

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413356

# 导向钻具动态测量的三稳随机共振频率提取\*

杨一<sup>1,2</sup>, 周可馨<sup>1,2</sup>, 张楠<sup>1,2</sup>, 郭安<sup>1,2</sup>

(1. 西安石油大学陕西省油气井测控技术重点实验室 西安 710065; 2. 西安石油大学电子工程学院 西安 710065)

**摘要:**在随钻测量过程中,由于钻头切削岩层、钻柱与井壁的碰撞等导致底部钻具产生强烈振动,使钻具动态测量信号淹没在复杂的噪声环境中,对钻具姿态测量产生严重干扰,造成钻具导向控制无效。针对这一问题,利用三稳非线性系统所产生的动力学特性,即随机共振效应对导向钻具动态测量信号的频率进行提取。首先,提出基于尺度变换三稳系统的随机共振频率识别方法,解决钻具动态测量信号的应用限制;然后,研究势函数特征参数对系统共振输出作用的影响规律,并设计相应的势函数特征参数调整方案,实现任意噪声强度下钻具动态测量信号的频率提取。仿真和实钻数据实验结果表明,所提方法可提取信号的信噪比(SNR)阈值低至-19.5 dB,并且可靠性优于双稳态系统,证明了方法的有效性和稳定性。

**关键词:** 导向钻具动态测量;随机共振;三稳非线性系统;频率提取

**中图分类号:** TH89 TE242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 440.45

## Frequency extraction of tri-stable stochastic resonance system for dynamic measurement of steering drilling tool

Yang Yi<sup>1,2</sup>, Zhou Kexin<sup>1,2</sup>, Zhang Nan<sup>1,2</sup>, Guo An<sup>1,2</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. College of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In the process of measurement while drilling, the dynamic measurement signal of the drilling tool is often submerged in a complex noise environment. This noise is primarily caused by the strong vibrations of the bottom drilling tool, which result from the drill bit cutting through rock layers and the collisions between the drill string and the borehole wall. Such interference severely affects the attitude measurement of the drilling tool, leading to ineffective guidance and control. In order to solve this problem, this paper uses the dynamic characteristics generated by the tri-stable nonlinear system, that is, the random resonance effect, to extract the frequency of the dynamic measurement signal of the steering drilling tool. Firstly, a random resonance frequency identification method based on the scale transformation tri-stable system is proposed to solve the application limitation of the dynamic measurement signal of the drilling tool. Then, the influence of the characteristic parameters of the potential function on the resonance output of the system is studied, and the corresponding adjustment scheme of the characteristic parameters of the potential function is designed to realize the frequency extraction of the dynamic measurement signal of the drilling tool under any noise intensity. The experimental results of simulation and real drilling data show that the SNR threshold of the signal extracted by the proposed method is as low as -19.5 dB, and the stability is better than that of bis-table systems, which proves the effectiveness and stability of the proposed method.

**Keywords:** dynamic measurement of steering drilling tool; stochastic resonance; tri-stable nonlinear system; frequency extraction

## 0 引言

导向钻具在姿态动态测量过程中,由于钻头切削岩

层、钻柱与井壁的碰撞等导致底部钻具产生强烈振动,使钻具动态测量信号淹没在复杂的噪声环境中。一方面,噪声的频谱分布呈现高频性、宽频性以及随机性等特征<sup>[1-2]</sup>;另一方面,近钻头振动信号的幅值一般在10g左

右,最大可达 30g,而有用信号的幅值一般不超过  $1g^{[3-4]}$ 。因此,待测信号的信噪比(signal to noise ratio, SNR)可低至 -20 dB,甚至更低。此时,有用信号湮灭在复杂噪声环境中,对钻具动态测量产生严重干扰,造成钻具导向控制无效<sup>[5]</sup>。复杂噪声干扰及 SNR 极低问题一直是导向钻具姿态动态测量领域的技术难点。

目前,常用的去噪方法包括有限脉冲响应(finite impulse response, FIR)滤波、小波变换和自适应滤波等。FIR 滤波是一种基于频域分析的噪声抑制方法,在处理导向钻具动态测量这种时变非平稳强振动信号时,会导致部分有用信号的丢失;并且在抑制低频噪声时存在过度去噪、损害有用信号等缺陷<sup>[6]</sup>。小波变换可以同时分析信号的时频信息,但该方法存在小波基参数选择难度大、选取依赖主观性等缺点;并且可处理信号的 SNR 阈值较高,无法满足钻具动态测量极低 SNR 的要求<sup>[7-9]</sup>。自适应滤波可以有效跟踪信号和噪声的实时变化,提高待测信号的 SNR。然而在进行参数控制时,算法的稳定性和收敛性无法保证,难以满足导向钻具动态测量信号检测对可靠性和实时性的要求<sup>[10-12]</sup>。

由此可知,基于噪声抑制或抵消的滤波方法在实际应用时,其实现的前提是待测信号的频谱与噪声频谱不重叠,滤波过程中能够保留有用信号而滤除不相关的噪声分量<sup>[13-14]</sup>。然而,在实际采集到的姿态测量信号中,由于干扰源种类繁多,噪声信号的频率分布非常复杂,势必存在与测量信号频率接近的部分。因此,在抑制噪声的同时,有用信号也会不可避免的受到抑制或损害<sup>[15-16]</sup>。甚至因为复杂多变的强噪声干扰导致与噪声频谱重合或混叠的待测信号很难被提取出来,从而导致导向钻具动态测量无效。

鉴于传统弱信号检测方法存在的缺陷,探索新的导向钻具动态测量弱 SNR 信号提取方法就显得十分必要。随机共振(stochastic resonance, SR)是指在输入信号和噪声的协同作用下,利用非线性系统的动力学特性,使系统输出信号的 SNR 随噪声的增大呈现先增后减的趋势,并在某一噪声强度下出现峰值,产生共振输出现象<sup>[17-19]</sup>。研究表明,基于非线性系统动力学行为的随机共振模型可以有效识别复杂噪声环境下的微弱周期信号,例如钻具姿态测量时加速度计与磁性传感器所输出的正弦周期信号。

