

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006123

二维四稳势系统随机共振机理研究与应用^{*}

张 刚, 徐 浩, 张天骐

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

摘 要:针对二维势场中的随机共振(SR)的研究较少的问题,探讨在高斯白噪声和外部微弱驱动力共同作用下的二维四稳态势系统(TTPS)的SR机理与应用。根据线性响应理论,使用概率流方法计算TTPS对外部周期驱动频率的功率谱增益因子(SAF)。理论分析结论表明,以SAF为指标时,TTPS将发生显著的SR现象,通过提高耦合系数和非对称系数或降低驱动频率能够进一步地提高SAF。而后结合Chambers-Malllowa-Stuck算法与四阶龙格库塔法,利用遗传算法的寻优参数将TTPS应用于微弱周期信号检测和轴承故障诊断中,并与新型一维三维势系统(NOTPS)进行对比。实验结果证明了理论分析结论的正确性,表明TTPS能够有效地检测微弱周期信号和诊断轴承内外圈的故障。两种轴承内圈故障频率处的幅值能被TTPS分别提高至419.5和297.1,而NOTPS只能将之分别提高至250.6和103.4;两种轴承外圈故障频率处的幅值能被TTPS分别提高至408.7和342.9,而NOTPS只能将之分别提高至269.3和186.6,证明TTPS的性能优于NOTPS。

关键词: 随机共振;二维四稳势系统;功率谱增益因子;微弱信号检测;轴承故障诊断

中图分类号: TH133.33 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research and application of stochastic resonance mechanism of two-dimensional tetra-stable potential system

Zhang Gang, Xu Hao, Zhang Tianqi

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

Abstract: Aiming at the problem of less research on stochastic resonance (SR) in two-dimensional potential field, the SR mechanism and application of two-dimensional tetra-stable potential system (TTPS) under the combined action of Gaussian white noise and external weak driving force are discussed. According to the linear response theory, the probability flow method is used to calculate the spectral amplification factor (SAF) of the TTPS to external periodic driving frequency. The theoretical analysis result shows that when the SAF is used as an indicator, a significant SR phenomenon will occur in the TTPS. The SAF can be further improved by increasing the coupling coefficient and asymmetry coefficient or lowering the driving frequency. Then, combining the Chambers Malllowa-Stuck algorithm and fourth-order Runge-Kutta method, using the optimization parameters of genetic algorithm (GA), the TTPS is applied to weak periodic signal detection and bearing fault diagnosis, and compared with the new one-dimensional tri-stable potential system (NOTPS). The experiment results prove the correctness of the theoretical analysis conclusion, and indicate that the TTPS can effectively detect the weak periodic signal and diagnose the faults of the inner and outer rings of the bearings. The amplitudes at the fault frequencies of the two bearing inner rings can be increased to 419.5 and 297.1 with TTPS, respectively, while those can only be increased to 250.6 and 103.4 with NOTPS, respectively. The amplitudes at the fault frequencies of the two bearing outer rings can be increased to 408.7 and 342.9 with TTPS, respectively, while those can only be increased to 269.3 and 186.6 with NOTPS, respectively, which proves that the performance of the TTPS is better than that of NOTPS.

Keywords: stochastic resonance; two-dimensional tetra-stable potential system; spectral amplification factor; weak signal detection; bearing fault diagnosis

0 引言

随机共振 (stochastic resonance, SR) [1-3] 是一类广义的涨落力非线性作用于系统有序性响应的现象,并被应用在多种学科和研究领域中,诸如生物细胞学[4-6]、物理[7-9]、化学[10-11]和微弱信号检测领域[12-14]。相较于使用滤波器等传统降噪方法,基于 SR 原理的微弱信号检测方法的优势在于能够利用噪声能量来增强目标信号的特征信息。贺利芳等[15]研究了时延反馈生态植被生长系统的 SR 现象,通过 Fokker-Planck 方程推导出了系统输出信噪比的表达式,发现通过调节系统参数、信号幅值、噪声强度均可诱导系统产生随机共振现象。刘学等[16]针对在强噪声背景下提取遥测振动信号的微弱非线性特征的问题,提出一种基于双树复小波的多尺度噪声调节 SR 方法,使用多尺度噪声调节和樽海鞘群算法来增强 SR 效应,从而能够有效地提取特征信息,并通过实验仿真验证了该方法的有效性。刘进军等[17]针对一维经典双稳态系统的势阱参数调节问题和 SR 对采样频比的限制,提出一种基于势阱参数调节的 SR 方法,使用变量代换法实现了势阱参数之间的解耦,并与频域信息交换方法相结合,实现了低采样频比信号的检测。然而,目前大部分的研究成果都是基于一维势系统,二维势系统由于系统状态变量的耦合性和阱间跃迁的复杂性而缺乏足够的研究。在二维势阱中,阱间跃迁由平面拓展到空间中,更繁杂的跃迁轨迹将产生更丰富的演化结果。而在现实中,二维势系统也有广泛的来源与应用,许多动力学模型均可以归纳为二维势系统,例如受涡激影响的海洋输运管道,地震灾害中的堤坝系统和受横风影响工业悬梁臂等,因此具有一般意义的二维势系统的 SR 机理值得关注与研究。在应用层面,二维势系统相较于一维势系统对涨落力强度的要求更高[18],针对一维势系统不能较好地应用于高强度噪声环境下的微弱信号检测的问题,将二维势系统应用于高强度噪声环境中的微弱信号检测具有理论上的可行性和应用价值。因此本文提出一种具有一般意义的二维四稳态势系统 (two-dimensional tetra-stable potential system, TTPS), 首先就 TTPS 的势函数进行探讨,进而研究其 SR 机理,结合 Chambers-Mallowa-Stuck 算法与四阶龙格库塔法进行数值模拟,以功率谱增益因子 (spectral amplification factor, SAF) 为衡量指标,检验理论分析的正确性和 TTPS 在检测微弱信号方面的性能,最后将 TTPS 应用于工业轴承故障诊断,以检验 TTPS 的实际应用价值,并与新型一维三稳势系统 (novel one-dimensional tri-stable potential system, NOTPS) 做综合性能对比以验证 TTPS 的先进性。

