

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307084

基于双输入信号驱动的耦合分段对称三稳随机共振的 轴承故障检测*

贺利芳 徐家琦 黄笑笑

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

摘要:为解决传统双输入信号驱动的二维三稳随机共振系统(two-dimensional tri-stable stochastic resonance system driven by dual-input signals, DTDTSR)所存在的输出饱和和信号放大差等问题,独创性地提出了一种全新的系统:双输入信号驱动的耦合分段对称三稳态随机共振系统(coupled piecewise symmetric tri-stable stochastic resonance system driven by dual-input signals, DCPSTSR)。首先深入研究系统输出饱和性的问题,为系统性能的优化提供了关键理论基础。其次,在绝热近似理论的框架下,推导了系统的输出谱放大函数(spectral amplification, SA)。详尽分析了系统参数对其的影响,为更深层次的理解提供了理论支持。进一步,通过数值模拟对 DCPSTSR、耦合分段对称三稳态随机共振系统(coupled piecewise symmetric tri-stable stochastic resonance system, CPSTSR)和 DTDTSR 系统进行了全面比较,结果明确指出 DCPSTSR 系统在输出谱放大函数方面显著优越于其他系统。最后,通过遗传算法对系统参数进行了精密优化,并将其成功应用于轴承故障检测。实验结果验证了 DCPSTSR 系统在性能上的卓越表现,为未来理论研究和工程应用提供了有力的理论支持和可行性验证。这一设计以及其在轴承故障检测方面的成功应用,为共振系统领域的进一步研究和实际应用提供了新的方向和范例,具有重要的科学和工程价值。

关键词: 轴承故障检测;随机共振;SA;DCPSTSR

中图分类号: TH 133.33; TN 911.23

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.40

Bearing fault detection based on coupled piecewise symmetric tri-stable stochastic resonance driven by dual-input signals

He Lifang Xu Jiaqi Huang Xiaoxiao

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

Abstract: In order to solve the problems of output saturation and signal amplification difference of the traditional two-dimensional tri-stable stochastic resonance system driven by dual-input signals (DTDTSR), a novel system, coupled piecewise symmetric tri-stable stochastic resonance system (coupled piecewise symmetric tri-stable stochastic resonance system) driven by dual-input signals, is ingeniously proposed. A novel system is proposed: coupled piecewise symmetric tri-stable stochastic resonance system driven by dual-input signals (DCPSTSR). Firstly, the problem of output saturation of the system is studied in depth, which provides a key theoretical foundation for the optimization of the system performance. Secondly, the output spectral amplification (SA) function of the system is derived within the framework of the adiabatic approximation theory. The influence of system parameters on it is analyzed in detail, which provides theoretical support for deeper understanding. Further, a comprehensive comparison of the DCPSTSR, coupled piecewise symmetric tri-stable stochastic resonance system (CPSTSR) and DTDTSR systems is carried out through numerical simulations, and the results clearly indicate that the DCPSTSR system is significantly superior to the other systems in terms of output spectral amplification function. Finally, the system parameters are precisely optimized by genetic algorithm and successfully applied to bearing fault detection. The experimental results verify the excellent performance of the DCPSTSR system and provide strong theoretical support and feasibility verification for future theoretical research and engineering applications. This design and its successful application in bearing fault detection provide a new direction and example for further research and practical application in the field of resonance systems, which has

收稿日期: 2023-11-27 Received Date: 2023-11-27

* 基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0235, cstc2021jcyj-msxmX0836)资助

important scientific and engineering value.

Keywords: bearing fault detection; stochastic resonance; SA; DCPSTSR

0 引言

随机共振(stochastic resonance, SR)于1981年由Benzi等首次提出,用于研究古气象冰川问题^[1]。与传统的信号处理方法不同,SR能够将噪声能量转化为有用的信号能量,并可以在很大程度上放大有用信号,从而提高输出信噪比^[2]。因此,在微弱信号的检测中采用SR方法^[3-5]。SR的特性也改变了人们对噪声的认识,也可以加以利用,引起了生物学^[6]、物理学^[7]、神经科学^[8]等领域学者的广泛关注。

Zhang等^[9]研究了一种新的耦合系统模型,将三稳系统与单稳系统通过线性耦合进行耦合,并研究了系统的SA。Xu等^[10]提出了欠阻尼三稳系统,并推导出了MFPT(mean first pass time),研究了稳态与粒子运动状态的关系。Zhao等^[11]研究了一个分段时延三稳系统,研究了势函数阱深和阱宽的变化,以及参数对SPD(steady state probability density)函数的影响。张刚等^[12]提出了一种欠阻尼指数型三稳随机共振系统,并且研究了不同的噪声下系统的输出。Li等^[13]为了解决经典双稳系统的饱和问题,提出了一种非饱和的多参数系统。该多参数系统可以有效地放大微弱信号,克服经典双稳系统的饱和性。Cui等^[14]研究了一种新的分段不对称双稳态随机共振体系,该体系通过不对称因子来调节其大小。该系统克服了输出饱和性,提高了输出信噪比。Ma等^[15]从轴承弱磁滑移信号的角度研究了SR系统的弱磁信号特征和固体噪声检测。李等提出了一种自适应算法来调整系统参数,从而提取弱磁信号的特征频率。贺利芳等^[16]提出了一种分段高斯势函数,用该势函数构造了一种改进的双稳势函数,对该系统在不同的噪声的条件下进行了研究。时等研究了一种高维SR系统。研究发现,在高维SR系统中,以输出信噪比作为目标函数,通过一种算法寻找合适的维数来进行最佳的轴承故障检测^[17]。Jiao等^[18]研究了一种用于超宽带微弱信号检测的自适应SR融合小波变换方法,该方法对系统参数进行优化,将噪声能量转化为超宽带信号能量,从而放大信号。时等研究了一种新的自适应多参数SR系统。分别使用粒子群算法、蚁群算法和甲虫触手搜索算法寻找最优参数,研究发现有必要使用自适应优化算法^[19]。Zhao等^[20]研究了一种不同于传统势函数的非饱和分段三稳SR系统。有效地解决了输出饱和问题,有效地放大了微弱信号。Zhang等^[21]研究了双输入驱动信号作为输入的耦合三稳SR系统,发现双输入信号比单输入驱动信号有优势。

前述分析表明分段三稳SR系统相对于连续系统更具有克服输出饱和的优越性,在耦合系统中,双输入相较于单输入更具有优势。为了综合利用上述系统的优势,本文提出了一种双输入信号驱动的耦合分段三稳SR系统,即DCPSTSR。第1节详细描述了DCPSTSR系统模型的设计,深入探讨了系统输出饱和问题。第2节推导出了系统的输出谱放大函数(SA),并深入研究了系统参数对它们的影响。第3节通过数值模拟验证了理论推导的准确性。第4节阐述了遗传算法的优化过程,并呈现了DCPSTSR系统检测信号的流程图。在第5节中,本文成功将DCPSTSR系统应用于轴承故障的检测。最后一部分涉及本文的结论和未来研究展望。通过全面探讨系统的优点,本研究不仅拓展了共振系统研究领域,同时为工程应用提供了前瞻性的理论支持,具有重要的科学和工程价值。

1 系统模型

1.1 DCPSTSR 系统模型

DTDTSR的朗之万方程可以表示为式(1):

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = -\frac{\partial V(y)}{\partial y} - m(y-x) + A_2 \cos(\omega_2 t) + \xi_{G_2}(t) \\ \frac{dx}{dt} = -\frac{\partial U_p(x)}{\partial x} + m(y-x) + A_1 \cos(\omega_1 t) + \xi_{G_1}(t) \end{cases}$$

$$U_p(x) = \frac{6x^2}{c^2 + d^2} - \frac{3x^4}{c^2 d^2} + \frac{2x^6}{c^2 d^2 (c^2 + d^2)}$$

$$V(y) = \frac{1}{2} q y^2 \quad (1)$$

其中, c, q, d, m 为系统参数。势函数有2个势垒点 x_4, x_5 和3个势阱点 x_1, x_2, x_3 。

$$x_3 = -x_1 = d, x_2 = 0$$

$$x_5 = -x_4 = c$$

DCPSTSR系统的朗之万方程可以表示为:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = -\frac{\partial V(y)}{\partial y} - r(y-x) + A_2 \cos(\omega_2 t) + \xi_{G_2}(t) \\ \frac{dx}{dt} = -\frac{\partial U_p(x)}{\partial x} + r(y-x) + A_1 \cos(\omega_1 t) + \xi_{G_1}(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\xi_{G_i}(t)$ 为高斯白噪声。噪声强度为 D ,满足 $\langle \xi_{G_i}(t) \rangle = 0$ 和 $\langle \xi_{G_i}(t) \xi_{G_j}(t - \tau) \rangle = 2D\delta_{ij}(t)$ 。 $V(y)$ 表示控制系统, $U_p(x)$ 表示被控系统, r 表示耦合系数。