目前国内外关于随机共振在导向钻具动态测量弱 SNR 信号提取中的研究报道较少。Zhang 等<sup>[20]</sup>针对导钻工具测量复杂背景下的泥浆脉冲信号检测问题,研究了基于双稳态非线性系统的随机共振作用机理,并提出基于遗传模拟退火算法的随机共振参数自适应优化方法,实现了低 SNR 下的信号提取。Kim 等<sup>[21]</sup>基于随机共振的噪声能量收集机制,对钻具在钻进过程中所产生的高

强度、低转速振动噪声进行能量转化,从而提高微弱周期信号的 SNR,仿真结果验证了该方法的有效性。陈晨等<sup>[22]</sup>根据朗之万方程,建立井下声波通讯信号的随机共振检测模型,并对随机共振弱信号检测系统的参数敏感性进行研究,选定合适参数,最终识别出待测信号的频率。Yang 等<sup>[23]</sup>研究了二阶杜芬系统共振输出的作用机理,并将其应用于钻具姿态测量信号检测,实验结果表明,该方法不仅可以提高待测信号的 SNR,而且能够有效识别出复杂噪声环境下有用信号的频率值。

在众多可以产生共振输出效应的非线性系统中,标准三稳态系统因其稳定的动力学特性,且对弱 SNR 信号的识别性能明显优于传统一、二阶非线性系统,成为微弱信号检测领域的研究热点。因此,本文以三稳系统为基础,利用其共振输出作用对钻具动态测量信号的频率值进行识别;并针对井下传感器信号与强振动噪声信号的特征,设计相应的改进方法和势函数调参机制;最后通过仿真和实钻数据验证所提方法的有效性和准确性。

## 1 标准三稳随机共振系统频率识别的基本原理

由待测信号和噪声共同驱动的标准三稳随机共振系统如式(1)所示<sup>[24-25]</sup>。

$$\ddot{x} + k\dot{x} + \frac{dU(x)}{dx} = s(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: $k$ 为阻尼比; $x$ 为三稳系统的输出变量,是时间 $t$ 的函数; $dU(x)/dx$ 为非线性恢复力项, $U(x)$ 为系统势函数。待测信号 $s(t)$ 和噪声信号 $n(t)$ 分别如式(2)~(3)所示。

$$s(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \phi) \quad (2)$$

$$n(t) = \sqrt{2D}\zeta(t) \quad (3)$$

式中: $A$ 为幅值; $f_0$ 为频率; $\phi$ 为初始相位; $\zeta(t)$ 为均值和单位方差为零的高斯白噪声; $D$ 为噪声强度。

标准三稳势函数如式(4)所示。

$$U(x) = \frac{ax^2}{2} - \frac{bx^4}{4} + \frac{cx^6}{6} \quad (4)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为系统参数(均为 $>0$ 的实数)。势函数 $U(x)$ 曲线,如图1所示。

根据式(1)和(4)可知,非线性恢复力 $f(x)$ 可表示为:

$$f(x) = \frac{dU(x)}{dx} = ax - bx^3 + cx^5 \quad (5)$$

从图1可以看出,标准三稳系统的势函数有5个平衡点,分别为 $x_1 = -q$ 、 $x_2 = -p$ 、 $x_3 = 0$ 、 $x_4 = p$ 和 $x_5 = q$ ,其中 $x_1$ 、 $x_3$ 、 $x_5$ 为稳定平衡点, $x_2$ 、 $x_4$ 为不稳定平衡点。此外,势函数包含3个势阱,2个势垒,并且势函数整体关于 $x=0$ 对称,势垒与势阱间的高度差分别为 $\Delta U_1$ 和 $\Delta U_2$ 。

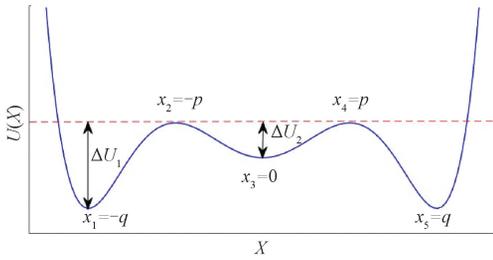


图 1 标准三稳态势函数

Fig. 1 Standard triple steady-state potential function

为了便于分析, 将势函数的系统参数用平衡点的横坐标表示, 因此式(4)可表示为:

$$U(x) = \frac{m}{2} p^2 q^2 x^2 - \frac{m}{4} (p^2 + q^2) x^4 + \frac{m}{6} x^6 \quad (6)$$

式中:  $p, q$  和  $m$  均为正实数。

当  $p = 3^{1/2} q/3$  时,  $\Delta U_1 = \Delta U_2$ , 中间势阱与两边势阱高度相同; 当  $p < 3^{1/2} q/3$  时,  $\Delta U_1 > \Delta U_2$ , 中间势阱比两侧势阱浅; 当  $q < 3^{1/2} p$  时,  $\Delta U_1 < \Delta U_2$ , 中间势阱高于两侧势阱。结合势阱高度  $\Delta U_1, \Delta U_2$  与平衡点位置  $p, q$  的单调性规律可知<sup>[25]</sup>, 通过调节  $p, q$  的大小, 可改变势阱的高度差, 具体规律如下: 在  $p < 3^{1/2} q/3$ , 中间势阱比两侧势阱浅的条件下, 固定一个参数不变, 改变另一参数的值, 可使势垒高度差增大; 而在  $q < 3^{1/2} p$ , 中间势阱比两侧势阱深的条件下, 固定  $q$  的值, 随着  $p$  值的增大势垒高度差增大, 固定  $p$  的值, 势垒高度差会随  $q$  的减小先减后增, 并在  $q = 2p^{1/2}$  时取得最大值  $\Delta U_1 - \Delta U_2 = p^6/3$ 。