1 TTPS 理论分析

1.1 TTPS 势函数

在过阻尼条件下,二维势系统的动力学方程可由如下 Langevin 方程描述:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\frac{\partial V(x, y, t)}{\partial x} + \xi_1(t) \\ \frac{dy}{dt} = -\frac{\partial V(x, y, t)}{\partial y} + \xi_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $V(x, y, t)$ 为 TTPS 的等效势函数; $\xi_1(t)$ 和 $\xi_2(t)$ 为对应的环境噪声,符合如下统计性质:

$$\begin{cases} \langle \xi_i(t) \rangle = 0 \\ \langle \xi_i(t) \xi_j(t') \rangle = 2\gamma k_B T \delta_{ij} \delta(t - t') \end{cases} \quad i, j = 1, 2 \quad (2)$$

式中: γ 、 k_B 和 T 分别为阻尼系数、Boltzmann 常数和温度; δ 为 Dirac 函数。本节变量均为无量纲形式。

$V(x, y, t)$ 由一维势函数拓展而来,遵循如下形式:

$$\begin{cases} V(x, y, t) = V_0(x, y) + A_1 g(x, y) \cos(\omega_0 t + \varphi) \\ V_0(x, y) = c(x + y) - rxy + 0.5(r - a_1)x^2 + \\ 0.25b_1x^4 + 0.5(r - a_2)y^2 + 0.25b_2y^4 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi)$ 代表输入信号。其中: A_1 为驱动幅值; ω_0 为驱动频率; φ 为相位。 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 为系统参数; c 为非对称系数; r 为耦合系数。 $g(x, y) = x + \alpha y$ 为耦合函数; α 为关联系数。

图1所示为当 $a_1 = a_2 = 4$, $b_1 = b_2 = 1$, $c = r = 0.1$ 时,未受激励的等效势函数 $V_0(x, y)$, 可见 $V_0(x, y)$ 势场中分布着4个非对称势阱,相邻势阱和对角势阱之间被势垒所分开。

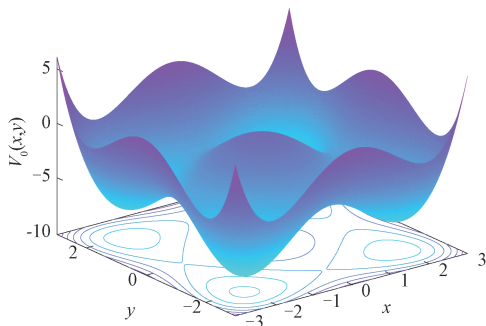


图1 等效势函数 $V_0(x, y)$

Fig.1 Equivalent potential function $V_0(x, y)$

图2所示为 $V_0(x, y)$ 的俯视图,每个势阱对应一个稳态点 (S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4),每个势垒对应一个鞍点 (U_{12} 、 U_{23} 、 U_{34} 、 U_{41} 、 O),将 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 对应的四个势阱依次简记为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 ,图2中箭头线段代表势场约束力的方向,其中双向箭头线段亦表示最小能量路径。

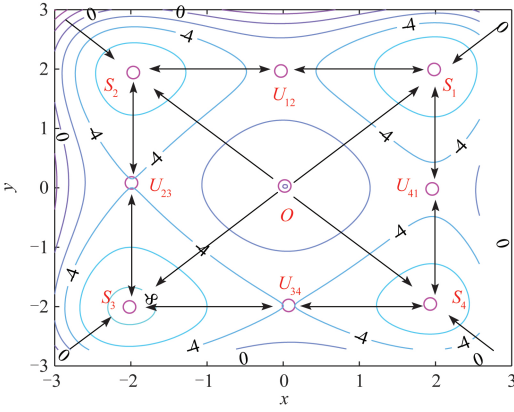


图2 稳态点及鞍点分布

Fig.2 Distribution of stable points and saddle points

图3所示为NOTPS的势函数,可见其势场被约束于一维平面内,其存在3个势阱和2个势垒。

1.2 SR机理研究

对应式(1)的FPE如下:

$$\frac{\partial \rho(x, y, t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial V(x, y, t)}{\partial x} \rho(x, y, t) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial V(x, y, t)}{\partial y} \rho(x, y, t) \right] + D \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \rho(x, y, t) \quad (4)$$

式中: $\rho(x, y, t)$ 为概率密度函数,等号的右边前两项描

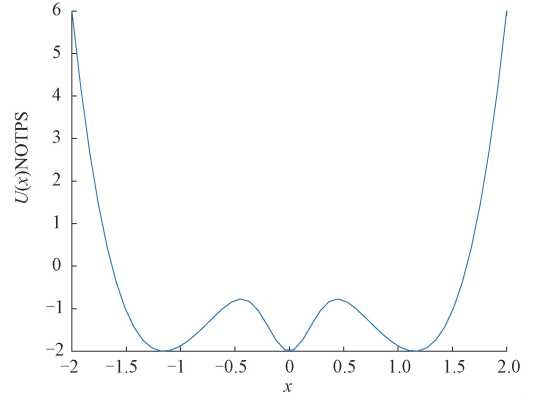


图3 NOTPS的势函数

Fig.3 Potential function of NOTPS

述了概率在势阱内的小尺度扩散性质,右边第3项描述了概率通过鞍点在相邻势阱之间的大尺度跃迁性质。 $D = \gamma k_B T$ 为噪声强度^[19]。假设在时刻 t 各势阱内的稳态概率量分别为 $p_i(t)$ ($i = 1, 2, 3, 4$), 满足 $\sum_{i=1}^4 p_i(t) = 1$, 则阱间跃迁的概率流方程为:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \mathbf{K}\mathbf{P} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{P} = [p_1(t), p_2(t), p_3(t), p_4(t)]^T$; $\mathbf{K}$ 为跃迁率矩阵,具体形式如下:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -k_{12}(t) - k_{14}(t) & k_{21}(t) & 0 & k_{41}(t) \\ k_{12}(t) & -k_{21}(t) - k_{23}(t) & k_{32}(t) & 0 \\ 0 & k_{23}(t) & -k_{32}(t) - k_{34}(t) & k_{43}(t) \\ k_{14}(t) & 0 & k_{34}(t) & -k_{41}(t) - k_{43}(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $k_{ij}(t)$ 表示从势阱 L_i 到 L_j 的跃迁率,符合:

$$k_{ij}(t) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_{i1}\lambda_{i2}\lambda_{ij1}}{\lambda_{ij2}}} \exp\left(-\frac{\Delta V_{ij}}{D}\right), \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

