

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.10.003

基于时延约束势随机共振的机械故障诊断方法研究*

李志星^{1,2}, 王光进², 鲍慧茹³

(1. 北京建筑大学 城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室, 北京 102612; 2. 内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010; 3. 包头职业技术学院, 内蒙古 包头 014030)

摘要: 在实际工作环境中, 机械设备的有用信号通常很微弱, 并会被淹没在强噪声中, 导致其故障特征很难被提取出来, 针对这一问题, 提出了一种基于时延约束势随机共振的机械故障信号检测方法。首先, 建立了时延约束势随机共振模型, 描述了其势函数的结构和功能特点, 从理论上推导了输出信噪比的数学表达式, 并研究了系统参数、时延长度和反馈强度对信噪比和噪声强度关系的影响; 然后, 利用蚁群算法的参数优化能力, 实现了随机共振系统的最佳匹配; 最后, 将提出的方法应用于仿真故障信号和实际滚动轴承的外圈故障信号的诊断实验中, 并将结果与双稳态随机共振方法获得的结果进行了对比。研究表明: 在故障频率为 60 Hz 和 143.08 Hz 时, 相比于经典的双稳态随机共振方法, 所提出的时延约束势随机共振方法具有更高的频谱峰值, 并且其受噪声干扰较小, 故障识别效果更明显; 该结果可以提高滚动轴承等机械设备的微弱故障诊断能力。

关键词: 机械故障诊断; 滚动轴承; 时延约束势; 随机共振; 信噪比

中图分类号: TH133.33; TH17 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4551(2021)10-1238-08

Mechanical fault diagnosis method based on time-delay constrained potential stochastic resonance

LI Zhi-xing^{1,2}, WANG Guang-jin², BAO Hui-ru³

(1. Beijing Key Laboratory of Performance Guarantee on Urban Rail Transit Vehicles, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China 102612; 2. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Inner Mongolia, Baotou 014010, China; 3. Baotou Vocational and Technical College, Inner Mongolia, Baotou 014030, China)

Abstract: Aiming at the problem that in the actual working environment of mechanical equipment, the useful signal was usually weak and submerged in strong noise, which made it difficult to extract the fault features, a mechanical fault signal detection method of time-delay constrained potential stochastic resonance was proposed. First of all, a time-delay constrained potential stochastic resonance model was established, the structure and functional characteristics of its potential function were described, the mathematical expression of the output signal-to-noise ratio was theoretically derived, and the influence of system parameters, time extension and feedback strength on the relationship between signal-to-noise ratio and noise intensity was investigated. Then, the optimal matching of the stochastic resonance system was achieved by using the parameter optimization capability of the ant colony algorithm. Finally, the proposed method was applied to the experiment of simulating the fault signal and the actual rolling bearing outer ring fault signal. The results are compared with those obtained by the bistable stochastic resonance method. The research results show that the proposed time-delay constrained potential stochastic resonance method has higher spectral peaks than the classical bistable stochastic resonance method at fault frequencies of 60 Hz and 143.08 Hz, and is less disturbed by noise. The fault identification effect is obvious, which improves the weak fault diagnosis capability of the rolling bearing and other mechanical equipment.

Key words: mechanical fault diagnosis; rolling bearing; time-delay constrained potential; stochastic resonance; signal-to-noise ratio

收稿日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51805275); 城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室开放课题资助项目(2020102)

作者简介: 李志星(1986-), 男, 河北衡水人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事机械设备早期故障诊断、噪声与振动信号处理以及汽车悬架减振方面的研究。E-mail: onyxlx@126.com

0 引言

随着科学技术的发展和工业应用的迫切需要,信号检测已经成为提取机械设备微弱故障信号的重要方式^[1,2]。目前,最常用的信号检测方法有奇异值分解^[3]、小波变换^[4,5]、整体经验模态分解^[6]等。这些方法主要通过抑制或去除噪声的方式,来实现对故障信号的检测。但是在去除噪声的同时,也导致了有用信号的损失,从而降低了检测精度。因此,传统的信号检测方法已经不能满足从强噪声环境中提取机械设备微弱故障信号的需要。

为了消除传统方法的这种不利影响,随机共振采用将噪声能量转换成信号能量的方法,提高了输出信噪比,进而有利于微弱信号的提取。意大利 BENZI R 等学者^[7]于1981年首次发现并提出了随机共振现象,以解释冰期周期性递归的问题。

最初,随机共振满足绝热近似理论,并受到小参数条件的限制^[8]。但是在实际的工程应用中,大多数信号都是大参数信号,这导致随机共振无法满足绝热近似理论。为了突破这一局限性,LENG Yong-gang 等人^[9]提出了一种二次采样的随机共振方法,实现了大参数信号向小参数信号的转变,从而满足了绝热近似理论的条件。LIN Min 等人^[10]研究了一种调制随机共振方法,将高频载波调制成低频信号,实现了大参数条件下,从强噪声中提取微弱故障信号的目的。