$U_p(x)$ 和 $V(y)$ 分别为:

$$U_p(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}a\left(x + b + \frac{2hb^3 - 8hb}{a}\right)^2 + \frac{ahb^2(8 - b^2) - 4h^2b^2(b^2 - 4)^2}{2a} & x < -b \\ 4hx^2 - \frac{hx^4}{2} - b & -b \leq x \leq b \\ \frac{1}{2}a\left(x - b - \frac{2hb^3 - 8hb}{a}\right)^2 + \frac{ahb^2(8 - b^2) - 4h^2b^2(b^2 - 4)^2}{2a} & x > b \end{cases} \quad (3)$$

$$V(y) = \frac{1}{2}wy^2 \quad (4)$$

其中, a, b, h, w, r 为 DCPSTSR 系统的参数。并通过线性耦合形成 DCPSTSR 系统。图 1 为 DCPSTSR 系统模型。

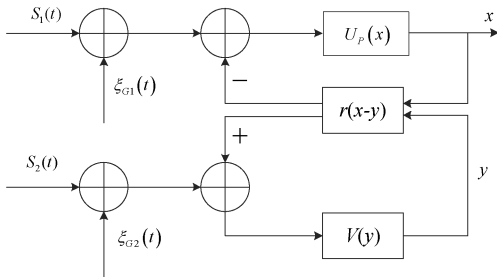


图 1 DCPSTSR 系统模型
Fig. 1 DCPSTSR system model

$U_p(x, y, t)$ 为 DCPSTSR 的等效势函数, 表示为:

$$\begin{cases} U_p(x, y) = U_p(x) + \left(\frac{w}{2} + \frac{r}{2}\right)y^2 + \frac{r}{2}x^2 - rxy \\ U_p(x, y, t) = U_p(x, y) - A\cos(\omega t)\lambda(x, y) \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta = \omega_2/\omega_1, \alpha = A_2/A_1, A = \sqrt{(A_1^2 + A_2^2)}/2,$$

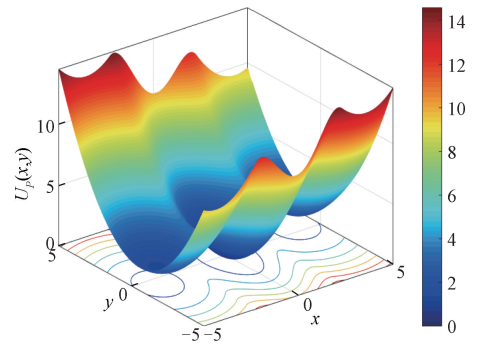
$$\lambda(x, y) = (x + \alpha y) \sqrt{2/(1 + \alpha^2)}, \omega = \sqrt{(\omega_1^2 + \omega_2^2)}/2} \quad (6)$$

在获得 DCPSTSR 系统等效势函数的表达式之后, 图 2 展示了该系统的三维视图和俯视图。

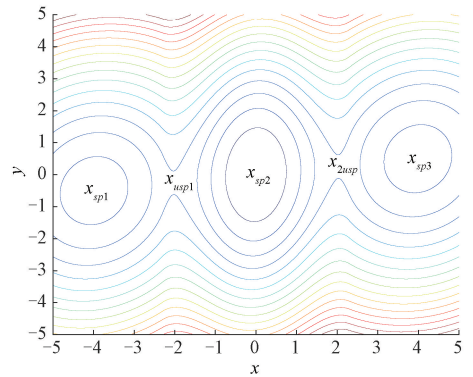
DCPSTSR 系统有 2 个势垒点 (x_{usp1}, y_{usp1}) 和 (x_{usp2}, y_{usp2}) , 3 个势阱点 (x_{sp1}, y_{sp1}) , (x_{sp2}, y_{sp2}) 和 (x_{sp3}, y_{sp3}) 。

$$u_{sp1} = (x_{sp1}, y_{sp1}) = \left(-\sqrt{\frac{(8h+r)(w+r)-r^2}{2h(w+r)}}, -\sqrt{\frac{(r+8h)(r+w)-r^2}{2h(r+w)}} \frac{r}{r+w} \right)$$

$$u_{sp2} = (x_{sp2}, y_{sp2}) = (0, 0)$$



(a) 等效势函数
(a) Equivalent potential function



(b) 俯视图
(b) Top view

图 2 DCPSTSR 系统等效势函数

Fig. 2 DCPSTSR system equivalent potential function

$$u_{sp3} = (x_{sp3}, y_{sp3}) = \left(\sqrt{\frac{(8h+r)(w+r)-r^2}{2h(w+r)}}, \sqrt{\frac{(8h+r)(w+r)-r^2}{2h(w+r)}} \frac{r}{w+r} \right)$$

$$u_{usp1} = (x_{usp1}, y_{usp1}) = \left(\frac{-(ab+2hb^3-8hb)(w+r)}{(a+r)(w+r)-r^2}, \frac{[-(ab+2hb^3-8hb)(r+w)]r}{[(r+a)(r+w)-r^2](r+w)} \right)$$

$$u_{usp2} = (x_{usp2}, y_{usp2}) = \left(\frac{(ab+2hb^3-8hb)(w+r)}{(a+r)(w+r)-r^2}, \frac{[(ab+2hb^3-8hb)(w+r)]r}{[(a+r)(w+r)-r^2](w+r)} \right) \quad (7)$$

1.2 饱和性分析

通过图 3 中 DTDTSR 和 CPSTSR 系统的对比, 结果表明 DCPSTSR 系统克服了输出饱和的缺点, 产生了更高的输出幅度。DTDTSR 系统的输出幅值变化缓慢且逐渐饱和, 而 CPSTSR 和 DCPSTSR 系统的输出幅值逐渐增加, DCPSTSR 系统的输出信号幅值较高且不饱和。

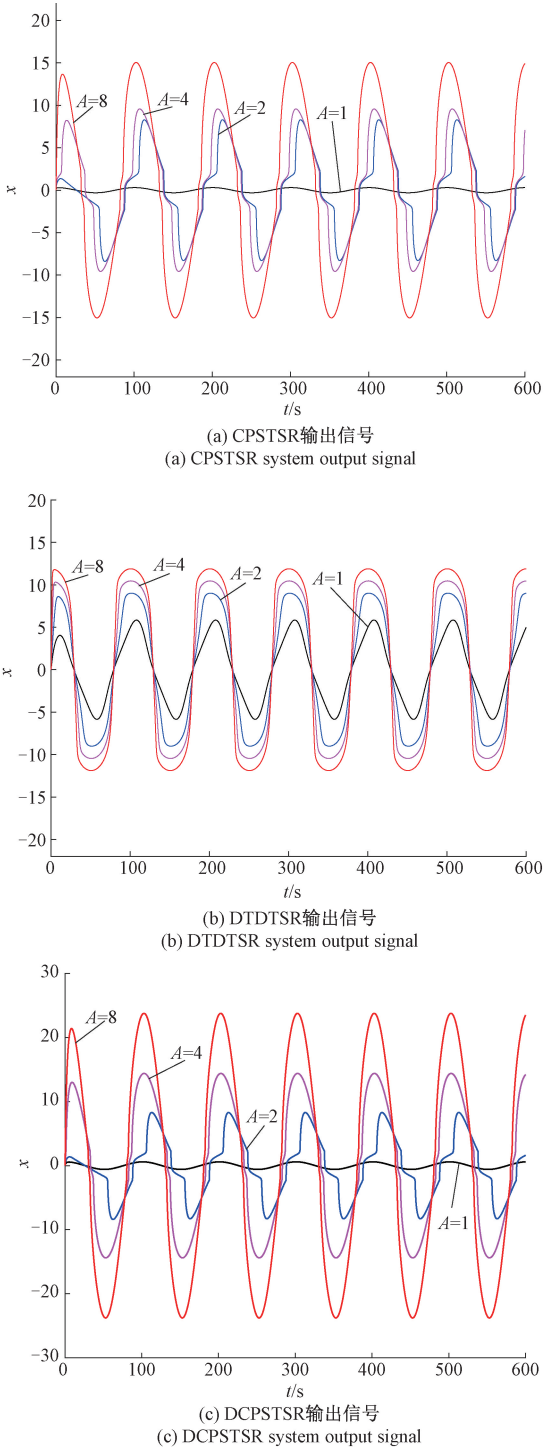


图3 系统的输出信号

Fig. 3 Output signals of the system

2 DCPSTSR 系统的 SA

其中式(2)可表示为:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = -\frac{\partial U_p(x,y,t)}{\partial y} + \xi_{G2}(t) \\ \frac{dx}{dt} = -\frac{\partial U_p(x,y,t)}{\partial x} + \xi_{G1}(t) \end{cases} \quad (8)$$

假设, $p_{s1}(t), p_{s2}(t), p_{s3}(t)$ 是布朗粒子在 3 个势阱中的驻留概率, 如下所示。求解为:

$$\frac{dP}{dt} = PR \quad (9)$$

矩阵 R 可计算为:

$$R = \begin{bmatrix} -R_{12}(t) & R_{21}(t) & 0 \\ R_{12}(t) & -[R_{21}(t) + R_{23}(t)] & R_{32}(t) \\ 0 & R_{23}(t) & -R_{32}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