式中: λ_{i1} 和 λ_{i2} 为 $V_0(x, y)$ 的 Hessian 矩阵在 S_i 处的特征值; λ_{ij1} 和 λ_{ij2} 为 $V_0(x, y)$ 的 Hessian 矩阵在 U_{ij} 处的特征值^[19]。势垒 ΔV_{ij} 为 $V(x, y, t)$ 在 S_i 和 U_{ij} 处的差值。将式(7)代入式(5)中进行幂级数展开。

$$e^{\cos(\omega_0 t + \varphi)} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \cos^n(\omega_0 t + \varphi) \quad (8)$$

忽略 $n \geq 2$ 的项,可得:

$$k_{ij}(t) = k_{ij}^0 + k_{ij}^0 \Delta g_{ij} A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi) / D \quad (9)$$

式中: k_{ij}^0 为只存在噪声而无输入信号时的初始跃迁率,同理可由式(7)和 $V_0(x, y)$ 计算。

将式(9)代入式(5)中, $\mathbf{K}$ 可分解为初始跃迁率矩阵 $\mathbf{K}_0$ 和扰动矩阵 $\Delta \mathbf{K}$ 之和,其中 $\mathbf{K}_0$ 中的元素为 k_{ij}^0 , $\Delta \mathbf{K}$ 中的

元素为 $\Delta k_{ij} = \Delta g_{ij} k_{0ij}$, 即:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 + \Delta \mathbf{K} A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi) / D \quad (10)$$

势阱内概率量的响应为:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 + A_1 \Delta \mathbf{P} / D \quad (11)$$

式中: $\mathbf{P}_0 = [p_1^0, p_2^0, p_3^0, p_4^0]$ 为只存在噪声时的稳态概率量; $\Delta \mathbf{P} = [\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3, \Delta p_4]$ 为受扰动产生的概率响应。将式(10)代入式(11)中,可得:

$$\frac{d\Delta \mathbf{P}}{dt} = \mathbf{K}_0 \Delta \mathbf{P} + \Delta \mathbf{K} \mathbf{P}_0 A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi) / D \quad (12)$$

在长时极限下,系统趋于稳定状态,初始条件对系统产生的影响消失,概率响应为:

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{W} \sin(\omega_0 t + \varphi) + \mathbf{H} \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (13)$$

式中: $\mathbf{W} = [w_1, w_2, w_3, w_4]^T$, $\mathbf{H} = [h_1, h_2, h_3, h_4]^T$ 。将式(13)合并,可得幅相响应:

$$\begin{cases} R_i = A_1 \sqrt{w_i^2 + h_i^2}, & i = 1, 2, 3, 4 \\ \phi_i = \arctan(h_i / w_i) \end{cases} \quad (14)$$

式中: R_i 为幅度响应; ϕ_i 为相移。将式(13) 代入式(12) 可得:

$$\begin{cases} \mathbf{W} = -\omega_0 (\mathbf{K}_0^2 + \omega_0^2 \mathbf{E})^{-1} (\Delta \mathbf{K} \mathbf{P}_0) \\ \mathbf{H} = -\mathbf{K}_0 (\mathbf{K}_0^2 + \omega_0^2 \mathbf{E})^{-1} (\Delta \mathbf{K} \mathbf{P}_0) \end{cases} \quad (15)$$

使用特征值 λ_i 和特征向量 $\boldsymbol{\mu}_i$ 表示 $\mathbf{K}_0$, 进一步可得:

$$\begin{cases} w_i = -\sum_{i=1}^4 \frac{\omega_0}{\lambda_i^2 + \omega_0^2} m_i \boldsymbol{\mu}_i \\ h_i = -\sum_{i=1}^4 \frac{\lambda_i}{\lambda_i^2 + \omega_0^2} m_i \boldsymbol{\mu}_i \end{cases} \quad (16)$$

其中, m_i 为 $\Delta \mathbf{K} \mathbf{P}_0 = \sum_{i=1}^4 m_i \boldsymbol{\mu}_i$ 的扩展系数。

系统响应 $X(t)$ 的一阶矩定义为:

$$\langle X(t) | x_0, y_0, t_0 \rangle = \iint xy P(x, y, t | x_0, y_0, t_0) dx dy \quad (17)$$

初始时各势阱概率量 $\mathbf{P}$ 均集中在稳态点 S_i , 即 $P(x, y, t | x_0, y_0, t_0) = \sum_{i=1}^4 P_i(t) \delta(x - x_{S_i}, y - y_{S_i})$ 。则系统的平均渐近响应 $\langle X(t) \rangle_{as}$ 为:

$$\langle X(t) \rangle_{as} = \sum_{i=1}^4 S_i P_i^0 + S_i R_i \sin(\omega_0 t + \varphi + \phi_i) \quad (18)$$

由此可得当长时极限下 $\langle X(t) \rangle_{as}$ 在频率 ω_0 的输出功率 M 为:

$$\begin{cases} M = T_1^2 + T_2^2 + 2T_1 T_2 \cos(\psi_1 - \psi_2) \\ T_1 = \sqrt{S_1^2 R_1^2 + S_2^2 R_2^2 + 2S_1 R_1 S_2 R_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)} \\ T_2 = \sqrt{S_3^2 R_3^2 + S_4^2 R_4^2 + 2S_3 R_3 S_4 R_4 \cos(\phi_3 - \phi_4)} \end{cases} \quad (19)$$

其中,

$$\psi_1 = \arctan\left(\frac{S_1 R_1 - S_2 R_2}{S_1 R_1 + S_2 R_2} \tan\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right)\right)$$

$$\psi_2 = \arctan\left(\frac{S_3 R_3 - S_4 R_4}{S_3 R_3 + S_4 R_4} \tan\left(\frac{\phi_3 - \phi_4}{2}\right)\right)$$