在势函数初始条件不变且系统稳定状态下, 仅加入待测信号  $s(t)$  对系统进行调制,  $s(t)$  如式(2)所示; 并且设噪声信号  $n(t)$  为 0。此时, 三稳系统势函数由  $U(x)$  变为  $V(x)$ , 具体形式如式(7)所示。

$$V(x) = U(x) - x f(x) = \frac{ax^2}{2} - \frac{bx^4}{4} + \frac{cx^6}{6} - x A \sin(2\pi f_0 t + \phi) \quad (7)$$

在待测信号的作用下, 势函数的 3 个势阱被周期性的抬高或加深, 如图 2 所示。

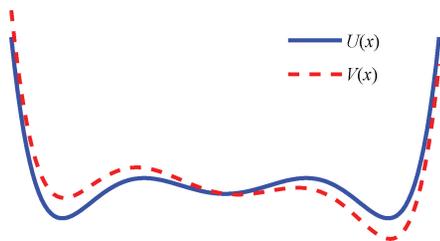


图 2 信号调制前后的三稳势函数

Fig. 2 Tri-stable potential function before and after signal modulation

可以看出, 势场形态的变化程度取决于待测信号的幅值  $A$ 。当幅值  $A$  进一步增大时, 两个势垒中的一个随着时间的变化可能消失, 三稳结构变为双稳结构, 即其中某一势阱位置由极点变为拐点。以  $t = (0.5\pi - \varphi) / (2\pi f_0)$  时刻  $s(t)$  取最大值  $A$  为例,  $V(x)$  需满足如式(8)~(9)条件:

$$V'(x) = ax - bx^3 + cx^5 - A = 0 \quad (8)$$

$$V''(x) = a - 3bx^2 + 5cx^4 = 0 \quad (9)$$

由式(9)可解得:

$$\begin{cases} x_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{3b - \sqrt{9b^2 - 20ac}}{10c}} \\ x_{3,4} = \pm \sqrt{\frac{3b + \sqrt{9b^2 - 20ac}}{10c}} \end{cases} \quad (10)$$

将  $x_{1,2,3,4}$  代入式(8)可得 4 个待测信号的幅值, 舍去负值并将剩下两个待测信号的幅值记为临界幅值  $A_{c1}$  和  $A_{c2}$  ( $A_{c1} < A_{c2}$ )。当待测信号的幅值  $A < A_{c1}$  时, 表示势阱周期性的抬高或加深不足以使势垒消失, 此时系统输出的运动状态 (Brownian 粒子) 无法越过势垒进入另一势阱, 只能在单阱中小幅振荡。当  $A_{c1} < A < A_{c2}$  时, 2 个势垒中的一个随着时间的推移逐渐消失, 3 个势阱减少为 2 个, Brownian 粒子能够越过势垒在两势阱间进行大范围周期性的跃迁运动, 三稳结构变为双稳结构。当  $A > A_{c2}$  时, 另一个势垒也会随着时间的推移逐渐消失, 2 个势阱减少为 1 个, 双稳势场进一步变为单稳势场。  $V(x)$  的势场结构与待测信号幅值  $A$  的关系如表 1 所示。

表 1 势场结构与待测信号振幅关系

Table 1 The relationship between the potential field structure and the amplitude of the signal to be measured

待测信号振幅	$V(x)$ 极点数量	$V(x)$ 势场结构
$A < A_{c1}$	5	三稳态
$A = A_{c1}$	3	双稳态
$A_{c1} < A < A_{c2}$	3	双稳态
$A = A_{c2}$	1	单稳态
$A > A_{c2}$	1	单稳态

根据上述分析, 当待测信号  $s(t)$  的幅值  $A < A_{c1}$  时, Brownian 粒子只能停留在被待测信号调制的势函数  $V(x)$  的势阱底部, 随着势阱位置的变化进行小范围的周期振荡, 但是噪声的存在可以改变这种情况。当噪声  $n(t)$  同时存在且系统参数合适的情况下, 即使  $A < A_{c1}$ , Brownian 粒子也能在噪声的作用下积累足够的能量, 从而越过势垒在两势阱间做大范围跃迁运动。此时待测信号、噪声和三稳系统达到协同作用, 噪声产生积极作用, 将一部分噪声能量转移到待测信号上, 使其能量加强, 系统输出 SNR 达到最大, 这是典型的随机共振效应, 如图 3 所示。

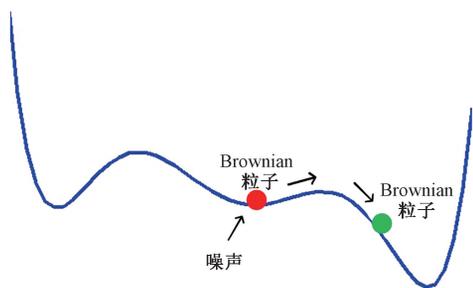


图3 噪声作用下 Brownian 粒子跃迁运动

Fig. 3 Transition motion of Brownian particles under noise

尽管利用标准三稳系统所产生的随机共振效应可以有效识别出强噪声背景下的待测信号频率,但将其应用于导向钻具动态测量弱 SNR 信号提取时仍然存在如下缺陷。

1) 受绝热近似理论的局限性,三稳系统的随机共振效应仅在待测信号的频率  $f_0$  为小参数,即  $f_0 \ll 1$  时发生。然而,钻具动态测量信号的频率主要由钻柱的转速决定,其值在 1~3 Hz 变化。这显然不符合三稳系统随机共振效应的产生条件。因此,将三稳随机共振系统应用于导向钻具动态测量时,必须先对测量信号的频率进行预处理。

2) 尽管噪声在随机共振效应产生的过程中可以起到积极的作用,但如果噪声强度过大,三稳系统产生过谐振作用,仍然无法从强噪声中识别出有用信号。钻具动态测量过程中,近钻头振动信号的强度一般在 10g,最大可达到 30g,很容易产生过谐振。因此,亟需寻找一种方法,能够在噪声强度过大时仍然保证三稳系统能够实现随机共振效应。