为了获得更好的信号检测效果,许多学者提出了一些新的方法来对随机共振进行更深入的研究。LEI Ya-guo 等人^[11]提出了一种自适应随机共振方法,利用蚁群算法的优化能力,实现了对行星齿轮箱的故障诊断。HE Qing-bo 等人^[12]提出了新的多尺度噪声调整方法,提高了旋转机械故障的识别能力,并用实际的振动信号对此进行了验证。时培明等人^[13]利用非线性耦合双稳态随机共振增强了故障特征信号,对实际的轴承故障进行了诊断。李志星^[14]研究了势模型对随机共振的影响,分析了新势模型的优越性,提高了新方法在微弱故障特征提取时的输出能力。

值得注意的是,上述研究都是以经典双稳态随机共振模型为基础的方法。经典随机共振是一个短记忆系统,时延和反馈因素常常被忽略。然而,时延和反馈因素对系统输出信噪比有很大影响。目前,已有学者对时延反馈理论做了一些研究,他们发现时延反馈随机共振可以提高微弱信号的检测效果。LU Si-liang 等人^[15]提出了一种时延反馈随机共振的信号提取方法,并将其用于旋转机械的故障诊断。ZHOU Bing-chang

等人^[16]研究了一种三分频噪声驱动的时滞双稳态系统中的随机共振现象。SHAO Rui-hua 等人^[17]研究了弱周期信号驱动的时滞双稳态系统的随机共振性能。韩松久^[18]则进一步研究了时延三稳态和周期势随机共振,并在轴承故障诊断中取得了较好的效果。

因此,有必要对随机共振势模型进行优化,进一步研究时延和反馈因素对输出信噪比的影响^[19]。为此,本文提出一种时延约束势双稳态随机共振方法,并通过理论分析、仿真和实验的方法进行研究。

1 时延约束势随机共振方法

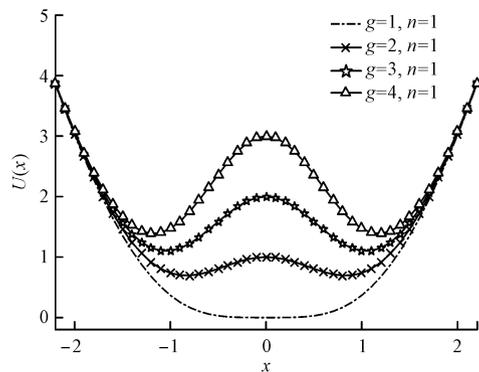
1.1 时延约束势随机共振势模型

为了增强经典双稳态随机共振的系统性能,本文提出了一种时延约束势的双稳态势模型,其势函数方程如下所示:

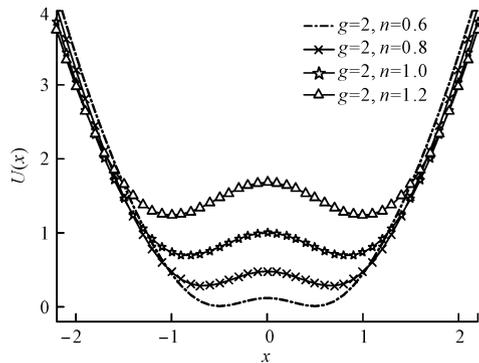
$$U(x) = x^2 - n + gn^2 \exp\left(-\frac{x^2}{n^2}\right) \quad (1)$$

式中: g, n —系统参数,且两者都为正实数。

时延约束势双稳态随机共振的势函数,如图1所示。



(a) 固定 n 的值,单独调节 g 的值



(b) g 值不变时,调节 n 的值

图1 时延约束势双稳态势函数

由图1(a)可知:固定 n 的值,单独调节 g 的值可以改变势垒的高度,随着 g 的增大势垒高度逐渐变大;

在图 1(b)中,当 g 值不变时,调节 n 的值可以改变势阱宽度和势垒高度,即随着 n 的增大,势阱宽度和势垒高度也逐渐增大(然而对于经典双稳态势函数,其势结构是由参数 a 、 b 共同确定,无法通过调节参数来改变某个势特征的同时,保持其他特征不变)。

综上所述可知:时延约束势双稳态势函数可以通过参数的变化,实现势垒高度和势阱宽度的独立调节,使粒子由单稳态势阱运动变为双稳态势阱间运动,完成单势阱和双势阱之间的转换,具有更好的输出效果。

为了不失一般性,本文取 $a=1$, $b=1$, $\varphi=0$ 来进行简化计算。

在经典随机共振公式中加入时延和反馈因子,则方程写为^[20]:

$$\frac{dx(t)}{dt} = x - x^3 + \beta x(t - \tau) + A \cos(\Omega t) + \eta(t) \quad (2)$$

式中: β —反馈强度; τ —时延长度。

本文引入时延约束势双稳态随机共振系统,将式(1)代入式(2),可得:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -2x + 2gx \exp\left(-\frac{x^2}{n^2}\right) + \beta x(t - \tau) + A \cos(\Omega t) + \eta(t) \quad (3)$$

式(3)是一个非马尔科夫过程,利用概率密度法可化为马尔科夫过程。

近似时延 Fokker-Planck 方程如下^[21]:

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial [h_\theta P(x, t)]}{\partial x} + D \frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial x^2} \quad (4)$$

式中: h_θ —条件平均漂移。

h_θ 可表示为:

$$h_\theta = \int_{-\infty}^{+\infty} dx_\tau h(x, x_\tau) P(x_\tau, t - \tau | x, t) \quad (5)$$

其中: $x_\tau = x(t - \tau)$ 。

则有:

$$h(x, x_\tau) = -2x + 2gx \exp\left(-\frac{x^2}{n^2}\right) + \beta x_\tau + A \cos(\Omega t) \quad (6)$$

进而可得:

$$h(x) = -2x + 2gx \exp\left(-\frac{x^2}{n^2}\right) + \beta x + A \cos(\Omega t) \quad (7)$$

另外, $P(x_\tau, t - \tau | x, t)$ 代表零阶近似马尔科夫链转移概率密度,其方程满足^[22]:

$$P(x_\tau, t - \tau | x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D\tau}} \exp\left(-\frac{(x_\tau - x - h(x)\tau)^2}{4D\tau}\right) \quad (8)$$

将式(8)代入式(5),通过推导可得出:

$$h_\theta = (1 + \beta\tau) \left(-2x + 2gx \exp\left(-\frac{x^2}{n^2}\right) \right) + \beta(1 + \beta\tau)x + (1 + \beta\tau)A \cos(\Omega t) \quad (9)$$

进一步可推导出等效朗之万方程的表达式:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -2x + 2gx \exp\left(-\frac{x^2}{n^2}\right) + \beta x + A \cos(\Omega t) + \beta\tau \left[-2x + 2gx \exp\left(-\frac{x^2}{n^2}\right) + \beta x + A \cos(\Omega t) \right] + \eta(t) \quad (10)$$

由式(10)和式(3)比较可知,时延反馈随机共振系统中出现了一耦合项。

在不考虑周期信号的情况下,式(10)的等效时延势函数可导出为^[23]:

$$U_\theta(x) = (1 + \beta\tau) \left(x^2 - n + gn^2 \exp\left(-\frac{x^2}{n^2}\right) \right) - \frac{1}{2}\beta(1 + \beta\tau)x^2 \quad (11)$$

由式(10)可以计算出系统在 $(2 - \beta) < 2g$ 时的不稳定点 $x_0 = 0$, 和两个稳定点 $x_\pm = \pm \sqrt{-n^2 \ln\left(\frac{(2 - \beta)}{2g}\right)}$ 。

然后,式(10)的粒子在两个势阱之间的跃迁率可推导为^[24]:

$$\gamma_\pm = \frac{(1 + \beta\tau) \sqrt{(2 - \beta)(2 - 2g - \beta) \ln\left(\frac{(2 - \beta)}{2g}\right)}}{\sqrt{2}\pi} \times \exp\left[-\frac{(1 + \beta\tau) \left[2gn^2 + n^2(2 - \beta) \left(\ln\left(\frac{(2 - \beta)}{2g}\right) - 1 \right) \right]}{2D} \right] \times \exp\left[\pm \frac{(1 + \beta\tau) \sqrt{-n^2 \ln\left(\frac{(2 - \beta)}{2g}\right)} A \cos(\Omega t)}{D} \right] \quad (12)$$

式中: γ_+ , γ_- —粒子从左边到右边势阱的跃迁率,反之亦然。

在小参数限制的条件下,方程(12)可近似为:

$$\tilde{\gamma}_\pm = \frac{(1 + \beta\tau) \sqrt{(2 - \beta)(2 - 2g - \beta) \ln\left(\frac{(2 - \beta)}{2g}\right)}}{\sqrt{2}\pi} \times \exp\left[-\frac{(1 + \beta\tau) \left[2gn^2 + n^2(2 - \beta) \left(\ln\left(\frac{(2 - \beta)}{2g}\right) - 1 \right) \right]}{2D} \right] \quad (13)$$

接下来,系统的输出功率谱密度函数可以表示为^[25]:

$$S(\omega) = S_1(\omega) + S_2(\omega) = \frac{\pi x_\pm^2 M^2}{2(N^2 + \Omega^2)} [\delta(\Omega - \omega) +$$

$$\delta(\Omega + \omega)] + \left[1 - \frac{M^2}{2(N^2 + \Omega^2)} \right] \frac{2x_{\pm}^2 N}{N^2 + \omega^2} \quad (14)$$