布朗粒子的跃迁率^[22]可以表示为:

$$R_{ij} = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\lambda_{uspi}^-|}} \exp\left(-\frac{\Delta U_{ij}}{D}\right), \quad (11)$$

$$j = 1, 2; i = 1, 2, 3$$

其中, λ_{uspi}^- 和 λ_{uspi}^+ 是势垒的特征值, λ_{spj}^- 和 λ_{spj}^+ 是势阱的特征值。Hessian 矩阵可计算为:

$$H_x = \begin{bmatrix} P_x r \\ r - (r + w) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$P_x = \begin{cases} -a - r, & x = x_{sp1} \\ -8h + 6hx_{usp1}^2 - r, & x = x_{usp1} \\ -8h + 6hx_{sp2}^2 - r, & x = x_{sp2} \\ -8h + 6hx_{usp2}^2 - r, & x = x_{usp2} \\ -a - r, & x = x_{sp3} \end{cases} \quad (13)$$

3 个势阱点的特征值为:

$$\lambda_{spi}^\pm = \frac{P_x - (w + r) \pm [(w + r + P_x)^2 + 4r^2]^{1/2}}{2}, \quad (14)$$

$$x = x_{sp1}, x_{sp2}, x_{sp3}$$

2 个势垒点的特征值为:

$$\lambda_{upj}^\pm = \frac{P_x - (w + r) \pm [(w + r + P_x)^2 + 4r^2]^{1/2}}{2}, \quad (15)$$

$$x = x_{usp1}, x_{usp2}$$

加入驱动信号后, $R_{ij}(t)$ 可写成式(16):

$$R_{ij} = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\lambda_{uspi}^-|}} \exp\left(-\frac{\Delta U_{ij}}{D}\right), \quad (16)$$

$$j = 1, 2; i = 1, 2, 3$$

MFPT 越大, 粒子从一个势阱跃迁到另一个势阱更困难。由于对称性, 则 DCPSTSR 中 MFPT 的具体表达式^[23]如式(17)、(18)所示。

$$T_{ij}(t) = R_{ij}^{-1}(t) = 2\pi \sqrt{\frac{|\lambda_{uspj}^-|}{\lambda_{spi}^+ \lambda_{spi}^- \lambda_{uspj}^+}} \exp\left(\frac{\Delta U_{ij}}{D}\right), \quad (17)$$

$$j = 1, 2; i = 1, 2, 3$$

$$T_{12} = T_{32} = R_{12}^{-1}, T_{23} = T_{21} = R_{23}^{-1} \quad (18)$$

将式(16)进行一阶泰勒展开,可计算为:

$$R_{ij}(t) = R_{0ij} + AR_{0ij} \Delta \lambda_{ij} \cos(\omega t) / D, (A \ll 1) \quad (19)$$

其中, $\Delta \lambda_{ij}$ 表示 u_{spi} 和 u_{uspj} 的值之差。

式(10)的计算表示为:

$$P = A\Delta P + P_0 \quad (20)$$

将等式(20)代入等式(10)可得:

$$\frac{d\Delta P}{dt} = \Delta RP_0 \cos(\omega t) + R_0 \Delta P \quad (21)$$

其中, $\Delta P = [\Delta p_{s1}, \Delta p_{s2}, \Delta p_{s3}]^T$ 中表示对输入信号的响应。 $P_0 = [p_{s1}^0, p_{s2}^0, p_{s3}^0]^T$ 表示不添加外部驱动信号的稳态驻留概率。当 $t \rightarrow \infty$ 时, ΔP 可写成:

$$\Delta P = K \sin(\omega t) + N \cos(\omega t) \quad (22)$$

其中,由式(22)可知:

$$\begin{cases} \chi_j = A \sqrt{k_j^2 + n_j^2}, & j = 1, 2, 3 \\ \phi_j = \arctan(n_j/k_j) \end{cases} \quad (23)$$

其中, χ_i 和 ϕ_i 表示的振幅和相移。计算式(24):

$$\begin{cases} K = -\omega(R_0^2 + \omega^2 E)^{-1}(\Delta RP_0) \\ N = -R_0(R_0^2 + \omega^2 E)^{-1}(\Delta RP_0) \end{cases} \quad (24)$$

R_0 可以用特征值 λ_i 和特征向量 σ_i 表示,式(24)可以写成式(25):

$$\begin{cases} k_i = -\sum_{i=1}^3 \frac{\omega}{\lambda_i^2 + \omega^2} m_i \sigma_i \\ n_i = -\sum_{i=1}^3 \frac{\lambda_i}{\lambda_i^2 + \omega^2} m_i \sigma_i \end{cases} \quad (25)$$

其中, m_i 表示可拓系数,它来自于方程 $\Delta RP_0 = \sum_{i=1}^3 m_i \sigma_i$ 。

输入驱动信号后,系统的平均响应为:

$$\langle X(t) | x_0, y_0, t_0 \rangle = \iint xyP(x, y, t | x_0, y_0, t_0) dx dy \quad (26)$$

假设在初始时刻 t_0 收敛于,其中,式(26)可表示为:

$$\langle X(t)_{as} \rangle = \sum_{j=1}^3 S_j P_j^0 + S_j A [k_j \sin(\omega t) + n_j \cos(\omega t)] \quad (27)$$

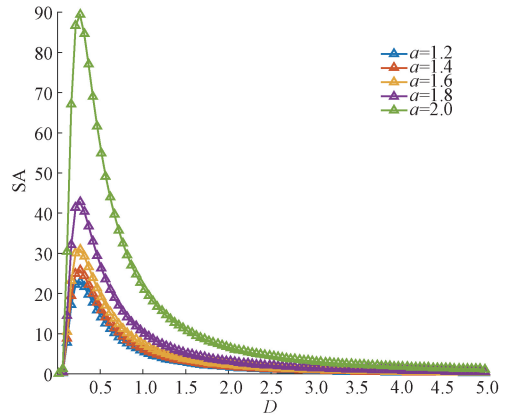
平均响应幅值计算为:

$$\begin{cases} \psi_1 = \arctan\left[\frac{(S_1 R_1 - S_2 R_2)}{(S_1 R_1 + S_2 R_2)} \tan\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right)\right] \\ T_1 = \sqrt{S_1^2 R_1^2 + S_2^2 R_2^2 + 2S_1 S_2 R_1 R_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)} \\ Q = \sqrt{T_1^2 + S_3^2 R_3^2 + 2T_1 S_3 R_3 \cos\left(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2} + \psi_1 - \phi_3\right)} \end{cases} \quad (28)$$

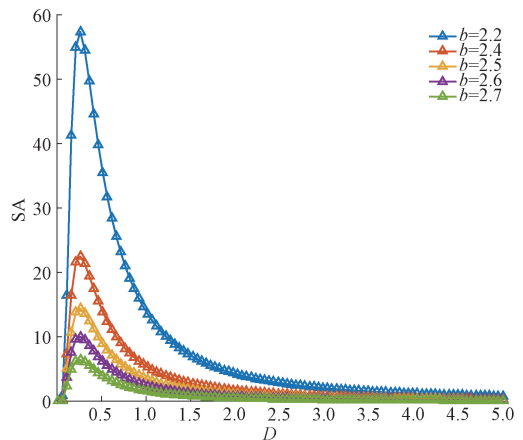
DCPSTR 系统的 SA 由式(29)确定,具体如下:

$$\eta = Q^2 / A^2 \quad (29)$$

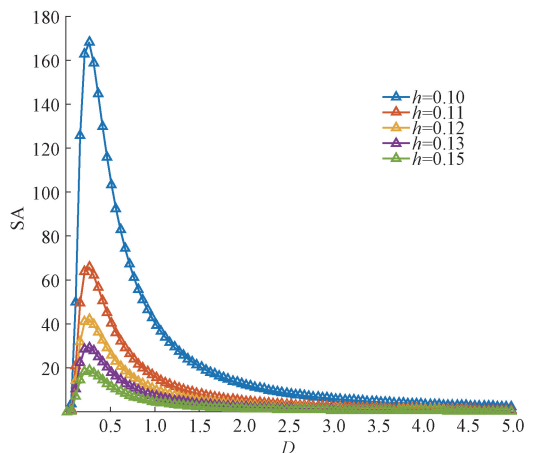
设 $\lambda = A_2/A_1$ 。在图 4 (a)中,随着 D 的增大,SA 呈现先增大后减小的趋势,出现一个峰值,这表明发生了 SR 现象。随着 a 的增加,SA 逐渐增大,因为两侧势阱的深度变浅,粒子容易向中间势阱跃迁,从而增强了共振效果。在图 4 (b)中,SA 随着 b 的增大而减小,说明它减弱了共振效应。在图 4 (c)中, h 的增加同样会导致 SA 的