## 2 基于改进三稳随机共振系统的钻具动态测量信号频率提取

### 2.1 基于变尺度三稳随机共振模型的频率识别方法

针对钻具姿态动态测量信号频率值较大的问题,本文利用尺度变换理论对式(1)中标准三稳系统进行优化,设计基于变尺度三稳随机共振模型的频率识别方法,这一问题的关键是如何对钻具姿态测量信号的频率值进行重构变换。

测量信号仍定义如式(2)所示。此时,引入尺度变换系数  $R$ ,将测量信号在时间尺度上进行尺度变换,即  $t_1 = R \cdot t_0$ 。对于导向钻具动态测量信号,频率值为 1~3 Hz。若将尺度转换系数  $R$  设置为 100,则测量信号的频率将被缩放到 [0.01 Hz, 0.03 Hz],满足三稳系统随机共振效应的小参数限制。因此,本文将尺度变换系数  $R$  设为

100,尺度变换后的被测信号如下所示:

$$s(t_1) = A \sin(2\pi f_1 t_1 + \phi) = A \sin\left(2\pi \frac{f_0}{R} t_1 + \phi\right) = A \sin(2\pi \cdot 0.01 \cdot f_0 t_1 + \phi) \quad (11)$$

需要说明的是,初始相位  $\phi$  对三稳态随机共振效应的影响很小。因此,不需要考虑尺度转换对  $\phi$  的影响。由式(1)可知,式(11)中的信号  $s(t_1)$  满足三稳态系统随机共振效应的小频率检测条件。因此,可以根据三稳态系统的输出确定被测信号的频率值  $s(t)$ 。然而,在实际应用中,很难通过线性变换直接实现尺度变换。因此,为了实现测量信号的频率重构,考虑将数值计算的步长按照系数  $R$  进行尺度变换,具体步骤如下。

1) 假设被测信号的采样频率为  $f_s$ ,数值计算的步长应写成如下形式:

$$t = \frac{1}{f_s} \quad (12)$$

2) 通过引入尺度转换系数  $R$ ,可以写出数值计算的步长:

$$t_1 = R \cdot t = \frac{R}{f_s} \quad (13)$$

从式(13)可以看出,采样时间被放大了  $R$  倍,而采样频率被压缩了  $R$  倍。将时间  $t_1$  代入式(11)后,频率  $f_0$  也被压缩了  $R$  倍。即采样频率为  $f_s$ 、信号频率为  $f_0$  的随钻测量信号  $s(t)$  经尺度变换后,变为采样频率为  $f_s/R$ 、信号频率为  $f_0/R$  的新信号  $s(t_1)$ 。

三稳态系统通过输入信号  $s(t_1)$  实现随机共振效应,再通过系统输出识别出信号  $s(t_1)$  的频率值。最后,根据尺度变换系数  $R$  可计算出被测信号的频率值  $s(t)$ 。

综上所述,尺度变换并不改变被测信号的量值,只是改变了信号的频率或时间尺度。具体到导向钻具动态测量信号,其频率值从 [1 Hz, 3 Hz] 压缩到 [0.01 Hz, 0.03 Hz],其他参数不变。因此,该方法不会影响三稳态系统的输出结果,进而成功解决第1节提到的第1个问题。

### 2.2 基于势函数参数调节的三稳随机共振系统频率提取方法

根据第1节三稳非线性系统产生随机共振作用的机理可知,当输入三稳系统的待测信号能量(幅值)不足以使 Brownian 粒子在势阱之间完成大范围跃迁运动时, Brownian 粒子的跃迁能力还可以由噪声强度、系统阻尼比和确定势场形状的参数共同决定。因此,为了解决第1节提到的第2个问题,可以通过调整式(1)和(6)中的参数来匹配噪声强度  $D$ ,使三稳系统在任意噪声强度下均可实现共振输出效应。可调参数包括阻尼比  $k$  和势场形状参数  $m, p$  及  $q$ 。

首先, 阻尼比  $k$  的值与 Brownian 粒子的跃迁能力呈负相关。式(1)中的  $kx'$  项表示在势场中对 Brownian 粒子运动的抑制。当  $k$  较小时, 由于抑制力较小, Brownian 粒子更容易从一侧势阱跳出, 反之亦然。因此, 阻尼比对 Brownian 粒子的跃迁能力有消极影响, 并且通过调整阻尼比  $k$  来匹配不同的噪声强度  $D$ , 可以使 Brownian 粒子的跃迁能力保持在合适的水平, 进而使式(1)所示三稳系统产生随机共振效应。

为了证实上述分析的准确性, 假设式(1)中其余参数不变, 并设置阻尼比  $k$  分别等于 0.3、0.5 和 0.9,  $A_m-D$  曲线如图 4 所示,  $A_m$  是三稳系统输出在待测信号频率处的幅值。可以看出, 随着阻尼比  $k$  的增大, 产生随机共振效应的最佳噪声强度也随之增加, 即 Brownian 粒子发生跃迁运动所需的能力随之增加, 与上述理论分析的结论一致。

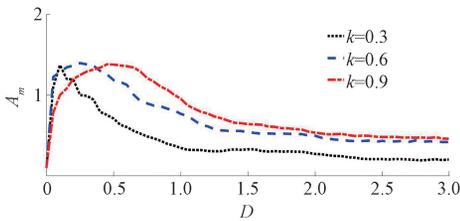


图 4 阻尼比  $k=0.3, 0.5, 0.9$  时有用信号频率峰值随噪声强度的变化趋势

Fig. 4 Damping ratio  $k=0.3, 0.5, 0.9$  the variation trend of the peak frequency of the useful signal

其次, 势场的形状也会影响 Brownian 粒子的跃迁能力, 侧势阱越深越陡, 粒子越难跳出, 反之亦然。文献[25]总结了势阱深度与参数  $p, q$  和  $m$  之间的影响关系,  $m, q$  越大或  $p$  越小, 侧势阱越深, 即参数  $m$  和  $q$  对布朗粒子的跃迁能力有消极影响, 参数  $p$  对 Brownian 粒子的跃迁能力有积极影响。因此, 如果钻具动态测量信号中的噪声强度过大, 可以通过增加参数  $m$  和  $q$  的值或减小  $p$  的值来实现随机共振效应。