式中: $S_1(\omega), S_2(\omega)$ —信号和噪声的输出功率谱。

N 和 M 的表达式书写如下:

$$N = \tilde{\gamma}_+ + \tilde{\gamma}_- =$$

$$\frac{\sqrt{2}(1 + \beta\tau) \sqrt{(2 - \beta)(2 - 2g - \beta) \ln\left(\frac{(2 - \beta)}{2g}\right)}}{\pi} \times \exp\left[-\frac{(1 + \beta\tau) \left[2gn^2 + n^2(2 - \beta) \left(\ln\left(\frac{(2 - \beta)}{2g}\right) - 1 \right) \right]}{2D} \right] \quad (15)$$

$$M = \frac{A}{D} (1 + \beta\tau) |x_{\pm}| N \quad (16)$$

因为 $A \ll 1$, 频率 $\Omega, S(\omega)$ 只能取正值, 式(14)变为:

$$S_1(\omega) = \frac{\pi x_{\pm}^2 M^2}{2(N^2 + \Omega^2)} [\delta(\Omega - \omega)] \quad (17)$$

$$S_2(\omega) = \frac{2x_{\pm}^2 N}{N^2 + \omega^2} \quad (18)$$

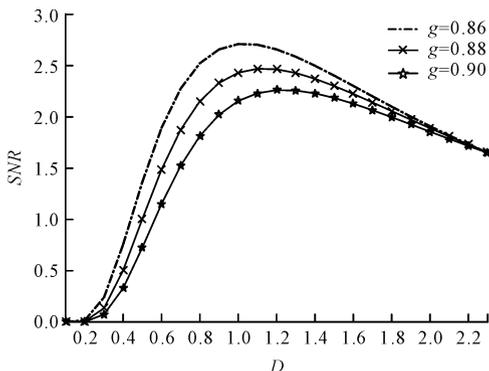
随即, 系统的输出信噪比可以表达为:

$$SNR = \frac{\int_0^{\infty} S_1(\omega) d\omega}{S_2(\omega = \Omega)} \quad (19)$$

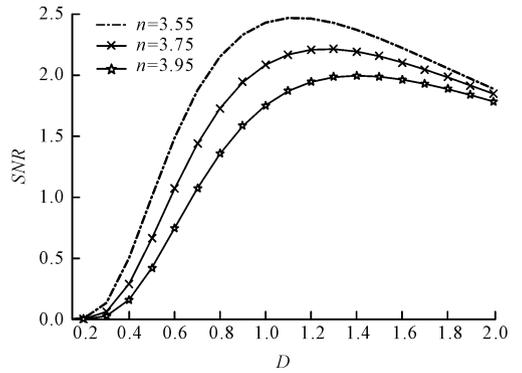
把式(17,18)代入式(19), 输出信噪比最终可以写为:

$$SNR = \frac{\sqrt{2}x_{\pm}^2 A^2 (1 + \beta\tau)^3 \sqrt{(2 - \beta)(2 - 2g - \beta) \ln\left(\frac{(2 - \beta)}{2g}\right)}}{4D^2} \times \exp\left[-\frac{(1 + \beta\tau) \left[2gn^2 + n^2(2 - \beta) \left(\ln\left(\frac{(2 - \beta)}{2g}\right) - 1 \right) \right]}{2D} \right] \quad (20)$$

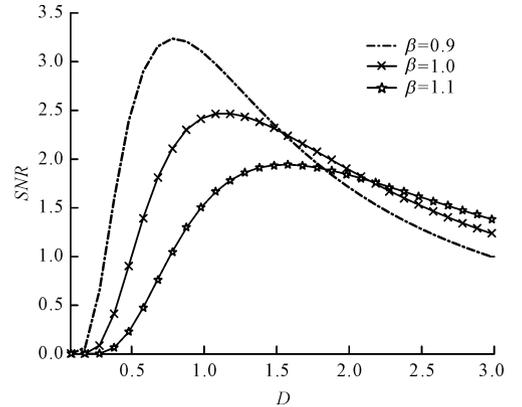
由式(20)可知, 信噪比的大小受到不同参数的影响。输出 SNR 与噪声强度 D 的关系曲线, 如图 2 所示。



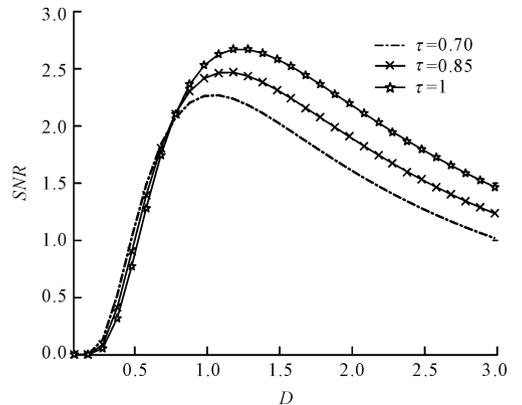
(a) 当 $n=3.55, \beta=1, \tau=0.85, A=1.5$ 时, 信噪比随 g 的变化



(b) 当 $g=0.88, \beta=1, \tau=0.85, A=1.5$ 时, 信噪比随 n 的变化



(c) 当 $g=0.88, n=3.55, \tau=0.85, A=1.5$ 时, 信噪比随 β 的变化



(d) 当 $g=0.88, n=3.55, \beta=1, A=1.5$ 时, 信噪比随 τ 的变化

图 2 不同参数下信噪比和噪声强度的关系

其曲线变化趋势为: SNR 随着噪声的增加而增大, 达到最大值后再减小, 符合随机共振规律。

从图 2(a, b) 可知, 输出 SNR 的峰值随着参数 g 和参数 n 的增大而减小, 并且向右移动;

