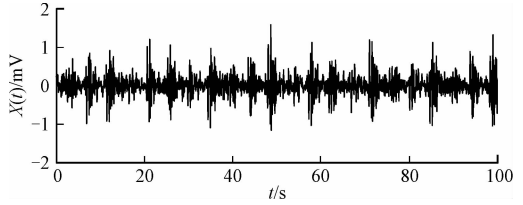
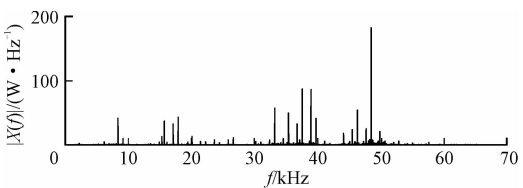


图 7 系统性能随 D_β 的演化曲线

经过希尔伯特变换预处理后的轴承内外圈故障信号如图 8 和图 9 所示。



(a) 时域波形



(b) 功率谱

图 8 轴承的内圈故障信号

从图 8 和图 9 可见,内外圈故障特征频率完全被环境噪声所掩盖,从时域波形和功率谱中难以识别特征频率。设置二次采样比例系数为 10 000,势阱数 $n=5$,使用 GA 寻得用于内圈故障诊断的参数为 $m=1.969$, $p=2.204$, $c=1.251$, $r=0.921$;用于外圈故障诊断的参数为 $m=2.037$, $p=2.168$, $c=1.179$, $r=1.020$ 。图 10、图 11 分别为采用本文 DPPS 方法诊断的内圈和外圈故障输出信号。从图 10 和图 11 可见,轴承内外圈故障信号的时域波形的周期性特征得到了明显改善,功率谱中大量噪声

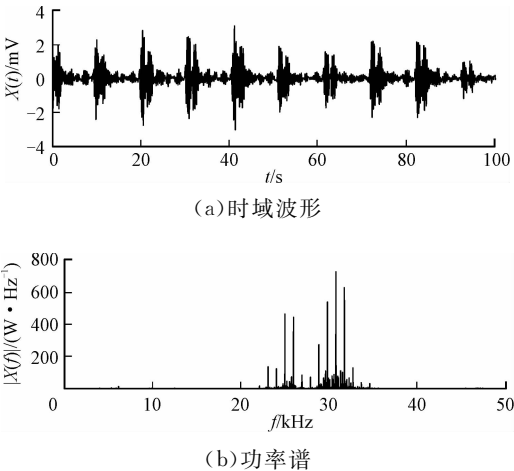


图 9 轴承的外圈故障信号

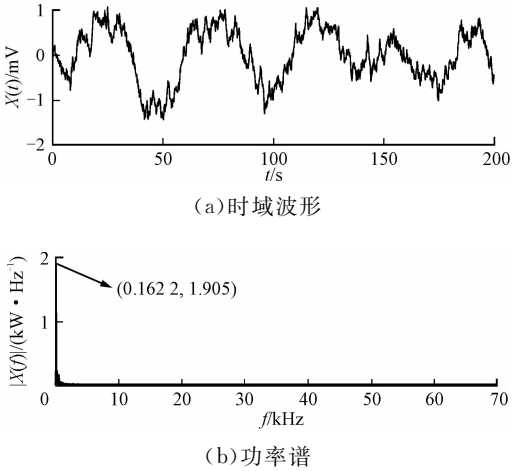


图 10 采用本文 DPPS 方法的内圈故障诊断输出信号

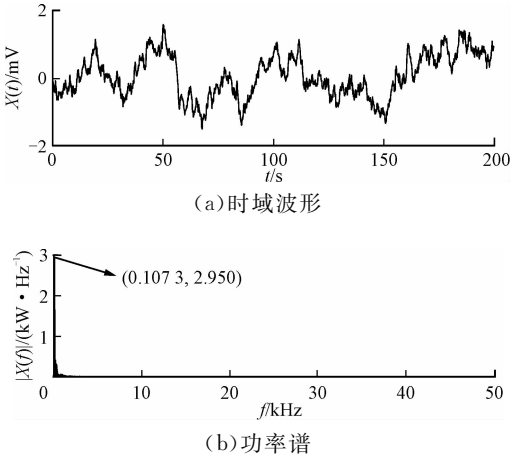


图 11 采用本文 DPPS 方法的外圈故障诊断输出信号

能量向故障特征频率 107.3 Hz 和 162.2 Hz 处转移,故障特征频率的幅值得到了显著提高,可以从功率谱中轻易识别。DPPS 诊断方法通过这种转移噪声能量的方式来检测轴承故障信号,不仅完整地保留了故障特征信息,也变相地削弱了噪声干扰分量。