为了进一步证实上述分析结果, 假设式(1)和(6)中其余参数不变, 分别设置参数  $p=0.1, 0.3, 0.5; q=1.0, 1.2, 1.4; m=0.5, 1.0, 1.5$ ,  $A_m-D$  曲线如图 5~7 所示。从仿真结果可以看出, 产生随机共振效应的最佳噪声强度与参数  $m$  和  $q$  呈正相关, 与参数  $p$  呈负相关。这些变化趋势与理论分析结果一致, 证实了上述分析的准确性。

从图 4 可以看到, 当阻尼比  $k$  变化时, 产生随机共振的噪声强度虽然不一样, 但是幅值  $A_m$  却保持在稳定水平。这主要是因为 Brownian 粒子的跃迁能力处于同一水平, 并不受  $k$  变化的影响。另一方面, 由图 5~7 可知, 当参数  $p$  减小时, 发生共振输出时对应的幅值  $A_m$  也随之下降; 当参数  $q$  或  $m$  增大时, 发生共振输出时对应的幅值

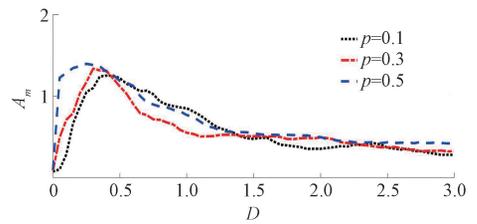


图 5 平衡点  $p=0.1, 0.3, 0.5$  时有用信号频率峰值随噪声强度的变化趋势

Fig. 5 Equilibrium point  $p=0.1, 0.3, 0.5$  the variation trend of the peak frequency of the useful signal

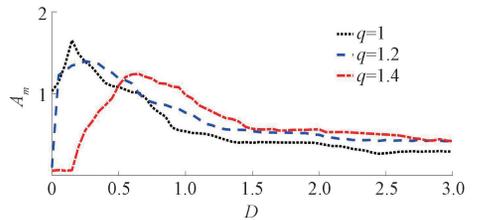


图 6 平衡点  $q=1, 1.2, 1.4$  时有用信号频率峰值随噪声强度的变化趋势

Fig. 6 Equilibrium point  $q=1, 1.2, 1.4$  the variation trend of the peak frequency of the useful signal

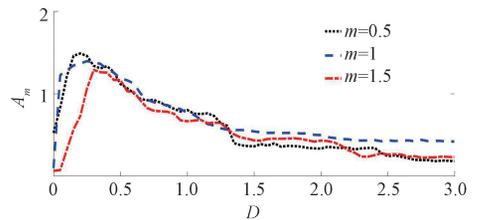


图 7 参数  $m=0.5, 1, 1.5$  时有用信号频率峰值随噪声强度的变化趋势

Fig. 7 Parameter  $m=0.5, 1, 1.5$  the variation trend of the peak frequency of the useful signal

$A_m$  仍然随之下降。

由上述分析可知, 调整  $k$  的值与噪声强度匹配时, 对三稳系统的输出性能并无明显影响, 而调整  $m, q$  以及  $p$  的值会对系统的输出性能有不同程度的负面影响。因此, 在进行参数调整时, 应将阻尼比  $k$  设置为主要参数, 将  $m, p$  和  $q$  设置为次要调节参数。

进一步分析可得, 当三稳系统输出欠谐振时(即输入噪声强度  $D$  过小), 可以首先减小  $k$  的值, 然后稍微减小参数  $m, q$  的值或稍微增加  $p$  的值来实现系统共振输出作用; 另一方面, 当系统输出过谐振(即输入噪声强度  $D$  过大)时, 应该增加  $k$  的值, 然后保持参数  $m, p$  和  $q$  不变。基于以上分析可得不同噪声强度下三稳随机共振系统调参规则如表 2 所示。

表2 不同噪声强度下系统参数调整规则

Table 2 System parameter adjustment rules under different noise intensities

	$D \ll D_{op}$	$D \gg D_{op}$
谐振类型	欠谐振	过谐振
调整规则	主要减小 $k$ , 适当降低 $m, q$ 或增加 $p$	主要增加 $k$ , 适当增大 $m, q$ 或减小 $p$

由于钻具动态测量信号的振动噪声强度很高,三稳系统在输入测量信号后大多会产生过谐振状态,因此可采用表2中过谐振的参数调整规则进行处理,从而有效解决第1节提出的第2个问题。

为了同时解决第1节提到的两个缺陷,将所提出的调参方法与2.1节提出的尺度变换方法相结合,同时用于三稳随机共振系统的优化,技术方案如下。

1) 将待测信号  $sn(t)$  输入三稳态随机共振系统,此时系统以  $f_s$  的采样频率对  $sn(t)$  进行采样。

2) 引入合适的变尺度系数  $R$ , 得到经过尺度变换的待测频率为  $f'_0$ , 此时  $f'_0 = f_0/R$  满足经典随机共振的小参数限制,此时系统以新的频率  $f_s/R$  对待测信号  $sn(t)$  进行采样。

3) 检测系统噪声强度  $D$  是否与待测信号  $sn(t)$  匹配并实现随机共振,若匹配则直接输出信号,并还原待测信号频率;若不匹配,则根据表2所示参数调整规则对三稳系统进行调整。

4) 实现系统共振输出效应后根据变尺度系数  $R$  还原出待测信号频率,实现频率提取。

### 3 实验与分析

通过实验室振动平台模拟和钻井实钻数据对基于改进三稳随机共振系统的导向钻具动态测量信号频率提取方法进行验证,并将实验结果与标准三稳随机共振系统以及双稳态随机共振系统进行对比分析,从而全面评估所提方法的综合性能。

#### 3.1 实验室仿真测试

实验室振动平台仿真测试的主要设备如图8所示,包括测斜仪校准装置、六度空间振动台以及信号采集模块等。测斜仪内置三轴加速度计传感器,通过改变测斜仪控制阀的角度,可以模拟钻具在钻进过程中的姿态,包括倾斜角、方位角和工具面角。另外,通过控制台设置空间振动台,产生不同强度和频率的噪声干扰信号,以模拟井下强振动噪声干扰环境。