从图 2(c) 可知, 随着反馈强度 β 的增加, 输出信噪比变小, 粒子从一个势阱跃迁到另一势阱所需要的能量增加, 使得 SR 的效果不明显;

从图 2(d) 可知, 随着时延长度 τ 的增加, 输出信噪比变大, 粒子很容易通过势垒的阻挡, 实现势阱之间的跃迁, 并且 SR 的效果明显。

1.2 时延约束势随机共振的微弱信号检测方法

在实际应用中, 噪声力和周期力通常是固定的, 因

此,随机共振的信号检测效果主要受到势阱力的作用,而势阱力大小主要体现在势参数的变化。通过上节内容可知,信噪比输出与噪声强度的关系受到不同参数的影响,当时延参数、反馈参数、势参数合理匹配时,其共振效果将达到最佳。

为了处理不符合小参数条件的工程信号,需要改进系统模型,并用四阶龙格-库塔方程得到输出。

本文采用输出 SNR 作为评价时延约束势随机共振的性能指标。该 SNR 公式定义如下:

$$SNR = 10\log_{10} \frac{A_d^2}{\sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} A_i^2 - A_d^2} \quad (21)$$

式中: N —信号长度; $A_d^2, \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} A_i^2 - A_d^2$ —信号功率和噪声总功率。

较大 SNR 值能更好地区分周期信号和噪声。

时延约束势随机共振的微弱信号检测方法如图 3 所示。

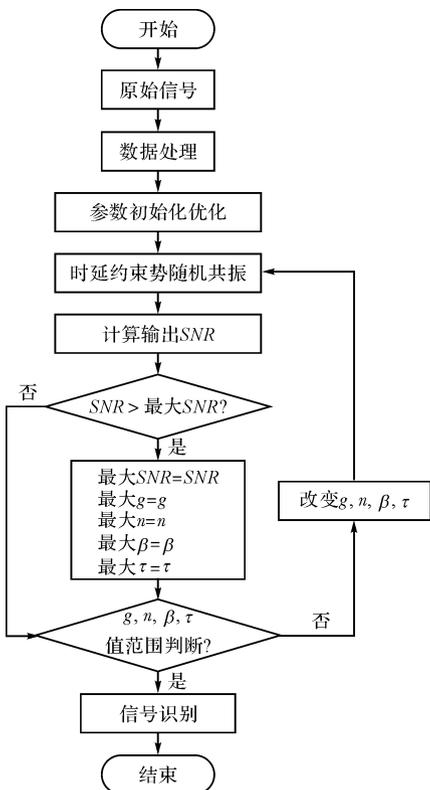


图 3 时延约束势随机共振的微弱信号检测方法

该流程描述如下:

(1) 数据处理。利用希尔伯特变换解调原始信号得到包络信号,随后对包络信号进行移频变尺度处理以符合小参数条件;

(2) 初始化与优化参数。利用蚁群算法初始化和优化反馈参数 β , 时延参数 τ 和势参数 g, n 的计算范围;

(3) 计算信噪比。通过龙格库塔方程计算得出输出信号波形,然后通过式(21)计算信噪比;

(4) 输出确定。得到最大输出信噪比以及相应的最优参数组合;

(5) 信号识别。将最优参数组合输入到时延约束势随机共振系统,最终得出时延约束势随机共振的时域波形和频谱,从而实现故障特征信号的识别。

2 仿真验证

为了验证时延约束势随机共振方法的有效性,本文将具有高斯白噪声的周期性脉冲信号作为仿真滚动轴承的故障信号,并用所提方法进行了处理。

仿真故障信号由以下公式产生:

$$s(t) = A\sin(2\pi ft) \exp\{-d[t - n(t)T_d]^2\} + \sqrt{2D}\eta(t) \quad (22)$$

式中: A —信号幅值; f —载波频率; d —衰减率; $n(t) = [t/T_d]$ —用于控制脉冲周期出现; T_d —脉冲间隔; f_d —特征频率; D —噪声强度; $\eta(t)$ —零均值和单位方差的高斯白噪声;采样时间为 1 s。

仿真结果如图 4 所示。

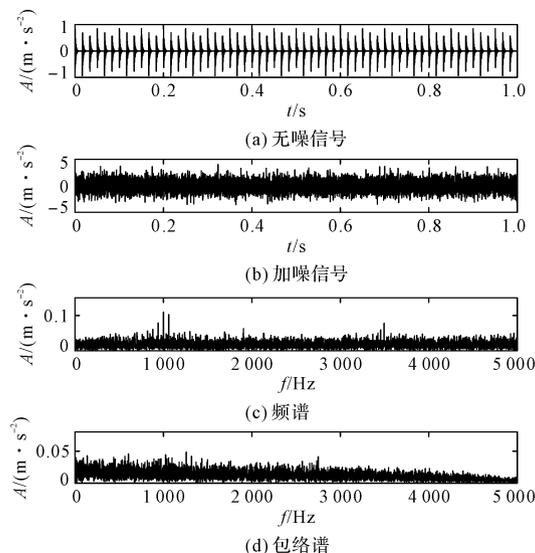


图 4 仿真信号

图 4(a,b) 分别为没有加入噪声和加入噪声的轴承故障信号。同时,加噪仿真信号的频谱和包络频谱如图 4(c,d) 所示。由于背景噪声太强导致特征频率 60 Hz 被淹没,无法准确获得轴承的故障特征频率。