则 TTPS 的输出 SAF 为 $\eta = M/A_1^2$ 。

图 4 所示为耦合系数 r 对 SAF 的影响, 可见当 $D \geq 1$ 时, 噪声强度的增大不仅不会削弱 SAF, 反而会提高 SAF, 而当 SAF 到达峰值之后, D 进一步的增加就会降低系统对输入信号的响应。对比图中曲线, 可见 SAF 与耦合系数 r 成正比, 且 r 越大, 峰值所对应的 D 越大。

图 5 所示为非对称系数 c 对 SPA 的影响, 可见 SPA 与 c 成正比, 说明势阱结构的非对称性能够增强 SPA, 与图 4 类似的是峰值位置随着 c 的增大而右移, 但在峰值过后, SPA 的衰减速度变大。

图 6 所示为驱动频率 ω_0 对 SAF 的影响, 可见 SAF 与 ω_0 成反比, 且峰值位置随着 ω_0 的增大而左移。

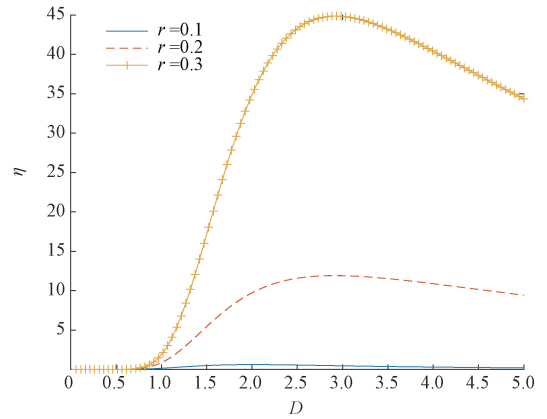


图 4 当耦合系数 r 不同时 SAF 随 D 的函数曲线
Fig.4 Function curves of SAF versus D for different values of coupling coefficient r

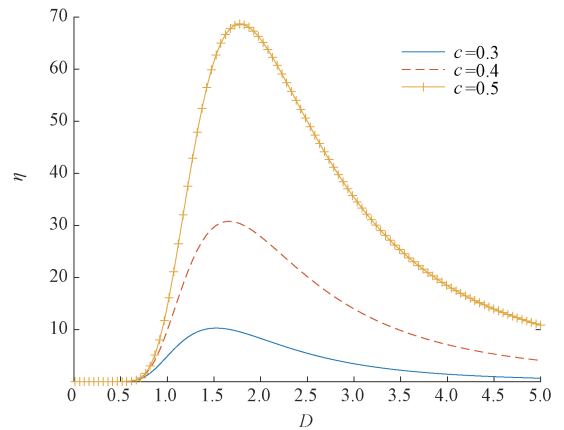


图 5 当非对称系数 c 不同时 SAF 随 D 的函数曲线
Fig.5 Function curves of SAF versus D for different values of asymmetric coefficient c

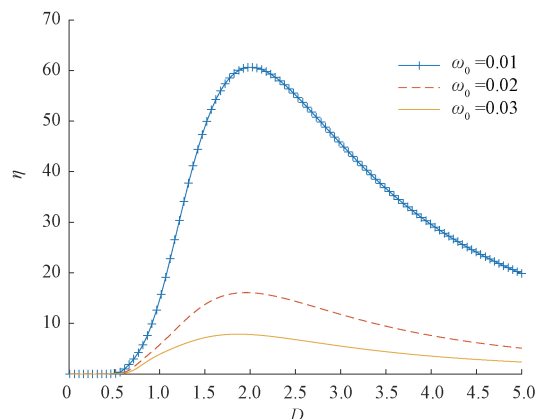


图 6 当驱动频率 ω_0 不同时 SAF 随 D 的函数曲线
Fig.6 Function curves of SAF versus D for different values of driving frequency ω_0

综合图 4~6 可得,可以通过合理地增大耦合系数 r 、非对称系数 c 或降低驱动频率 ω_0 来提高 TTPS 的 SAF 从而得到更优的系统性能。

2 数值模拟与轴承故障诊断

为了验证上文的理论分析并检验 TTPS 的系统性能,本节结合 Chambers-Malllowa-Stuck 算法与四阶龙格库塔法^[12-15]进行数值模拟。设置输入信号为 $X(t)_{in} = 0.1\cos(0.02\pi t)$, $D = 3$ 。在实际微弱信号检测中,为了使 TTPS 发生显著的 SR 现象,本节使用遗传算法 (genetic algorithm, GA)^[20-21]进行参数寻优,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 SAF 作为适应度函数。
- 2) 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。
- 3) 根据 SAF 计算出所有个体的适应度,在评价过程中寻找 SAF 最大的个体。在每一次评估之后,SAF 最大的个体直接存活到下一代中。
- 4) 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,则执行步骤 5)。
- 5) 根据变异概率判断是否发生基因变异。
- 6) 根据判断条件是否达到最大迭代次数,确定算法的下一步流程。

在此条件下使用 GA 寻得的最优参数为 $a_1 = 0.134$, $b_1 = 0.126$, $a_2 = 0.107$, $b_2 = 0.115$, $c = 0.014$, $r = 0.022$ 。图 7(a)和(b)所示分别为含噪输入信号的时域波形和功率谱,图 7(c)和(d)所示分别为将含噪信号输入 TTPS 处理后输出信号的时域波形和功率谱。对比可见时域波形的周期性特征得到了明显增强,噪声分量向 0.01 Hz 所在频段转移,目标频率 0.01 Hz 分量的功率谱幅值得到了显著提高。