同样将该故障信号输入 NCETS 中,使用 GA

所寻得的对应内圈故障诊断参数为: $a_i=6.152, b_i=4.548, v_i=2.406, r_i=0.327$;外圈故障诊断参数为 $a_o=6.461, b_o=4.394, v_o=2.575, r_o=0.298$ 。两种故障诊断方法的效果对比如图 12 和图 13 所示。

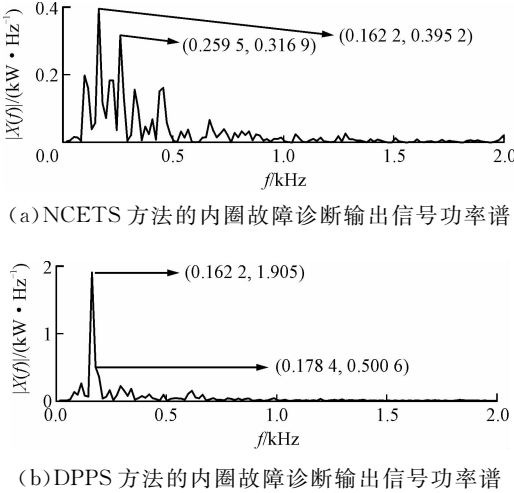


图 12 DPPS 方法与 NCETS 方法的内圈故障诊断效果对比

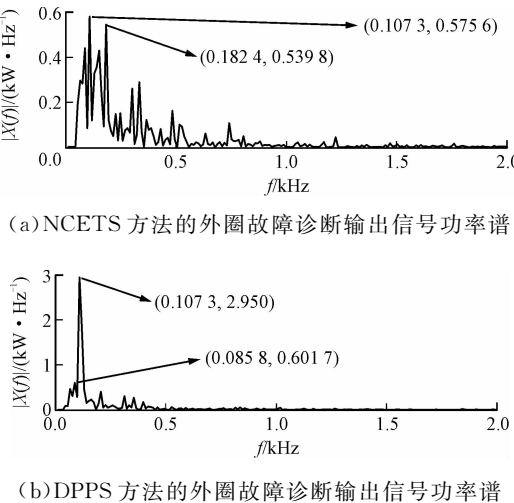


图 13 DPPS 方法与 NCETS 方法的外圈故障诊断效果对比

对比图 12 和图 13 可见,DPPS 诊断方法的输出功率谱的故障特征频率 107.3 Hz 和 162.2 Hz 的幅值分别为 2.950 和 1.905 kW/Hz,相较于 NCETS 方法更大。再比较故障特征频率在对应输出功率谱中的识别度,在 DPPS 诊断方法的对应输出功率谱中,峰值与次峰值的幅值差分别为1.404 4 和2.348 3 kW/Hz,而在 NCETS 方法的对应输出功率谱中,峰值与次峰值的幅值差分别为 0.078 3 和 0.035 8 kW/Hz,因此故障特征频率在 DPPS 诊断方法的对应输出功率谱中的领先度更高,识别度更好,同时也反映了 DPPS 诊断方法能够将更多的

噪声能量准确地转移到故障特征频率处,对噪声能量的有效利用率更高。综合可见,DPPS 诊断方法的性能优于 NCETS 方法。

3 结束语

本文针对在高强度噪声环境下的轴承故障信号难以检测的问题提出了一种 DPPS 轴承故障诊断法,将该方法应用于微弱周期信号检测和实际工业轴承故障诊断中,并与其他方法进行对比实验,结果表明,本文方法具有显著的有效性和先进性。

参考文献:

- [1] BENZI R, PARISI G, SUTERA A, et al. A theory of stochastic resonance in climate change [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1983, 43(3): 565-578.
- [2] AMIRPASHA Z, NIKITA N, BORIS G. Concomitance of inverse stochastic resonance and stochastic resonance in a minimal bistable spiking neural circuit [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2020, 82: 105024.
- [3] SINGH M, VERMA A, SHARMA N. An optimized cascaded stochastic resonance for the enhancement of brain MRI [J]. IRBM, 2018, 39: 334-342.
- [4] ZHANG Lu, LAI Li, PENG Hao, et al. Stochastic and superharmonic stochastic resonances of a confined overdamped harmonic oscillator [J]. Physical Review E, 2018, 97(1): 012147.
- [5] XIE Min, FAN Bixuan, HE Xiaoli, et al. Interference effect in optomechanical stochastic resonance [J]. Physical Review: E, 2018, 98(5): 052202.
- [6] SHAO Zhengzheng, YIN Zhizhen, SONG Helun, et al. Fast detection of a weak signal by a stochastic resonance induced by a coherence resonance in an excitable GaAs/Al_{0.45}Ga_{0.55} as superlattice [J]. Physical Review Letters, 2018, 121(8): 086806.
- [7] ISHANT T, RICHA P, PARMANANDA P, et al. Intrinsic periodic and aperiodic stochastic resonance in an electrochemical cell [J]. Physical Review: E, 2016, 94(2): 022210.
- [8] LU Siliang, HE Qingbo, WANG Jun. A review of stochastic resonance in rotating machine fault detection [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 116: 230-260.
- [9] QIAO Zijian, LEI Yaguo, LI Naipeng. Applications of stochastic resonance to machinery fault detection: a review and tutorial [J]. Mechanical Systems and Signal

Processing, 2019, 122: 502-536.

- [10] LI Jimeng, ZHANG Jinfeng, LI Ming, et al. A novel adaptive stochastic resonance method based on coupled bistable systems and its application in rolling bearing fault diagnosis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 114: 128-145.
- [11] 谢勇, 刘若男. 过阻尼搓板势系统的随机共振 [J]. 物理学报, 2017, 66(12): 87-96.
XIE Yong, LIU Ruonan. Stochastic resonance of an overdamped washboard potential system [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(12): 87-96.
- [12] 王慧, 张刚, 张天骐. 改进型双稳随机共振系统及其在轴承故障诊断的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 4(54): 110-117.
WANG Hui, ZHANG Gang, ZHANG Tianqi. Improved bistable stochastic resonance system and its application in bearing fault diagnosis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 4(54): 110-117.
- [13] NICOLIS C. Stochastic resonance in multistable systems: the role of intermediate states [J]. Physical Review: E, 2010, 82: 011139.
- [14] 胡岗. 随机力与非线性系统 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1994.
- [15] REENBOHN W L, MAHATO M C. Dynamical states, stochastic resonance, and ratchet effect in a biharmonically driven sinusoidal potential [J]. Physical Review: E, 2015, 91(5): 052151.
- [16] ASISH K D. Signal amplification factor in stochastic resonance: an analytic non-perturbative approach [J]. Physica: D Nonlinear Phenomena, 2015, 303: 1-17.
- [17] 张刚, 高俊鹏. 组合型幂指数三稳态随机共振微弱信号检测 [J]. 计算机应用, 2018, 38(9): 2747-2752.
ZHANG Gang, GAO Junpeng. Weak signal detection based on combination of power and exponential function model in tri-stable stochastic resonance [J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(9): 2747-2752.
- [18] 邹创, 陶涛, 姜歌东, 等. 考虑力学特性的谐波齿轮啮合参数优化方法 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(2): 16-23.
ZOU Chuang, TAO Tao, JIANG Gedong, et al. A method to optimize the meshing parameters of harmonic gears considering mechanical properties [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(2): 16-23.
- [19] CWRU. 12k drive end bearing fault data [DB/OL]. [2019-05-15]. <http://csegroups.case.edu/bearing-datacenter/pages/download-data-file>.

(编辑 刘杨)