1) 变尺度三稳随机共振系统频率识别仿真

首先,设置测斜仪控制阀,获得钻具的模拟实时姿态

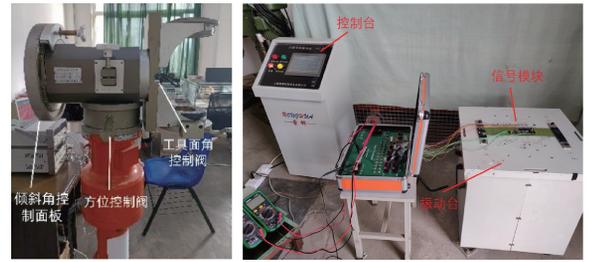


图8 实验室振动平台

Fig. 8 Lab vibration platform

角,并通过存储示波器记录内置传感器的输出信号。以  $x$  轴加速度计输出信号为例进行仿真实验,设  $x$  轴的实时输出信号  $s(t)$  为  $0.3\sin 4\pi t$ ; 然后,利用六度空间振动台产生方差为 0.4 的随机噪声信号  $n(t)$ , 其频率变化范围为  $0 \sim 10$  Hz。显然,包括与待测信号频率混叠的部分。综上,三稳随机共振系统的输入信号如下所示:

$$I(t) = 0.3\sin 4\pi t + n(t) \quad (14)$$

以 MATLAB R2018a 软件为仿真计算平台,建立变尺度三稳随机共振频率识别模型,并设置系统阻尼比  $k=0.6$ , 平衡点参数  $p=0.5, q=1.2, m=1$ 。

由式(14)可知,待测信号  $s(t)$  的频率远大于标准三稳随机共振系统的小参数限制,若要实现系统共振输出效应需对其进行尺度变换。此时,引入变尺度系数  $R=200$  将待测信号频率转换为  $f'_0 = f_0/R = 0.01$  Hz, 并依据  $R$  的值对采样频率和计算步长进行调整,仿真结果如图9、10所示。

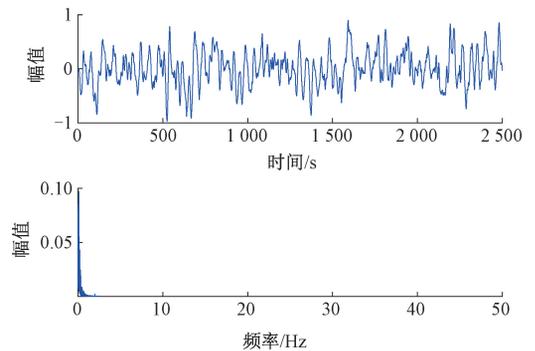


图9 尺度变换前系统输出信号波形及频谱

Fig. 9 Output signal waveform and spectrum before scale transformation

由图9可以看出,标准三稳非线性系统没有明显的共振输出效应,进而无法在随机共振的作用下从强噪声背景中识别出待测信号的频率值。然而,由图10可知,对标准三稳非线性系统进行变尺度处理,系统输出在 2 Hz 处的幅值远大于其他频率处的幅值,这是明显的共振输出效应,通过这一结果表明,在大频率参数信号

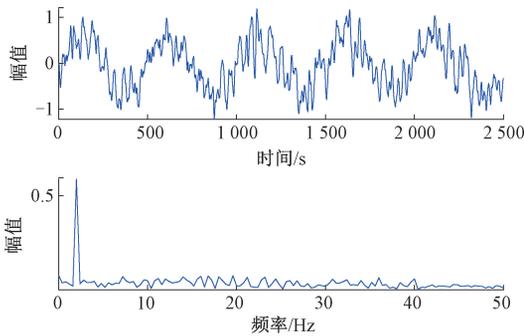


图 10 尺度变换后系统输出信号波形及频谱

Fig. 10 The output signal waveform and spectrum after scale transformation

输入时,将尺度变换与标准三稳非线性系统相结合可以有效识别待测信号的频率值。因此,基于本文所提变尺度三稳随机共振系统,可有效提取强噪声背景下导钻工具动态测量弱 SNR 信号。

## 2) 调参三稳随机共振系统频率提取仿真

如前所述,导向钻具动态测量信号的 SNR 一般低至  $-20$  dB,甚至更低。因此,结合第 2 节输入信号的幅值,将噪声信号的方差,即强度  $D$  从 0.8 增至 4,此时通过计算可知待测信号的 SNR 为  $-19.5$  dB,与钻具动态测量信号的 SNR 相符。若保持系统其他参数不变,可得仿真结果如图 11 所示。