(a) SA随a变化
(a) Variation of SA with a



(b) SA随b变化
(b) Variation of SA with b



(c) SA随h变化
(c) Variation of SA with h

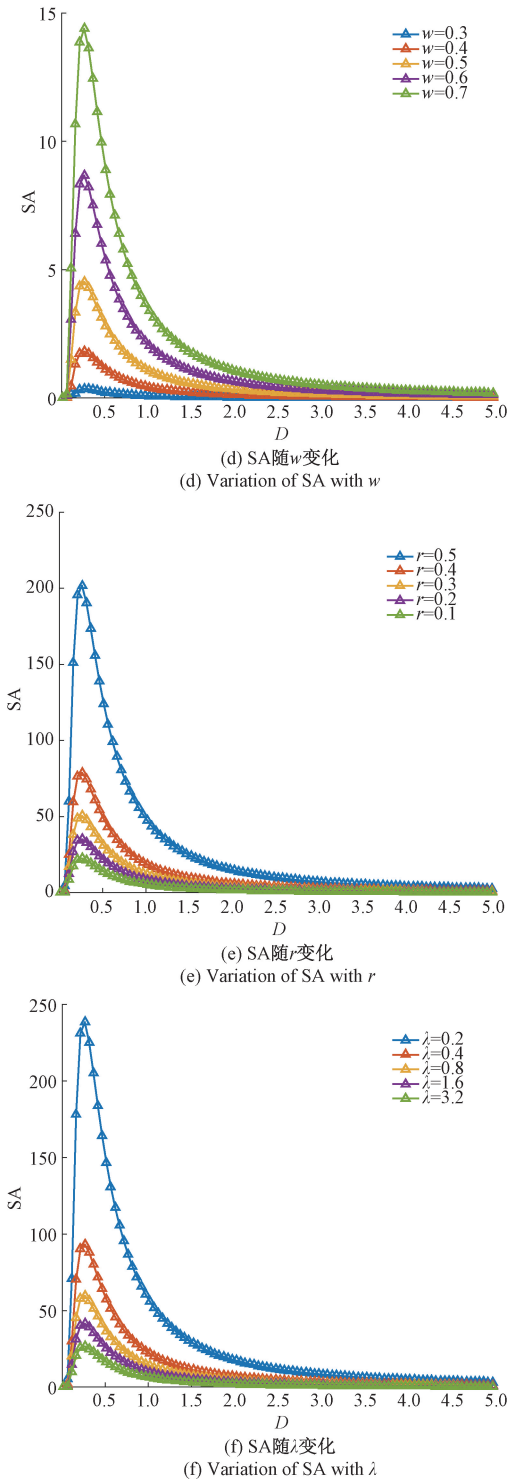


图 4 SA 随参数的变化

Fig. 4 SA variation with parameters

降低,说明更大的 h 对 SR 有抑制作用。在图 4 (d)中, w 的增加导致 SA 逐渐增加,说明更大的 w 也有利于共振效应。在图 4 (e)中,增大 r 会使 SA 逐渐增大,说明耦合系数越高,共振效果越强。在图 4 (f)中,SA 随着 λ 的增

大而减小。以上结果表明,合理地增大 a, w, r 或减小 b, h, λ 可获得最佳的 SR 效果。

3 数值模拟

为了验证 DCPSTSR 系统的优越性,将测试信号分别输入三种系统进行数值模拟。在本小节中,SA 被用作性能指标,因为 SA 也是 SR 系统中常见的性能度量指标。其中,测试信号由以下模型产生:

$$\begin{cases} s_1(t) = 0.02\cos(2\pi \times 0.01t) \\ s_2(t) = 0.01\cos(2\pi \times 0.01t) \end{cases} \quad (30)$$

如图 5 所示,DCPSTSR 系统的 SA 峰值最高,其次是 CPSTSR 和 DTDTSR 系统,说明 DCPSTSR 系统变换噪声放大信号的能力最强。总体而言,随着 D 的增加,3 种系统都产生了 SR 现象,而 DCPSTSR 系统的 SA 在所有系统中最高,说明 DCPSTSR 系统具有最好的信号增强能力和抗噪声能力。

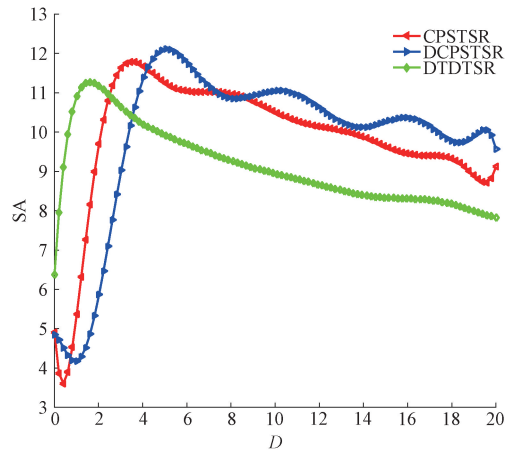


图 5 CPSTSR、DTDTSR 和 DCPSTSR 的 SA 比较

Fig. 5 Comparison of SA for CPSTSR, DTDTSR and DCPSTSR

4 遗传算法 (GA)

系统参数对本系统的 SA 影响很大而需要优化。因此,本文采用遗传算法^[24-25]进行工程应用中的参数优化。算法按以下顺序执行:

1) 参数被认为是基因,参数可以翻译成相应的染色体。待优化参数为 a, b, h, w, r , 目标函数选择 SA。SA 可计算为:

$$SA = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$

其中 μ_1 和 μ_2 表示输出和输入信号的功率谱。

2) 种群规模为 600, 突变概率为 0.3, 交叉概率为 0.4。

3) 选择。首先,根据步骤 1) 中的目标函数计算所有个体的适应度,后代将逐渐趋同,从而失去一定的多样性。个体是用轮盘赌选择的方法来选择。在每次选择之后,适应性最强的个体将存活下来。

4) 个体不断地杂交和变异。首先是跨界的过程。如果满足突变条件,执行步骤 5)。

5) 变异。可以根据突变的概率来确定个体是否发生了突变。

6) 重复上述过程,直到达到目标函数的最大迭代次数。从而得到了系统的最优参数,并将其引入到 SR 系统中。

根据上述算法步骤,DCPSTSR 系统提取弱信号的流程图如图 6 所示。

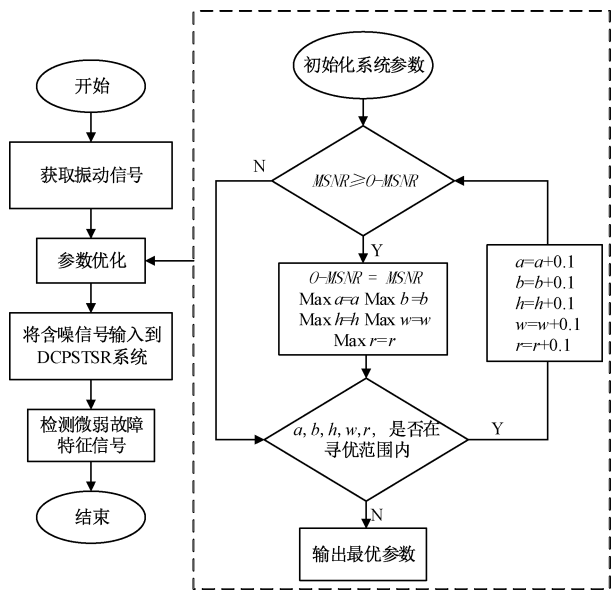


图 6 算法流程图
Fig. 6 Algorithm flow chart

5 轴承故障检测

轴承广泛应用于仪器仪表和机械,但长期磨损易导致设备故障,引发事故^[26]。因此,轴承早期故障诊断至关重要。本文利用 DCPSTSR 系统对不同类型的轴承故障进行应用,并采用经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 对信号进行预处理,共同检测了上述 3 种系统的故障信号。

5.1 6205-2RS JEM SKF 轴承故障检测

在本节的实验中,选择 6205-2RS SKF^[27] 轴承的内圈和外圈作为实验对象。轴承试验台数据来自美国西储大学 (CWRU)。轴承的参数如表 1 所示。

表 1 6205-2RS JEM SKF 轴承主要参数

Table 1 Main parameters of 6205-2RS JEM SKF bearing

参数	内圈直 径/mm	外圈直 径/mm	厚度/ mm	滚珠直径/ mm	滚珠 个数	节径/ mm
数值	25.001	51.999	15.001	7.940	9	39.040

为满足绝热近似条件,需对故障信号进行二次采样预处理,采样的样本内容为采样频率选取 $f_s = 12$ kHz,二次采样频率为 $f_{sr} = 5$ Hz,采样点数 $N = 10\ 000$,轴承转速为 $R = 1\ 797$ r/min。本文主要检测的轴承故障类型为滚动轴承的内圈和外圈故障信号,内外圈的故障频率可由式 (31) 给出:

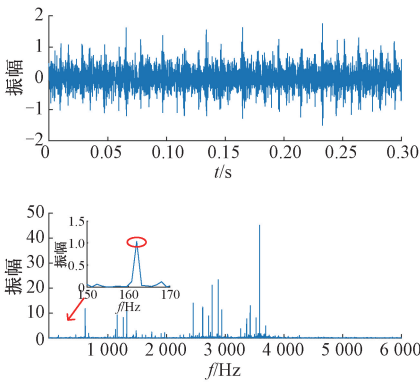
$$\begin{cases} f_{BPFI} = \frac{nf_r}{2} \left(1 + \frac{d}{D_1} \cos\alpha_0 \right) \\ f_{BPFO} = \frac{nf_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D_1} \cos\alpha_0 \right) \end{cases} \quad (31)$$