本文采用时延约束势随机共振方法处理加入噪声的仿真信号,所得的时域和频谱图如图 5 所示。

在图 5(b) 中:故障特征频率能够清晰地看到,其所对应的频谱峰值为 0.169 9,周围第二高点的值为 0.046 86,两者相差 0.123 04。

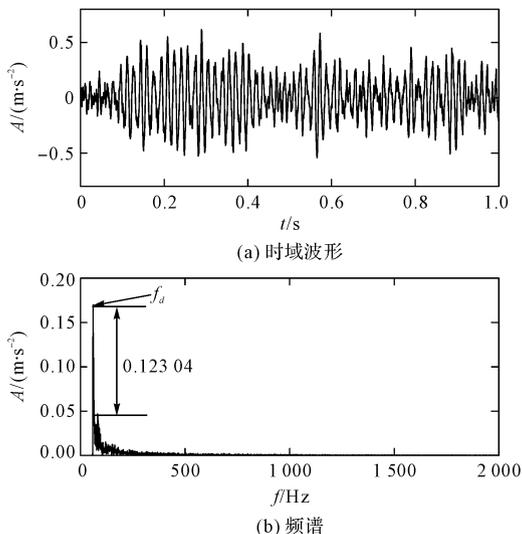


图 5 时延约束势随机共振方法

为了更好地比较两种方法的提取效果,本文用经典双稳态随机共振方法处理滚动轴承的故障信号。该方法的时域和频谱图如图 6 所示。

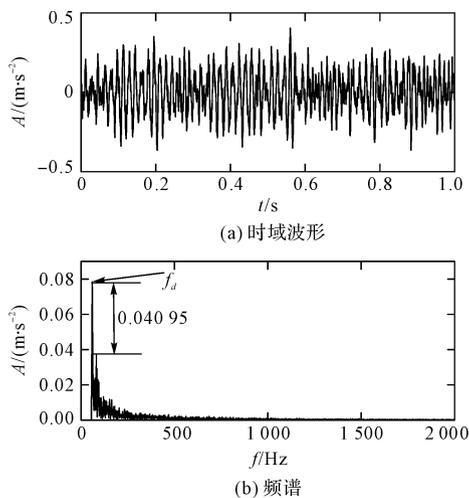


图 6 经典双稳态随机共振方法

在图 6 (b) 中可知:特征频率处的频谱峰值为 0.078 41,第二高点的值为 0.037 46,两峰值的差为 0.040 95。

综上所述:经典双稳态随机共振方法在故障特征频率处的频谱峰值低于所提出的方法,并且特征频率周围噪声干扰较大、差值较小。因此,所提出的方法对微弱故障特征的提取效果更好。