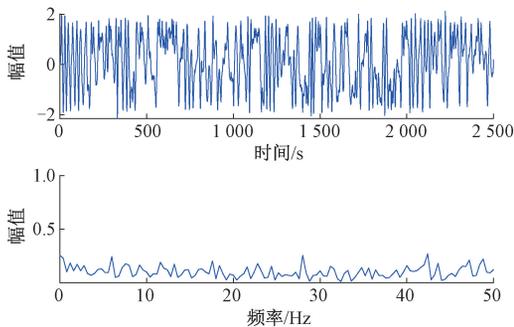


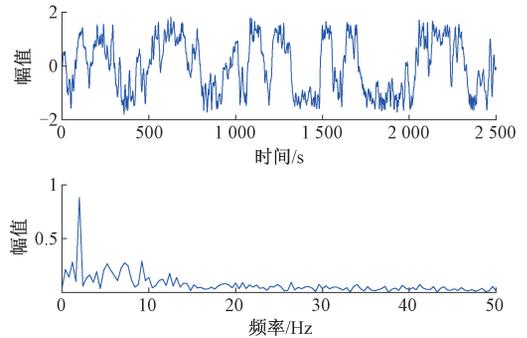
图 11 参数调整前系统输出信号波形及频谱

Fig. 11 Output signal waveform and spectrum before parameter adjustment

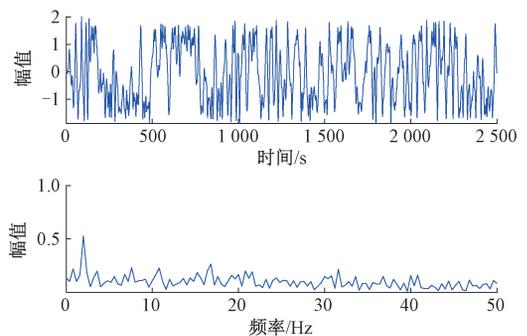
可以看出,噪声强度增大后,变尺度三稳非线性系统的输出发生过谐振,随机共振作用失效。因此无法通过共振输出效应提取出待测信号的频率值。为了使三稳系统在强噪声弱 SNR 状态下仍然能产生共振输出效应,根据表 2 中的分析结论,对系统特征参数  $k$ 、 $p$ 、 $q$  以及  $m$  的值进行调整。经过大量仿真计算,得到各参数变化时的系统输出结果及分析如下。

首先,保持势函数平衡点参数  $p$ 、 $q$  及  $m$  不变,将阻尼比  $k$  从 0.6 逐步增加至 2。此时,变尺度三稳系统在

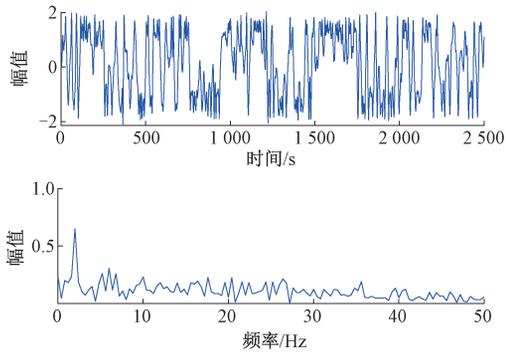
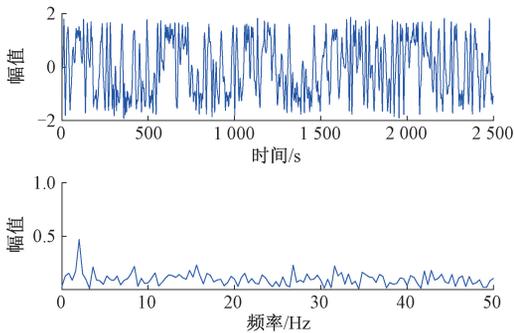
$k=2$ 、 $p=0.5$ 、 $q=1.2$ 、 $m=1$  参数条件下的输出波形及频谱如图 12 所示。可以看出,调节阻尼比后系统输出变量在 2 Hz 处有明显的峰值效应,这与待测信号的频率值一致,基于随机共振作用的频率提取方法有效。由此证明当噪声干扰过大时, $k$  值的增大对信号频率提取有积极作用。

图 12  $k=2$  时系统输出信号的波形及频谱Fig. 12 The waveform and spectrum of the output signal when  $k=2$ 

然后,为了验证其他平衡点参数调整对三稳系统输出的影响,保持其余参数不变,分别将  $p$  从 0.5 逐步减小至 0.1、将  $q$  从 1.2 增加至 1.4、将  $m$  从 1 增加至 1.5,仿真结果如图 13~15 所示。可以看出,3 个平衡点参数调整后的频谱图在 2 Hz 处都出现了不同程度的峰值效应,即产生随机共振作用,并通过该特性有效提取出待测信号的频率值。当待测信号的幅值为 0.3、当势函数平衡点参数  $p$ 、 $q$  及  $m$  分别取 0.1、1.4 和 1.5 时,与之匹配的最佳噪声强度  $D_{op}$  的值就是 4。仿真结果证实了表 2 中的理论分析结论。

图 13  $p=0.1$  时系统输出信号的波形及频谱Fig. 13 The waveform and spectrum of the output signal when  $p=0.1$ 

最后,对图 12~15 的频谱图进行对比分析可知,调整阻尼比  $k$  后不仅能够实现系统共振输出效应,而且系统输出变量在 2 Hz 处的幅值明显增大,约为 0.91。经过

图 14  $q = 1.4$  时系统输出信号的波形及频谱Fig. 14 The waveform and spectrum of the output signal when  $q = 1.4$ 图 15  $m = 1.5$  时系统输出信号的波形及频谱Fig. 15 The waveform and spectrum of the output signal when  $m = 1.5$ 

多次仿真测试可知, 阻尼比  $k$  调整时的仿真准确性最高, 频率提取的成功率接近 100%。另一方面, 平衡点参数  $p$ 、 $q$  及  $m$  调整后, 尽管也可以实现随机共振作用, 但系统输出变量在 2 Hz 处的幅值最大约为 0.5, 远小于阻尼比调整时的 0.91。这一结果说明: 参数  $p$ 、 $q$  及  $m$  调整时, Brownian 粒子的迁跃能力下降, 相应的仿真准确性也有所下降。经过多次仿真测试可知, 参数  $p$ 、 $q$  及  $m$  调整时频率提取的成功率仅为 70%。

综上所述, 当噪声强度过大时, 应优先考虑调整阻尼比  $k$  的值, 使待测信号、噪声信号和三稳非线性系统重新达到匹配状态; 当调整阻尼比  $k$  仍无法获得共振输出效应时, 再对系统平衡点参数进行微调, 使三者达到匹配状态。

### 3.2 实钻数据验证

为了进一步验证基于改进三稳随机共振系统的频率提取方法应用于导向钻具动态测量信号时的可行性和准确性, 利用陕西北部某井实钻所得数据对所提方法进行测试与分析。三轴加速度计传感器的安装位置及现场钻采设备如图 16 所示。



图 16 实钻井测试主要设备

Fig. 16 Schematic diagram of main equipment for field drilling testing.