轴承的接触角 $\alpha_0 = 0$, 轴承旋转频率 $f_r = 29.9$ Hz。将数据代入式 (31), 可以计算出外圈故障频率 $f_{BPFO} = 107.6$ Hz, 内圈故障频率 $f_{BPFI} = 162.11$ Hz。

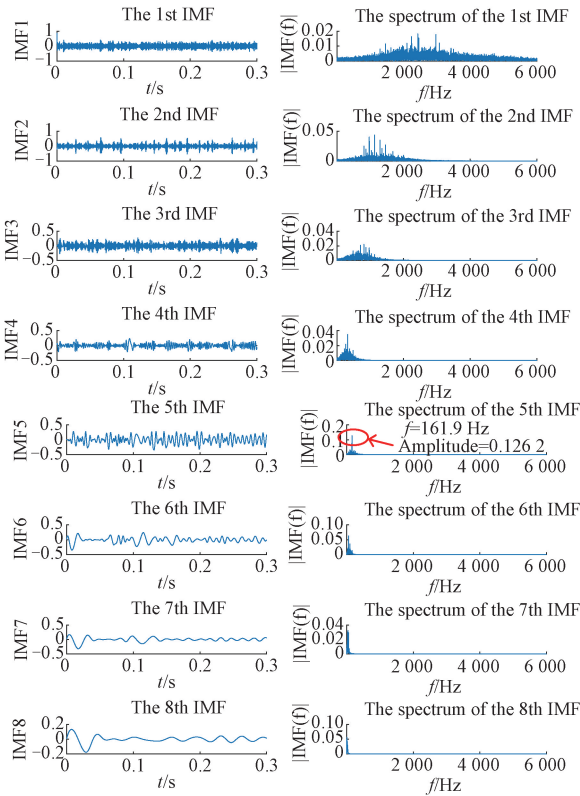
1) 内圈故障实例

图 7(a) 显示了来自轴承内圈的信号。与高频噪声相比,故障信号的幅值太小,低频信号被噪声淹没,难以识别。

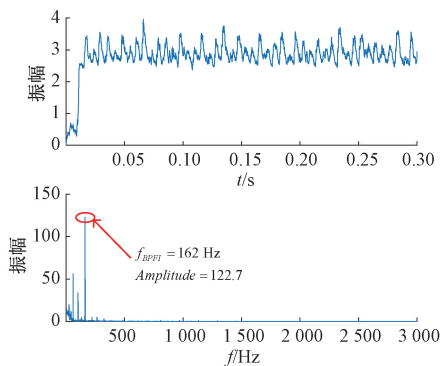
为了更好地检测故障信号,本文将传统的 EMD 信号检测方法与 SR 方法相结合,得到了更好的检测效果。该方法的关键是 EMD, 将一个复杂信号分解为有限个内禀模态函数 (IMF), 将所有 IMF 分量叠加得到原始信号。对内环故障信号进行分解,如图 7(b) 所示,随着 IMF 分量的增加,在第 5 个 IMF 处检测到特征频率,其幅值为 0.126 2, 识别清晰。对原始信号进行预处理后分别送入 CPSTSR、DTDTSR、DCPSTSR 系统。最优参数为: CPSTSR 系统 $h = 0.060\ 1$, $b = 2.312$, $a = 0.160\ 1$, $w = 0.601\ 1$, $r = 0.420\ 2$; DTDTSR 系统 $c = 10.047\ 3$, $d = 20.235\ 8$, $q = 1.520\ 9$, $m = 1.007\ 8$; DCPSTSR 系统 $h_1 = 0.071\ 2$, $b_1 = 2.385\ 1$, $a_1 = 0.165\ 7$, $w_1 = 0.658\ 5$, $r_1 = 0.428\ 8$ 。图 7(c)、(d)、(e) 展示了 3 个系统仅经 SR 处理后的输出信号,而图 7(f)、(g)、(h) 展示了经过 EMD 和 SR 处理后的输入信号的输出信号。3 种系统对输入信号进行 EMD 和 SR 处理后,故障频率处的峰值较未进行 EMD 处理时显著增加,从而提高了信号检测效果。仿真结果表明,DCPSTSR 系统表现出较好的检测效果,其中 DCPSTSR-EMD 系统的性能最佳,比 CPSTSR 系统提高了近 40 倍,比 DCPSTSR 系统提高了近 20 倍。这表明 DCPSTSR-EMD 系统具有更强的抗饱和能力和更优越的信号放大能力。



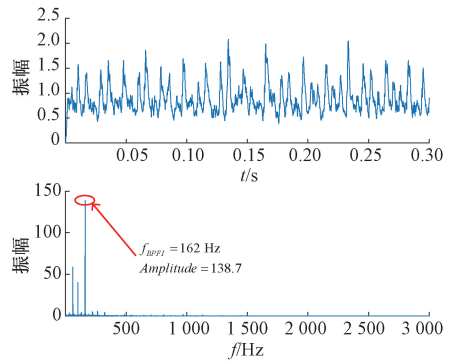
(a) 输入信号
(a) Input signal



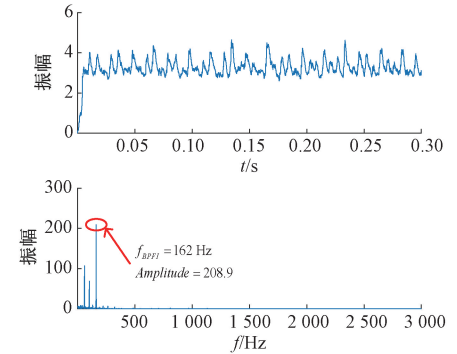
(b) 内圈故障信号的EMD过程
(b) The EMD process of inner ring fault signal



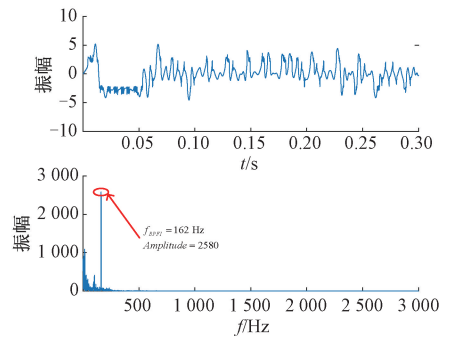
(c) CPSTSR系统输出
(c) CPSTSR system output



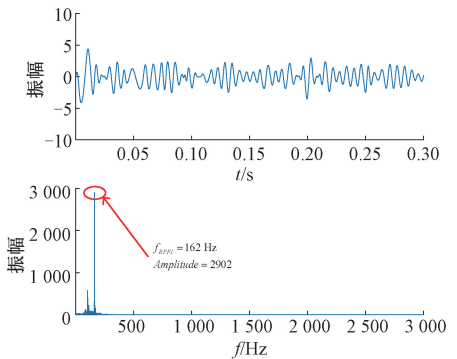
(d) DTDTSR系统输出
(d) DTDTSR system output



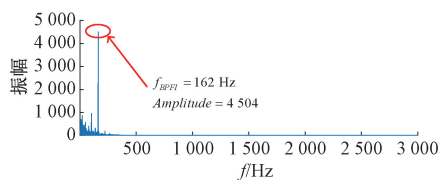
(e) DCPSTSR系统输出
(e) DCPSTSR system output



(f) CPSTSR-EMD系统输出
(f) CPSTSR-EMD system output



(g) DTDTSR-EMD系统输出
(g) DTDTSR-EMD system outputs



(h) DCPSTSR-EMD 系统输出
(h) DCPSTSR-EMD System Outputs

图 7 内圈故障检测

Fig. 7 Inner ring fault detection

2) 外圈故障实例

图 8 (a) 显示了来自轴承外圈的信号。外圈信号在故障频率处有一个小的峰值, 并且大部分被强噪声淹没, 导致无法识别故障信号。图 8 (b) 为 EMD 后外圈故障信号的结果, 从 IMF1 ~ IMF8, 在 IMF6 中检测到故障频率, 幅值为 0.359 8。外圈故障信号经预处理后输入系统。最优参数为: CPSTSR 系统 $h = 0.3215$, $b = 2.252$, $a = 0.6212$, $w = 0.0925$, $r = 0.5896$; DTDTSR 系统 $c = 5.0274$, $d = 8.2369$, $q = 0.5301$, $m = 0.1105$; DCPSTSR 系统 $h_1 = 0.4011$, $b_1 = 2.315$, $a_1 = 0.7021$, $w_1 = 0.1251$, $r_1 = 0.7021$ 。在图 8 中, 所有 6 个系统均展现出良好的检测结果, 故障频率处均呈现峰值。其中, DCPSTSR-EMD 系统表现最佳, 其故障频率峰值高达 70 920, 相较于其他系统有显著提高。DCPSTSR-EMD 系统在故障频率附近没有其他频率的峰值, 使得故障频率易于被识别。这表明 DCPSTSR-EMD 系统具备强大的抗干扰能力, 而其他系统在故障频率附近表现出较大的干扰, 说明它们的抗干扰能力相对较差。