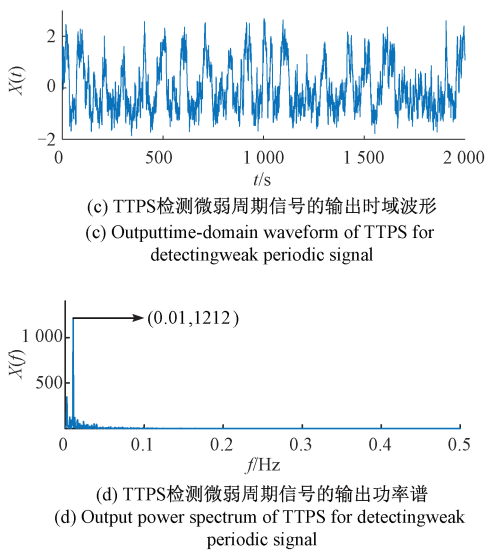
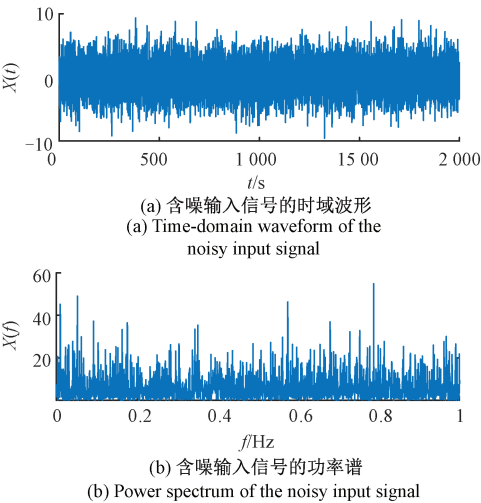


图 7 TTPS 微弱周期信号检测

Fig.7 Weak periodic signal detection using TTPS

同样设置输入信号为 $X(t)_{in} = 0.1\cos(0.02\pi t)$, 以 SAF 为测度指标,图 8 所示为 TTPS 与 NOTPS 的性能曲线以及各自的理论值与模拟值的对比。比较理论值与数值模拟值可见,SAF 理论曲线与数值模拟的实际曲线基本吻合,证明了理论推导的正确性,而出现误差的主要原因在于使用式(8)和(9)计算跃迁率时为了降低计算复杂度省略了 $n \geq 2$ 的高阶项。另外对比 TTPS 和 NOTPS 的性能曲线可见,同样在使用 GA 寻得的最优参数条件下,TTPS 不仅峰值更大,且峰值位置也更靠右,说明 TTPS 的性能更加优秀,能够适用于更强的噪声环境中。

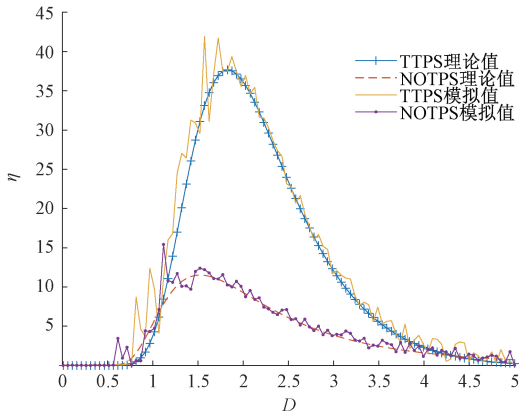


图 8 TTPS 与 NOTPS 性能对比

Fig.8 Performance comparison between TTPS and NOTPS

将 TTPS 应用于实际工业轴承故障诊断中,第一种轴承故障数据来自于文献[22],轴承型号为 SKF 6205-

2RS,轴承转速为 1800 r/s,内径 25 mm,外径 52 mm,宽度 15 mm。轴承内圈特征故障频率为 $f_{\text{BPFI}} = 162.2 \text{ Hz}$ 和外圈故障特征频率为 $f_{\text{BPFO}} = 107.3 \text{ Hz}$ 。图 9(a)、9(b)所示分别为轴承内圈故障信号的时域波形和功率谱;图 9(c)、9(d)所示分别为外圈故障信号的时域波形和功率谱。从图 9 可见,时域图和功率谱中充斥大量噪声分量,故障特征频率 107.3 Hz 和 162.2 Hz 完全被环境噪声所掩盖,难以识别。

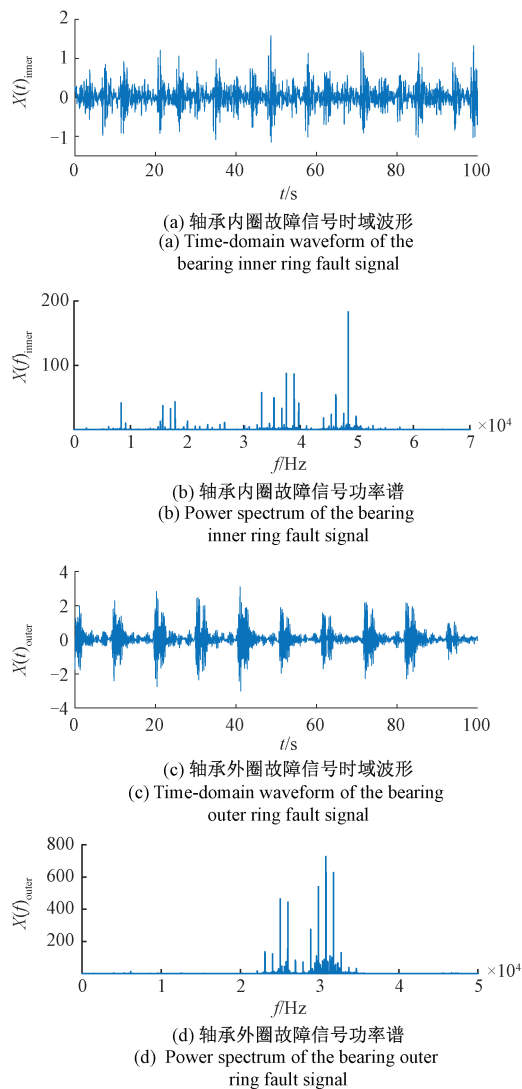


图 9 SKF 6205-2RS 轴承故障信号

Fig.9 Fault signals of the bearing SKF 6205-2RS

将故障信号输入 TTPS 中,使用 GA 寻获的内圈最优参数: $a_1 = 0.098, b_1 = 0.102, a_2 = 0.112, b_2 = 0.098, c = 0.032, r = 0.026$;外圈参数为 $a_1 = 0.110, b_1 = 0.117, a_2 = 0.104, b_2 = 0.112, c = 0.029, r = 0.021$ 。图 10(a)、(b)所示分别为对应内圈故障的输出信号,图 10(c)、(d)所示分别为对应外圈故障的输出信号。