3 实验验证

为了进一步验证仿真实验的结果,笔者将所提出的方法和经典双稳态随机共振方法一起应用于轴承外圈的故障特征提取实验。

实验中采用的机械设备(轴承外圈)故障综合实

验台如图 7 所示。

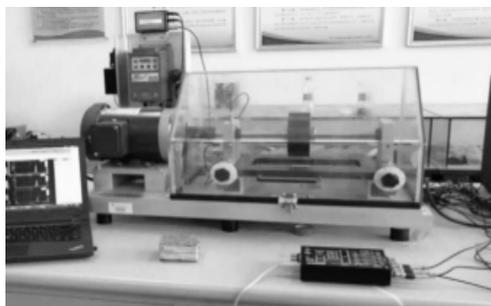


图 7 机械设备故障综合实验台

实验所选用的滚动轴承型号为 ER-16K,其主要几何参数如表 1 所示。

表 1 滚动轴承的主要几何参数

轴承节径 /mm	滚动体直径 /mm	滚动体个数 /个	接触角 /度
38.5	7.9	9	0

采样频率为 2 560 Hz,轴承转速为 2 400 r/min,轴承各部件的故障特征频率如表 2 所示。

表 2 滚动轴承的故障特征频率

故障类型	内圈	外圈	滚动体
故障频率/Hz	$5.432f_r$	$3.577f_r$	$2.334f_r$

其中, $f_r = 40$ Hz,计算得到轴承外圈的故障特征频率为 143.08 Hz。

原始振动信号的时域、频谱和包络谱图如图 8 所示。

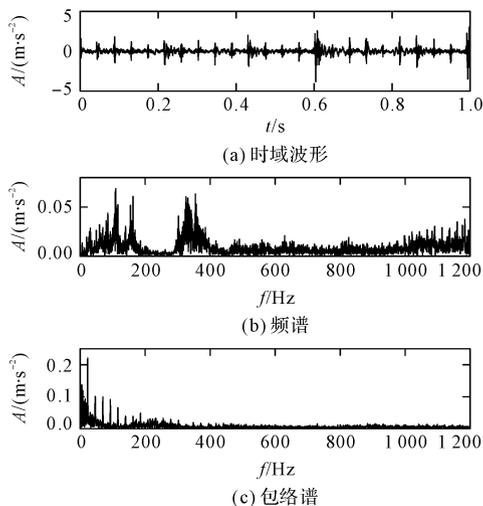


图 8 原始振动信号

从图 8 中可以看出:由于特征信号受到强噪声的干扰,无法在频谱和包络频谱中识别出轴承外圈故障的特征频率。

对于图 8 中无法识别故障特征的情况,笔者应用所提出的方法,来提取轴承的故障特征频率,其输出的时域与频谱图如图 9 所示。

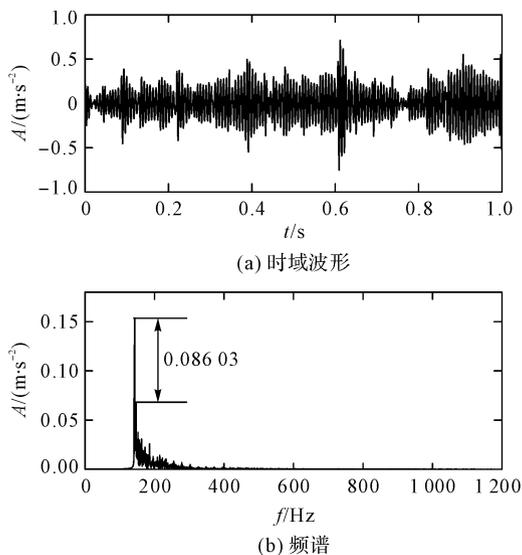


图 9 时延约束势随机共振方法

从图 9 中的频谱可知:轴承外圈的故障特征频率为 142.7 Hz,与理论值 143.08 Hz 很相近,频谱峰值与周围噪声最高点之差为 0.086 03,据此可以得出轴承的外圈上发生了故障。由此可见,该方法能够提取出轴承的故障特征。

为了验证该方法的优越性,笔者应用经典双稳态随机共振方法,来提取轴承的故障特征频率,其输出的时域与频谱图如图 10 所示。

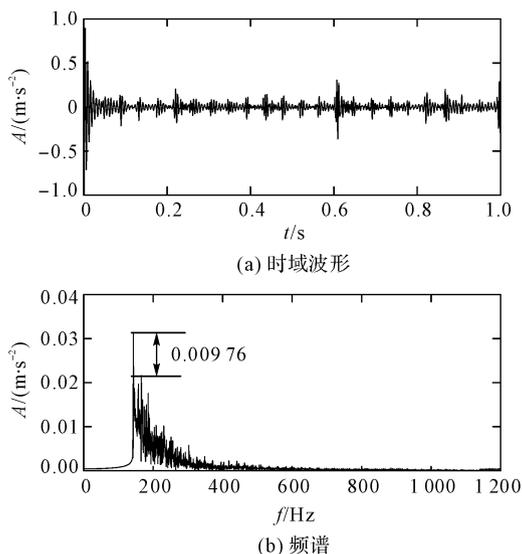


图 10 经典双稳态随机共振方法

在图 10(b)中,相同的故障特征频率也被经典随机共振方法提取,但是其频谱峰值只高出最大噪声 0.009 76。

在轴承外圈的故障特征提取实验中,采用以上两种方法,在故障特征频率处得到的频谱峰值分别为 0.154 和 0.031 39。

通过以上两种方法的对比可知,在机械设备故障的特征提取方面,所提出的方法比经典双稳态随机共

振方法具有更高的谱峰值、更好的识别效果。

4 结束语

在实际工作环境中,机械设备的故障特征很难被提取出来,因此笔者提出了一种基于时延约束势随机共振的机械故障信号检测方法。首先,建立了时延约束势随机共振模型,研究了系统参数、时延长度和反馈强度对信噪比和噪声强度关系的影响;然后,利用蚁群算法的参数优化能力,实现了随机共振系统的最佳匹配;最后,将提出的方法应用于仿真故障信号和实际轴承外圈故障信号的实验中。

理论分析、仿真和实验验证所得结论如下:

(1)通过对系统参数的调节可以得到多种势模型结构,实现了对系统随机振动的控制,比传统双稳态势模型效果更好;

(2)在约束势随机共振系统的基础上引入了反馈强度和时延长度,并且理论推导了输出信噪比,分析得出了各个参数对信噪比的影响;

(3)自适应蚁群算法以信噪比作为评价指标,通过优化系统参数、反馈强度和时延长度,可以实现更好的输出性能;

(4)与经典双稳态随机共振方法相比,所提出的方法不仅可以有效地提取故障特征,而且其噪声分量较小,具有更好的微弱信号检测效果。

综上所述,该方法在机械故障诊断的信号提取方面取得了一定的进展。后续的工作中,笔者将在势模型的选取以及参数的优化匹配上继续作进一步的研究。

参考文献 (References):

- [1] 孔德龙,胡万欣,司德光,等.基于随机共振的铁路国产移频信号检测研究[J].科技创新与生产力,2020,320(9):63-65.
- [2] 何大海,赵文礼,梅晓俊.基于随机共振原理的微弱信号检测与应用[J].机电工程,2008,25(4):71-74.
- [3] XING Zhan-qiang, QU Jian-feng, CHAI Yi, et al. Gear fault diagnosis under variable conditions with intrinsic time-scale decomposition-singular value decomposition and support vector machine [J]. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2017, 31(2):545-553.
- [4] 王鹏飞,赵一佳,熊保良,等.基于小波变换的轴承故障诊断及预测方法研究[J].电气开关,2020,58(3):23-29.
- [5] 涂志松.基于小波包和支持向量机的滚动轴承故障诊断[J].机电工程技术,49(12):4.
- [6] LIU Xiu-li, ZHANG Xue-ying, LUAN Zhong-quan, et al.