5.2 LDK UER204 轴承故障检测

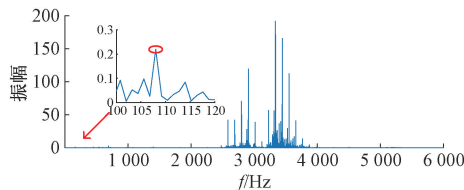
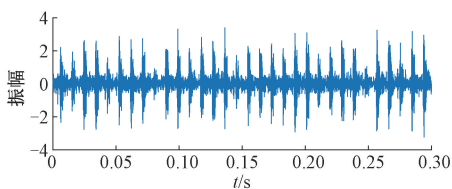
实验选用 LDK UER204 外圈轴承。轴承故障数据由西安交通大学提供^[28]。轴承的参数如表 2 所示。本小节轴承故障类型为外圈轴承故障信号, 且故障频率 $f = 107.91$ Hz, 样本内容为采样点 $N = 20\ 000$, 采样频率为 25.6 kHz, 二次采样频率 $f = 5$ Hz。

表 2 LDK UER204 轴承主要参数

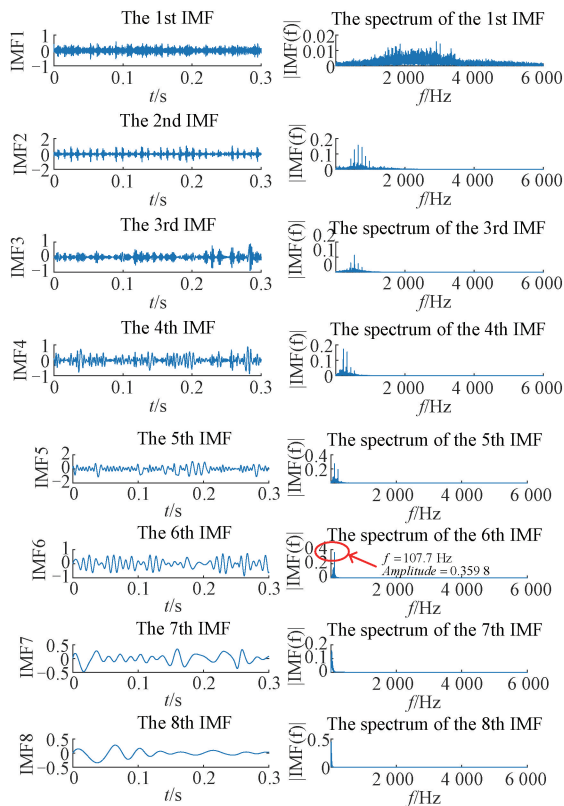
Table 2 Main parameters of LDK UER204 bearing

参数	内圈直 径/mm	外圈直 径/mm	轴承中 径/mm	滚珠直 径/mm	滚珠 个数	接触角/ (°)
数值	29.3	39.8	34.55	7.92	8	0

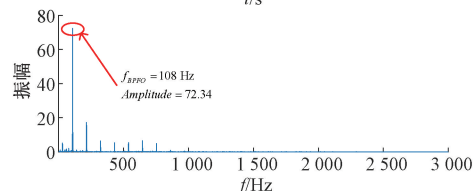
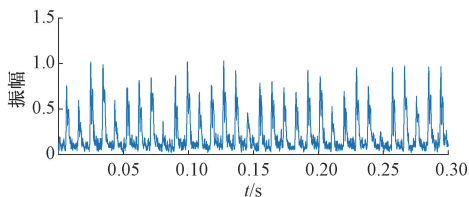
图 9 (a) 展示了原始轴承故障信号, 其中故障频率处的幅值相当小, 而噪声完全淹没了故障信号, 高频处的峰值则进一步干扰了故障信号的检测。在图 9 (b) 中, 通过 EMD 方法处理原始故障信号, 从 IMF1 ~ IMF8, 噪声逐渐减弱。在 IMF7 中, 故障频率检测到一个较小的值为 0.044 13。原始信号经过预处理后, 然后输入 SR 系统。最优参数为: CPSTSR 系统 $h = 0.0091$, $b = 2.625$, $a =$



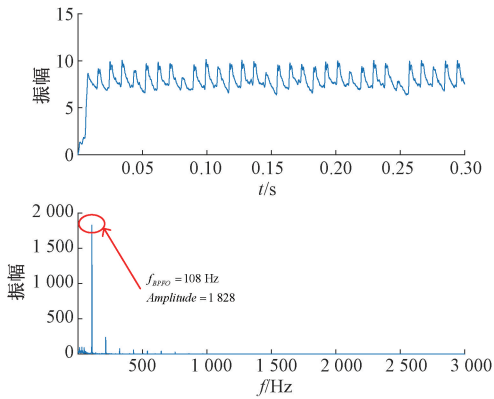
(a) 输入信号
(a) Input signal



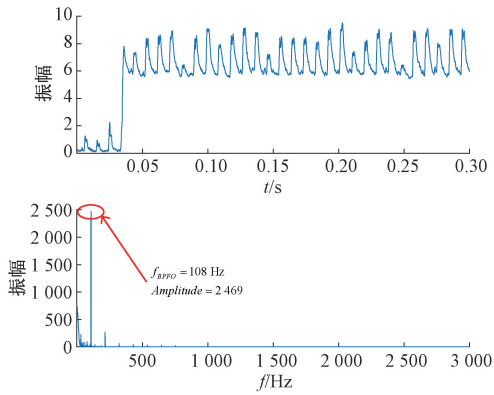
(b) 外圈故障信号的 EMD 过程
(b) The EMD process of outer ring fault signal



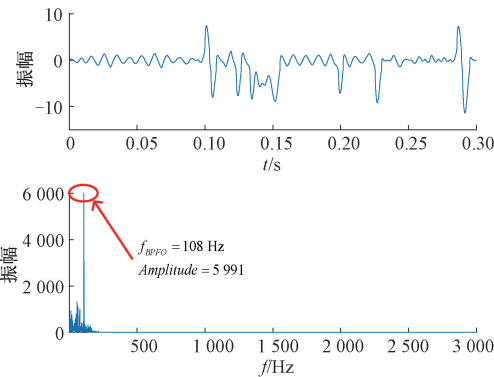
(c) CPSTSR 系统输出
(c) CPSTSR system output



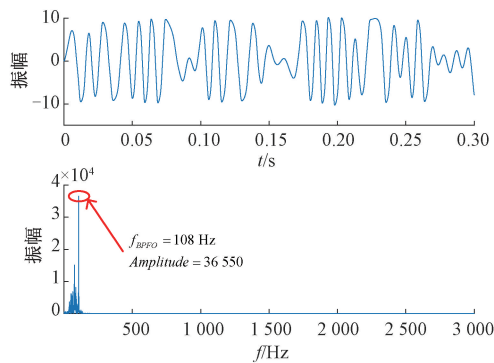
(d) DTDTSR系统输出
(d) DTDTSR system output



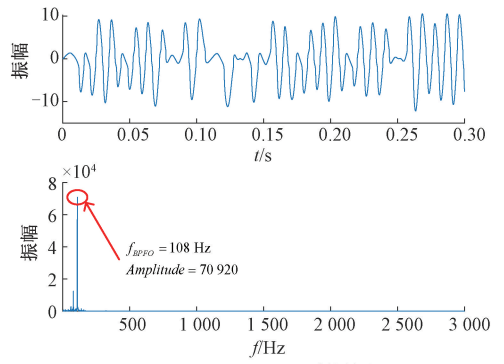
(e) DCPSTSR系统输出
(e) DCPSTSR system output



(f) CPSTSR-EMD系统输出
(f) CPSTSR-EMD system output



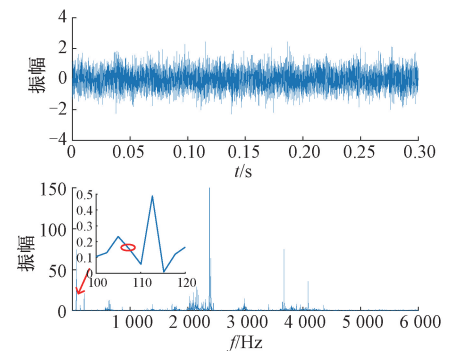
(g) DTDTSR-EMD系统输出
(g) DTDTSR-EMD system outputs



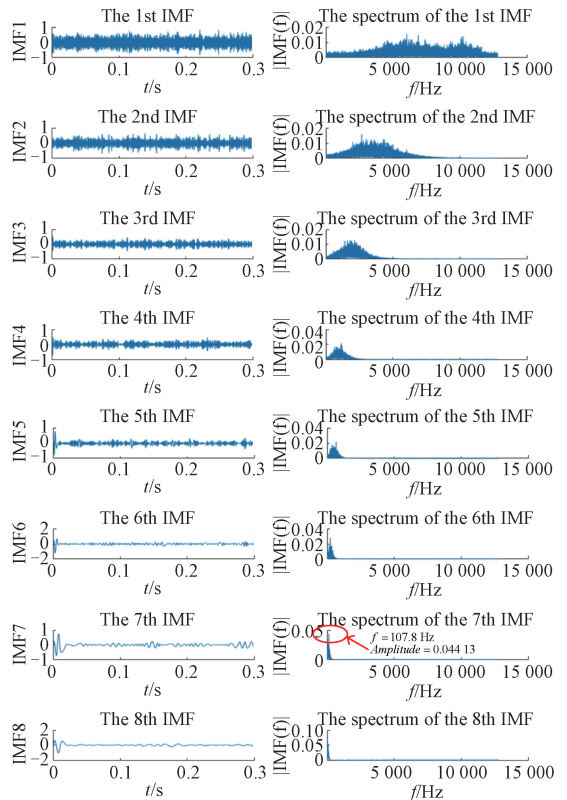
(h) DCPSTSR-EMD系统输出
(h) DCPSTSR-EMD System outputs