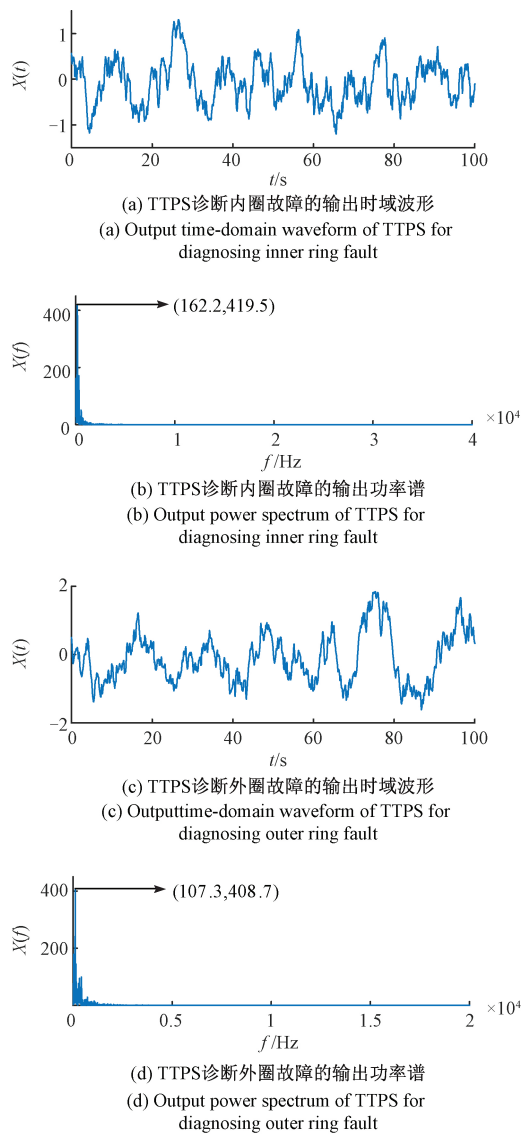
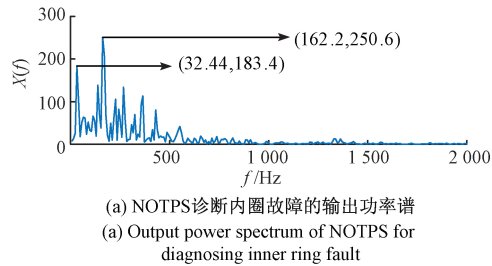


图 10 TTPS 轴承故障诊断

Fig.10 Bearing fault diagnosis using TTPS

为了验证 TTPS 的先进性,将 TTPS 与 NOTPS 作比较。同样,将 NOTPS 应用于轴承内外圈故障诊断中,使用 GA 寻获的最优参数,诊断效果如图 11(a)、(c)的功率谱所示,其中图 11(b)、(d)所示为图 10(b)、(d)在 0~2 000 Hz 频段的局部放大图。



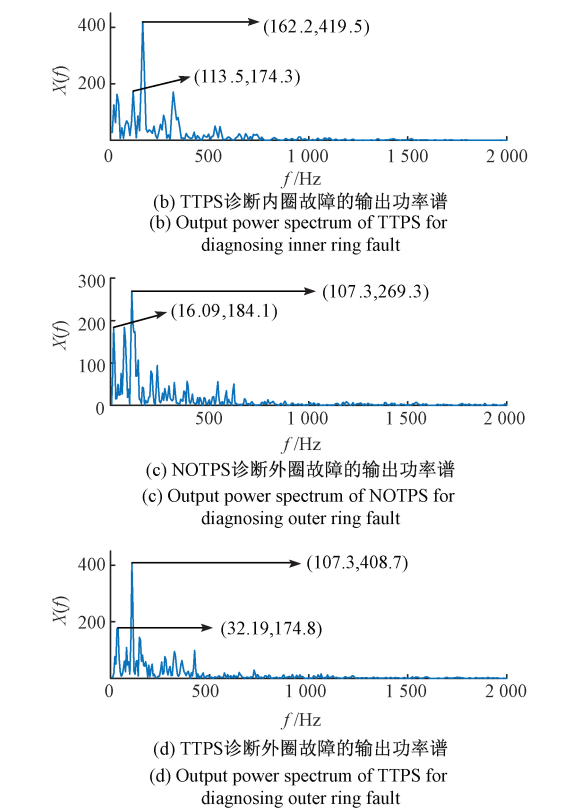


图 11 TTPS 与 NOTPS 诊断 SKF6205-2RS 轴承故障的效果对比

Fig.11 Effect comparison between TTPS and NOTPS in diagnosing the faults of bearing SKF6205-2RS

第 2 种轴承故障数据来自于 ID-25/30 型轴承全寿命试验台,利用振动传感器和 NI PXIe-1082 数据采集系统采集轴承振动信号,采样频率 10 kHz,轴承型号为 SKF 6206-2Z,内径 30 mm,外径 62 mm,宽度 16 mm,转速为 1 300 r/s,轴承内圈特征故障频率为 $f_{\text{BPF12}} = 117.30 \text{ Hz}$,轴承外圈故障特征频率为 $f_{\text{BPF02}} = 78.33 \text{ Hz}$ 。

图 12(a)、(b)所示分别为 SKF 6206-2Z 轴承内圈故障信号,图 12(c)、(d)所示分别为外圈故障信号,可见相对于内圈故障信号,外圈故障信号的背景噪声对故障信号的干扰更为严重,功率谱中存在大量的高频噪声,时域图中共振带完全消失。