- Rolling bearing fault diagnosis based on EEMD sample entropy and PNN[J]. **The Journal of Engineering**, 2019, 2019(23):8696-8700.
- [7] BENZI R, SUTERA A, VULPIANI A. The mechanism of stochastic resonance [J]. **Journal of Physics A: Mathematical and General**, 1981, 14(11):453-457.
- [8] LENG Yong-gang, LENG Yong-sheng, WANG Tai-yong, et al. Numerical analysis and engineering application of large parameter stochastic resonance [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2006, 292(3-5):788-801.
- [9] LENG Yong-gang, WANG Tai-yong. Numerical research of twice sampling stochastic resonance for the detection of a weak signal submerged in a heavy noise [J]. **Acta Physica Sinica**, 2003, 52(10):2432-2437.
- [10] LIN Min, HUANG Yong-mei. Modulation and demodulation for detecting weak periodic signal of stochastic resonance [J]. **Acta Physica Sinica**, 2006, 55(7):3277-3282.
- [11] LEI Ya-guo, HAN Dong, LIN Jing, et al. Planetary gearbox fault diagnosis using an adaptive stochastic resonance method [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2013, 38(1):113-124.
- [12] HE Qing-bo, WANG Jun, LIU Yong-bin, et al. Multiscale noise tuning of stochastic resonance for enhanced fault diagnosis in rotating machines [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2012(28):443-457.
- [13] 时培明, 孙 鹏, 袁丹真. 基于非线性耦合双稳态随机共振的轴承微弱故障信号增强检测方法研究 [J]. **计量学报**, 2018, 39(3):373-376.
- [14] 李志星. 基于强噪声背景下随机共振的微弱故障诊断方法研究 [D]. 北京科技大学机械工程学院, 2018.
- [15] LU Si-liang, HE Qing-bo, ZHANG Hai-bin, et al. Enhanced rotating machine fault diagnosis based on time-delayed feedback stochastic resonance [J]. **Journal of Vibration and Acoustics**, 2015, 137(5):051008.
- [16] ZHOU Bing-chang, LIN Dan-dan. Stochastic resonance in a time-delayed bistable system driven by trichotomous noise [J]. **Indian Journal of Physics**, 2017, 91(3):299-307.
- [17] SHAO Rui-hua, CHEN Yong. Stochastic resonance in time-delayed bistable systems driven by weak periodic signal [J]. **Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications**, 2009, 388(6):977-983.
- [18] 韩松久. 基于时延随机共振势模型的旋转机械微弱故障诊断方法及应用 [D]. 内蒙古科技大学机械工程学院, 2020.
- [19] 刘桓秀, 陆佳平. 基于 ANSYS 的弹性约束包装件的随机振动特性分析 [J]. **包装与食品机械**, 2019(1):57-62.
- [20] TSIMRING L S, PIKOVSKY A. Noise-induced dynamics in bistable systems with delay [J]. **Physical Review Letters**, 2001, 87(25):250602.
- [21] HU Gang, NICOLIS G, NICOLIS C. Periodically forced Fokker-Planck equation and stochastic resonance [J]. **Physical Review A**, 1990, 42(4):2030.
- [22] FRANK T D. Delay Fokker-Planck equations, Novikov's theorem, and Boltzmann distributions as small delay approximations [J]. **Physical Review E**, 2005, 72(1Pt1):011112.
- [23] HE Li-fang, ZHOU Xi-cheng, ZHANG Gang, et al. Stochastic resonance in time-delayed exponential monostable system driven by weak periodic signals [J]. **Physics Letters A**, 2018, 382(35):2431-2438.
- [24] LOOS S A M, KLAPP S H L. Force-linearization closure for non-Markovian Langevin systems with time delay [J]. **Physical Review E**, 2017, 96(1):012106.
- [25] MCNAMARA B, WIESENFELD K. Theory of stochastic resonance [J]. **Physical Review A**, 1989, 39(9):4854-4869.

[编辑:杨骏泽]

本文引用格式:

李志星,王光进,鲍慧茹. 基于时延约束势随机共振的机械故障诊断方法研究 [J]. **机电工程**, 2021, 38(10):1238-1245.LI Zhi-xing, WANG Guang-jin, BAO Hui-ru. Mechanical fault diagnosis method based on time-delay constrained potential stochastic resonance [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2021, 38(10):1238-1245.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>