图8 外圈故障检测

Fig. 8 Outer ring fault detection



(a) Input signal



(b) LDK UER204轴承套圈故障信号的EMD处理过程
(b) The EMD process of LDK UER204 bearing fault signal

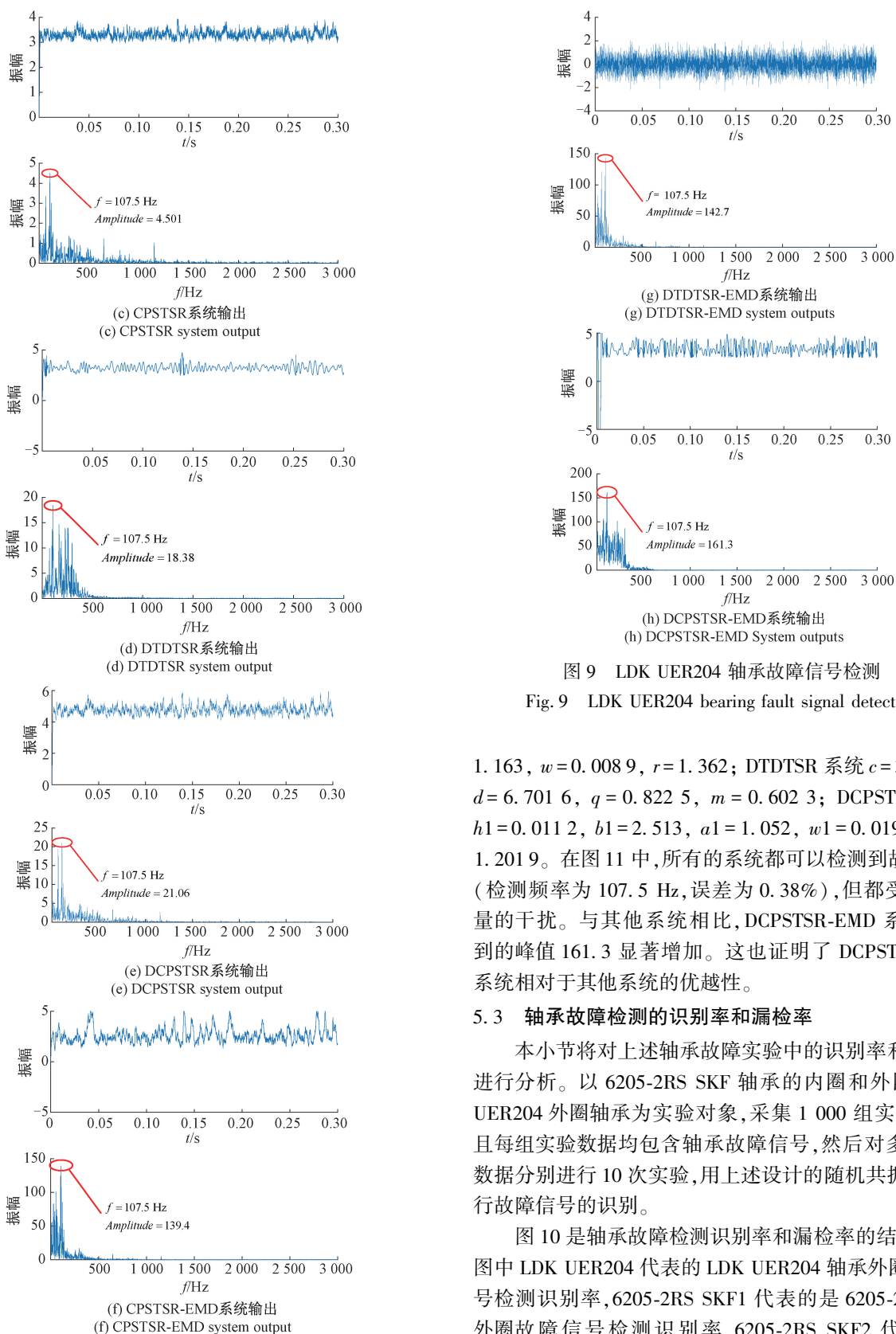


图 9 LDK UER204 轴承故障信号检测

Fig. 9 LDK UER204 bearing fault signal detection

1.163, $w=0.0089$, $r=1.362$; DTDTSR 系统 $c=3.8242$, $d=6.7016$, $q=0.8225$, $m=0.6023$; DCPSTSR 系统 $h_1=0.0112$, $b_1=2.513$, $a_1=1.052$, $w_1=0.0192$, $r_1=1.2019$ 。在图 11 中,所有的系统都可以检测到故障频率 (检测频率为 107.5 Hz, 误差为 0.38%), 但都受到了大量的干扰。与其他系统相比,DCPSTSR-EMD 系统检测到的峰值 161.3 显著增加。这也证明了 DCPSTSR-EMD 系统相对于其他系统的优越性。

5.3 轴承故障检测的识别率和漏检率

本小节将对上述轴承故障实验中的识别率和漏检率进行分析。以 6205-2RS SKF 轴承的内圈和外圈, LDK UER204 外圈轴承为实验对象,采集 1 000 组实验数据,且每组实验数据均包含轴承故障信号,然后对多组实验数据分别进行 10 次实验,用上述设计的随机共振系统进行故障信号的识别。

图 10 是轴承故障检测识别率和漏检率的结果分析,图中 LDK UER204 代表的 LDK UER204 轴承外圈故障信号检测识别率,6205-2RS SKF1 代表的是 6205-2RS SKF 外圈故障信号检测识别率,6205-2RS SKF2 代表的是

6205-2RS SKF 内圈故障信号检测识别率。通过实验发现,上述设计的随机共振系统均能有效的检测出轴承故障信号,且识别率较高,从而也验证了该系统的性能的稳定。

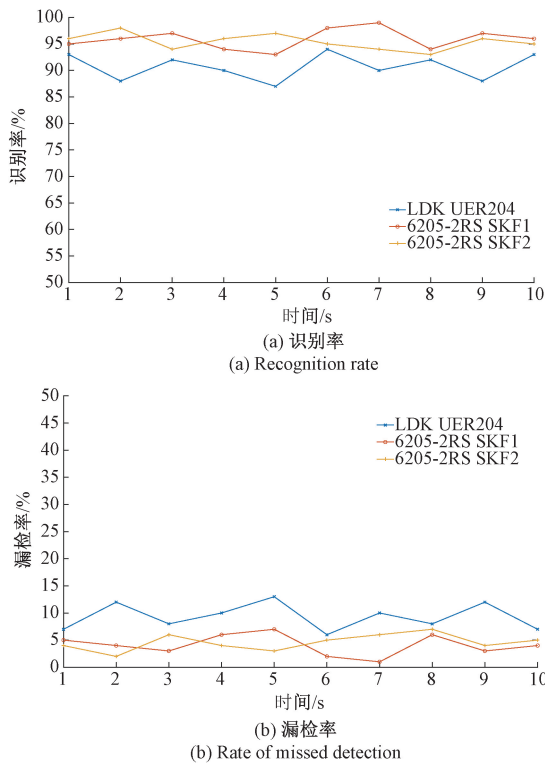


图 10 轴承故障识别结果

Fig. 10 Bearing fault recognition results

6 结 论

本文提出了 DCPSTSR 系统,并对其进行了深入研究和工程应用。首先,对势函数展开了研究;接着,对系统的输出饱和度进行了分析,推导了系统的 SA,并研究了系统参数对它们的影响。最后,将遗传算法与 EMD 相结合,将 DCPSTSR 系统应用于轴承故障检测,并与 CPSTSR 和 DTDTSR 进行了比较。综合研究结果,文章得到以下结论并展望了未来的研究方向。

1) 在保持其他参数不变的情况下,通过适当增大系统参数 a 、 w 、 r ,同时减小系统参数 b 、 h 、 λ 可以增强 DCPSTSR 系统的谐振性,从而提升系统的信号检测能力。

2) 采用遗传算法对 CPSTSR、DTDTSR 和 DCPSTSR 系统进行优化,并结合 EMD 进行故障信号检测。结果表明,耦合系统、双输入驱动信号和 EMD 都能有效地提高信号检测能力。

3) 采用遗传算法对 CPSTSR、DTDTSR 和 DCPSTSR

系统参数进行优化,并将其应用于轴承故障检测。DCPSTSR 系统能有效检测故障信号,且检测到的故障信号峰值高于 CPSTSR 和 DTDTSR。

4) 通过深入比较 CPSTSR、DTDTSR 和 DCPSTSR 系统检测到的故障信号峰值,并对故障信号进行 EMD 分解,分别得到 3 种系统检测到的故障信号峰值。结果表明,双输入驱动耦合系统的性能优于单输入驱动耦合系统,且结合 EMD 能更好地检测出故障信号,而且表现出更优越的性能。