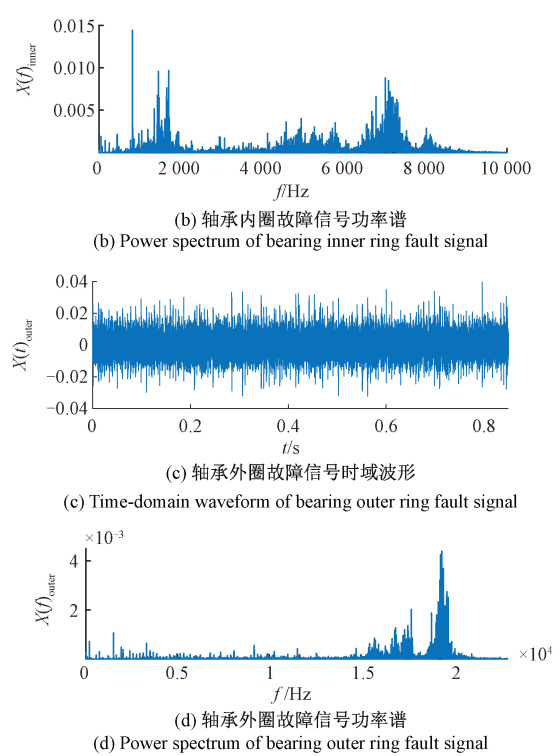
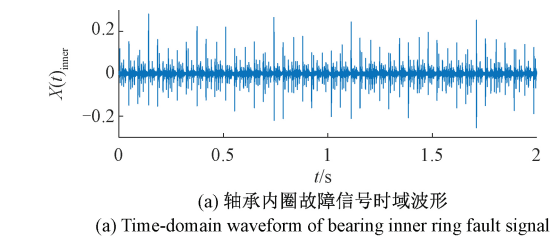
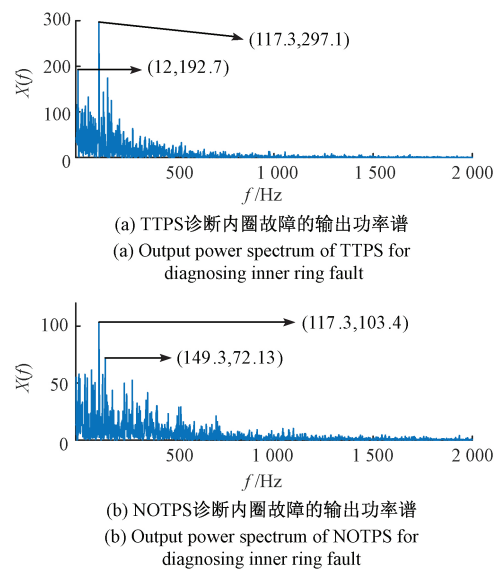


图 12 SKF 6206-2Z 轴承故障信号
Fig.12 Fault signals of bearing SKF 6206-2Z

同理,使用 GA 寻获的参数设置 TTPS 和 NOTPS 的系统参数,将 SKF 6206-2Z 轴承内外圈故障信号分别输入到 TTPS 和 NOTPS 中。图 13(a)、(c)所示分别为 TTPS 的诊断效果,图 13(b)、(d)所示为 NOTPS 的诊断效果。



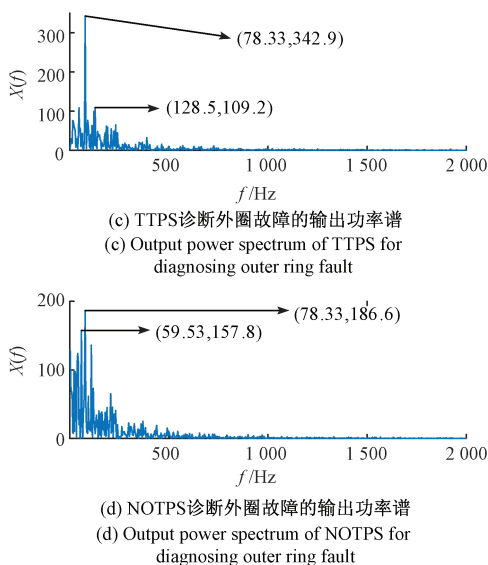


图 13 TTPS 与 NOTPS 诊断 SKF6206-2Z 轴承故障的效果对比

Fig.13 Effect comparison between TTPS and NOTPS in diagnosing the faults of bearing SKF6205-2RS

综合对比图 10、11 和 13 来分析 TTPS 和 NOTPS 对两种轴承内外圈故障的诊断效果,可见 TTPS 和 NOTPS 均能够检测出故障特征频率。从时域波形来看,输出信号的时域信号的周期性特征均得到了明显增强;从功率谱来看,原本广泛分布在功率谱中的噪声分量向故障特征频率处转移,故障特征频率的幅值均得到了显著提高。TTPS 和 NOTPS 能够利用噪声的能量来补充故障特征信号的能量,从而达到检测故障特征信号的目的。

然而相较于 NOTPS,本文所提出的 TTPS 更具优势。首先,TTPS 输出功率谱中故障特征频率的幅值更高。其次,TTPS 输出功率谱中故障特征频率在功率谱中更为突出,比较故障特征频率的幅值和其他频率分量幅值的差值,TTPS 输出功率谱中故障特征频率的幅值的领先度更高,在输出功率谱中更易识别,不会被其他幅值较高的频率分量所干扰。而在 NOTPS 的输出功率谱中,存在较多的噪声分量没有准确地转移到故障特征频率处,因此 NOTPS 对噪声的有效利用率没有 TTPS 高。综合可见,TTPS 诊断轴承故障的性能领先于 NOTPS。

图 14 所示为将 SKF 6206-2Z 轴承拆卸下来的检测图片,可见轴承内外圈确实存在故障。通过微弱周期信号检测实验以及 SKF6205-2RS 和 SKF 6206-2Z 两种轴承故障诊断的实验,结果证明了 TTPS 在检测微弱信号方面的有效性和先进性。

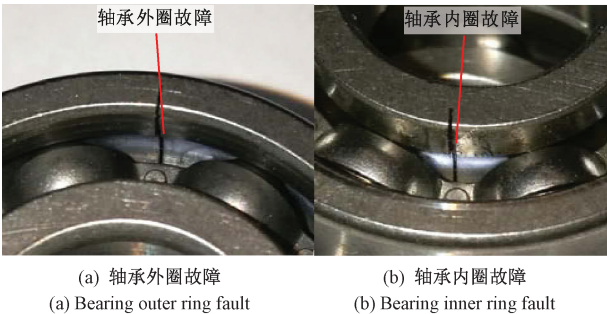


图 14 SKF 6206-2Z 轴承内外圈故障
Fig.14 Inner and outer ring faults of bearing SKF 6206-2Z