上述发现为提升故障检测系统的效率和准确性提供了有力支持,拓展了在该领域的创新边界。

展望未来的研究方向,将致力于深入研究高维 SR 系统。下一步的计划是专注于具有高维耦合的 SR 系统,并提出那些具备更强信号放大能力的系统。这一研究方向有望为深入理解高维度系统的性能提供重要见解,并为设计更为强大的信号放大系统奠定基础。

参考文献

- [1] HE L F, LIU Q L, ZHANG T Q. Research and application of stochastic resonance in quad-stable potential system[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(7): 070503.
- [2] 李婧,韩鹏,朱莹.一种改进的随机共振技术在舰船轴频电场信号检测中的应用[J].国外电子测量技术, 2021, 40(4): 130-134.
LI J, HANG P, ZHU Y. An improved stochastic resonance technique for the detection of axial frequency electric field signals in ships [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(4): 130-134.
- [3] 王丽华,赵晓平,周子贤,等.基于自适应遗传随机共振的滚动轴承微弱故障诊断[J].现代电子技术, 2019, 42(20): 40-44.
WANG L H, ZHAO X P, ZHOU Z X, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on adaptive genetic stochastic resonance [J]. Modern Electronic Technology, 2019, 42(20): 40-44.
- [4] 唐立力,陈国彬.阱宽非对称性诱导随机共振的轴承故障诊断方法[J].科学技术工程, 2018, 18(14): 197-202.
TANG L L, CHEN G B. Bearing fault diagnosis method based on stochastic resonance induced by well width asymmetry [J]. Science and Technology Engineering, 2008, 18(14): 197-202.
- [5] 张刚,谭春林,贺利芳.二维非对称双稳随机共振系统及其在故障诊断中的应用[J].仪器仪表学报, 2021, 42(1): 228-236.
ZHANG G, TANG CH L, HE L F. Two-dimensional asymmetric bistable stochastic resonance systems and

- their application to fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 228-236.
- [6] 曲良辉, 都琳, 曹子露, 等. 化学自突触的电导扰动诱导相干或随机双共振现象 [J]. 物理学报, 2020, 69(23): 1-9.
- QU L H, DU L, CAO Z L. Conductance perturbation-induced coherent or stochastic double resonance phenomenon in chemical autosynapses [J]. Physics Letters, 2020, 69(23): 1-9.
- [7] 高子艺, 林昊晟, 钟奕, 等. 基于非线性双稳系统的混沌共振实验 [J]. 物理实验, 2022, 42(6): 1-7.
- GAO Z Y, LIN H SH, ZHONG Y. Chaotic resonance experiments based on nonlinear bistable systems [J]. Physical Experiment, 2022, 42(6): 1-7.
- [8] 吴竞, 乔清理, 金梦华. 基于随机共振的视网膜神经节细胞信号检测与传输的增强 [J]. 航天医学与医学工程, 2017, 30(5): 313-320.
- WU J, QIAO Q L, JING M H. Stochastic resonance-based enhancement of retinal ganglion cell signal detection and transmission [J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2017, 30(5): 313-320.
- [9] ZHANG G, XU H, ZHANG T. Method of rolling bearing fault detection based on two-dimensional tri-stable stochastic resonance system [J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2021, 9(1): 61-72.
- [10] XU P, JIN Y, ZHANG Y. Stochastic resonance in an underdamped triple-well potential system [J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 346: 352-362.
- [11] ZHAO S, SHI P, HAN D, et al. A novel piecewise tri-stable stochastic resonance system with time-delayed feedback and its application [J]. Chinese Journal of Physics, 2021, 73: 288-303.
- [12] 张刚, 毕璐洁, 蒋忠均. Levy 噪声下欠阻尼指数型三稳随机共振系统研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(1): 1-15.
- ZHANG G, BI L J, JIANG ZH J. Study of underdamped exponential tri-stable stochastic resonant system under Levy noise [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(1): 1-15.
- [13] Li M, SHI P, ZHANG W, et al. A novel underdamped continuous unsaturation bistable stochastic resonance method and its application [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2021, 151: 111228.
- [14] CUI L, XU W. A new piecewise nonlinear asymmetry bistable stochastic resonance model for weak fault extraction [J]. Machines, 2022, 10(5): 373.
- [15] MA J, LI C, ZHANG G. Adaptive stochastic resonance-based processing of weak magnetic slippage signals of bearings [J]. Entropy, 2022, 24(2): 147.
- [16] 贺利芳, 刘秋玲, 张刚. 高斯势分段双稳随机共振在不同噪声下的轴承故障诊断 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(3): 30-42.
- HE L F, LIU Q L, ZHANG G. Bearing fault diagnosis by Gaussian potential segmented bistable stochastic resonance under different noises [J]. Vibration and Shock, 2023, 42(3): 30-42.
- [17] LI M, SHI P, ZHANG W, et al. Stochastic resonance in a high-dimensional space coupled bistable system and its application [J]. Applied Mathematical Modelling, 2023, 113: 160-174.
- [18] JIAO S B, GAO R, ZHANG D, et al. A novel method for UWB weak signal detection based on stochastic resonance and wavelet transform [J]. Chinese Journal of Physics, 2022, 76: 79-93.
- [19] SHI P M, LI M D, ZHANG W Y. Weak signal enhancement for machinery fault diagnosis based on a novel adaptive multi-parameter unsaturated stochastic resonance [J]. Applied Acoustics, 2022, 189: 108609.
- [20] ZHAO S, SHI P M, HAN D Y. A novel mechanical fault signal feature extraction method based on unsaturated piecewise tri-stable stochastic resonance [J]. Measurement, 2021, 168: 108374.
- [21] ZHANG G, ZENG Y J, HE L F. Tri-stable stochastic resonance coupling system driven by dual-input signals and its application in bearing fault detection [J]. Physica Scripta, 2022, 97(4): 045202.
- [22] ZHANG G, ZENG Y J, ZHANG T Q. The characteristic analysis and application of a novel time-delay feedback piecewise tri-stable stochastic resonance system [J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2022, 10(3): 949-966.
- [23] 张刚, 徐浩, 张天骐. 二维四稳势系统随机共振机理研究与应用 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 229-238.
- ZHANG G, XU H, ZHANG T Q. Research on stochastic resonance mechanism of two-dimensional four-stable potential system with applications [J]. Journal of Instrumentation, 2020, 41(4): 229-238.
- [24] 张超, 何园园. 基于遗传算法的自适应随机共振与 VMD 分解的轴承故障诊断方法 [J]. 机械传动, 2018, 42(4): 156-163.
- ZHANG CH, HE Y Y. Adaptive stochastic resonance and VMD decomposition based on genetic algorithm for bearing fault diagnosis [J]. Mechanical Transmission, 2008, 42(4): 156-163.

- [25] 贺利芳,周熙程,张刚,等. Levy 噪声下新型势函数的随机共振特性分析及轴承故障检测[J]. 振动与冲击, 2019, 38(12): 53-62.
HE L F, ZHOU X C, ZHANG G, et al. Analysis of stochastic resonance characteristics of a new potential function under Levy noise and bearing fault detection [J]. *Vibration and Impact*, 2019, 38(12): 53-62.
- [26] 陈剑,徐庭亮,黄志,等. 基于声信号的滚动轴承故障诊断研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(21): 237-244.
CHEN J, XU T L, HUANG ZH, et al. Research on rolling bearing fault diagnosis based on acoustic signal [J]. *Vibration and Shock*, 2023, 42(21): 237-244.
- [27] 陆思良,苏云升,赵吉文,等. 基于二维互补随机共振的轴承故障诊断方法研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 7-12.
LU S L, SU Y SH, ZHAO J W, et al. Research on bearing fault diagnosis method based on two-dimensional complementary stochastic resonance [J]. *Vibration and Shock*, 2018, 37(4): 7-12.
- [28] 贺利芳,朱伟,张天骐. 分段非对称随机共振系统微弱信号检测[J]. 振动与冲击, 2022, 41(5): 114-122.
HE L F, ZHU W, ZHANG T Q. Detection of weak signals in segmented asymmetric stochastic resonant

systems [J]. *Vibration and Shock*, 2022, 41(5): 114-122.

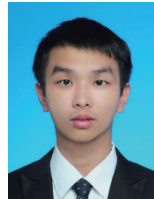
作者简介



贺利芳,2001年于西南交通大学获得学士学位,2004年于西南交通大学获得硕士学位,现为重庆邮电大学副教授,主要研究方向为微弱信号检测与混沌保密通信。

E-mail: helf@cqupt.edu.cn

He Lifang received the B. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2001 and the M. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2004. She is now an associate professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. Her main research interests include weak signal detection and chaotic secure communication.



徐家琦(通信作者),2021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-mail: 1833460048@qq.com

Xu Jiaqi (Corresponding author) received the B. Sc. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2021. He is now an M. Sc. candidate in Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interest includes weak signal detection.