3 结 论

本文针对二维势场的 SR 问题,提出一种具有一般意义的 TTPS,研究在高斯白噪声和外部微弱驱动力共同作用下 TTPS 的 SR 机理和应用。根据线性响应理论,使用概率流方法推导 TTPS 对外部周期驱动力的输出 SAF。理论分析表明以 SAF 为衡量指标,TTPS 将发生 SR 现象,且 TTPS 的输出 SAF 与耦合系数 r 和非对称系数 c 成正比,而与驱动频率 ω_0 成反比。结合 Chambers-Malllowa-Stuck 算法与四阶龙格库塔法,利用 GA 的寻优参数进行数值模拟和轴承故障诊断实验。实验结果证明了理论分析的正确性,微弱信号检测实验以及两种轴承故障诊断实验表明,TTPS 能够有效地检测微弱周期信号和诊断轴承内外圈故障。对比 TTPS 和 NOTPS 的实验结果结果,发现在目标频率幅值、功率谱识别度和噪声利用率等方面,TTPS 均领先于 NOTPS,综合可见 TTPS 在微弱信号检测方面的有效性和先进性。

参考文献

[1] BENZI R, SUTERA A, VULPIANI A. The mechanism of stochastic resonance [J]. Journal of Physics A: Mathematical General, 1981, 14: 453-457.

[2] GAMMAITONI L, MARCHESONI F, MENICHELLA S E, et al. Stochastic resonance in bistable systems [J]. Physical Review Letters, 1989, 62: 349-352.

[3] 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.

[4] 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.
- [5] SINGH M, VERMA A, SHARMA N. An Optimized cascaded stochastic resonance for the enhancement of brain MRI [J]. IRBM, 2018, 39: 334-342.
- [6] BAI C Y. Time delay effects of stochastic resonance induced by multiplicative periodic signal in the gene transcriptional regulatory model [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 507: 304-311.
- [7] ZHANG L, LAI L, PENG H, et al. Stochastic and superharmonic stochastic resonances of a confined overdamped harmonic oscillator[J]. Physical Review E, 2018, 97, 012147.
- [8] EMANUEL M, MIGUEL R G, MANUEL C, et al. Coherence resonance and stochastic resonance in an excitable semiconductor superlattice[J]. Physical Review Letters, 2018, 121, 086805.
- [9] XIE M, FAN B X, HE X L, et al. Interference effect in optomechanical stochastic resonance[J]. Physical Review E, 2018, 98, 052202.
- [10] SHAO Z Z, YIN Z Z, SONG H L, 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, 086806.
- [11] ISHANT T, RICHA P, P PARMANANDA, et al. Intrinsic periodic and aperiodic stochastic resonance in an electrochemical cell[J]. Physical Review E, 2016, 94, 022210.
- [12] LU S L, HE Q B, WANG J. A review of stochastic resonance in rotating machine fault detection [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 116: 230-260.
- [13] QIAO Z J, LEI Y G, LI N P. Applications of stochastic resonance to machinery fault detection: A review and tutorial[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 122: 502-536.
- [14] LU S L, YAN R Q, LIU Y B, et al. Tacholless Speed estimation in order tracking: A review with application to rotating machine fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68: 2315-2332.
- [15] 贺利芳, 杨玉蕾, 张天骐. 时延反馈 EVG 系统随机共振特性研究及轴承故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 47-57.
- HE L F, YANG Y L, ZHANG T Q. Stochastic resonance characteristic study and bearing fault diagnosis of time-delayed feedback EVG system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 47-57.
- [16] 刘学, 孙翱, 李冬. 基于双树复小波的遥测振动信号多尺度噪声调节随机共振分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(20): 18-24.
- LIU X, SUN AO, LI D. Multi-scale noise tuning stochastic resonance analysis of telemetry vibration signal based on double tree complex wavelet [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(20): 18-24.
- [17] 刘进军, 冷永刚, 张雨阳, 等. 势函数特征参数调节随机共振及动车轴承故障检测研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 26-33, 41.
- LIU J J, LENG Y G, ZHANG Y Y, et al. Stochastic resonance with adjustable potential function characteristic parameters and its application in EMU bearing fault detection [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(13): 26-33, 41.
- [18] NICOLIS C. Stochastic resonance in multistable systems: The role of dimensionality[J]. Physical Review E, 2012, 86, 011133.
- [19] HU G, NICOLIS G, NICOLIS C. Periodically forced Fokker-Planck equation and stochastic resonance [J]. Physical Review A, 1990, 42: 2030-2041.
- [20] 皮骏, 马圣, 杜旭博, 等. 基于 BQGA-ELM 网络在滚动轴承故障诊断中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(18): 192-200.
- PI J, MA SH, DU X B, et al. Application of BQGA-ELM network in the fault diagnosis of rolling bearings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(18): 192-200.
- [21] 刘辉, 曾鹏飞, 巫乔顺, 等. 基于改进遗传算法的转炉炼钢过程数据特征选择[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 185-195.
- LIU H, ZENG P F, WU Q SH, et al. Feature selection of converter steelmaking process based on the improved

genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 185-195.

[22] CWRU. 12k drive end bearing fault data [EB/OL]. [2019-05-15]. <http://csegroups.case.edu/bearingdata-center/pages/download-data-file>.

作者简介



张刚,1999 年于西北工业大学获得学士学位,2004 年于重庆邮电大学获得硕士学位,2009 年于重庆大学获得博士学位,现为重庆邮电大学教授,主要研究方向为微弱信号检测与混沌保密通信。

E-mail: zhanggang@cqupt.edu.cn

Zhang Gang received his B.Sc. degree in 1999 from Northwestern Polytechnical University, received his M.Sc. degree in 2004 from Chongqing University of Posts and

Telecommunications and Ph.D. degree in 2009 from Chongqing University. Now, he is a professor in Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include weak signal detection and chaotic secure communication.



徐浩(通信作者),2018 年于重庆邮电大学获得学士学位,现为重庆邮电大学硕士研究生,主要研究方向为微弱信号检测。
E-mial: xh15823230543@163.com

Xu Hao (Corresponding author) received his B.Sc. degree in 2018 from Chongqing University of Posts and Telecommunications. Now, he is a M.Sc. candidate in Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interest includes weak signal detection.