钻井主要环境参数如表 3 所示, 实钻井钻进过程接近稳定直钻状态; 并且选用西安中星测控公司研制的 CS-3LAS 三轴加速度计作为测量传感器, 具体参数如表 4 所示。

表 3 实钻井测试基本参数

Table 3 Basic parameters of the field-drilling test

参数	数值
井深/m	1 740~1 805
钻压/MPa	10
井下温度/°C	40
泵压/MPa	6.6
钻井液密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.15
悬移质/kN	79
操作时间/h	75
转速/( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	120
倾角设定值/(°)	2.5

表 4 加速度计传感器的主要特性

Table 4 Characteristics of accelerometer sensors

	轴向	$x$	$y$	$z$
性能指标	极差/g	$\pm 3 (\pm 1 \sim \pm 100)$		
	带宽/Hz	0 - $\geq 500$		
	尺度因子/( $\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$ )	300 $\pm$ 30		
	校准/mg	$\leq 1$		
	非线性/(%·Fs)	$\leq 0.3$		
	零偏(25°C)/V	1.5 $\pm$ 0.1		
	零偏温度漂移/( $\text{mg}\cdot\text{°C}$ )	$\pm 1$		
环境特性	启动时间/s	$\leq 0.001$		
	工作温度/°C	-40 ~ +70		
	贮藏温度/°C	-40 ~ +125		
物理特性	防碰撞(0.5 ms)/g	10 <sup>4</sup>		
	重量/g	40		
	体积/ $\text{mm}^3$	19.5 $\times$ 18 $\times$ 10		

1) 可行性测试验证

与仿真实验相同,以  $x$  轴加速度计测量信号作为实验对象进行测试分析。首先,对采集到的数据进行离散化处理,然后将其输入双稳态非线性系统、标准三稳非线性系统以及双稳态混沌系统进行频率检测,结果如图 17 所示。

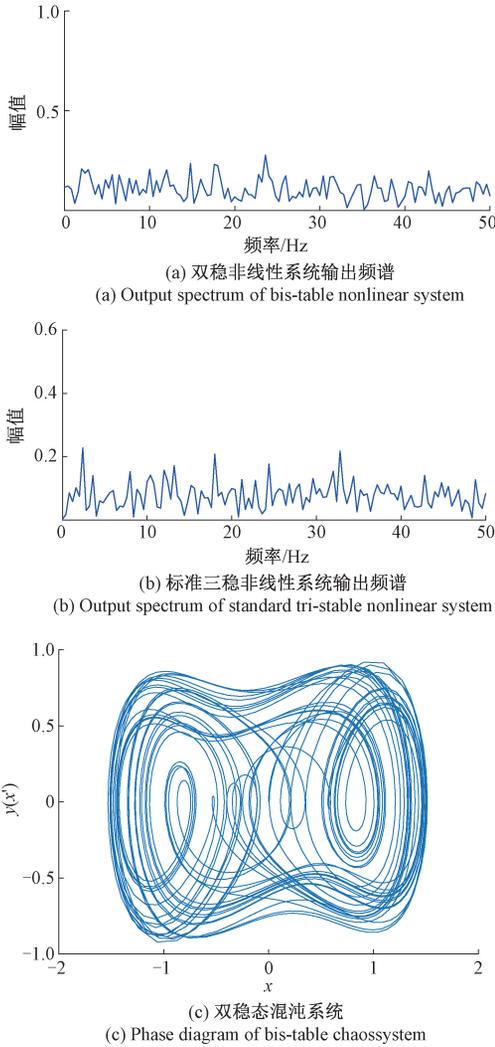


图 17 非线性系统频率检测结果

Fig. 17 Frequency detection results of nonlinear system

从图 17(a)、(b)可知,双稳非线性系统与标准三稳非线性系统的输出在各个频谱处的幅值没有明显区别,即没有出现共振输出效应。说明在当前转速和噪声干扰情况下,无法利用随机共振特性对传感器信号的频率值进行提取。另一方面,从图 17(c)可以看出,双稳混沌系统的输出相图仍为混沌态,而非大尺度周期态,说明该条件下,也无法通过混沌检测方法获取待测信号的频率值。

根据表 3 钻具转速的设定值可知, $x$  轴加计的实际

信号频率约为 2 Hz。首先,引入变尺度系数  $R=200$  对测量信号进行尺度变换;然后,根据表 2 归纳的调参规律对阻尼比和系统平衡点参数进行调节;最后,将变换后的  $x$  轴加计信号输入改进后的三稳非线性系统,并经过大量仿真测试可得,当  $k=2$ 、 $p=0.5$ 、 $q=1.5$ 、 $m=1$  时,基于尺度变换和参数调节三稳非线性系统的输出频谱如图 18 所示。

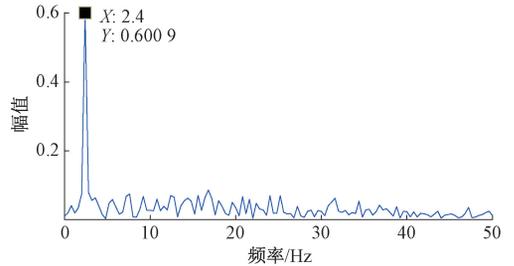


Fig. 18 The output spectrum of the system with variable scale and parameter adjustment

可以看出,系统输出频谱在 2.4 Hz 处的幅值明显增大,这是典型的随机共振作用。由此可知,通过尺度变换和参数调整可以有效识别出井下传感器信号的频率值,证明该方法对导向钻具动态测量信号的频率提取是可行的。此外,受强振动、高温高压等因素的影响,钻具实际转速与预设值之间势必存在一定的误差,导致提取出的实际测量信号的频率为 2.4 Hz,而不是 2.0 Hz。这种误差符合导向钻具动态测量的实际情况。

通过上述实钻井数据测试,验证了本文所提基于尺度变换和参数调节的三稳随机共振系统,可以有效提取出井下强振动噪声背景下动态测量信号的频率值,为后续钻具姿态解算提供准确的传感器测量数据。

2) 可靠性测试

为了进一步验证本文所提方法在用于导向钻具动态测量信号时的可靠性和稳定性,对同一时段  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴加计输出的 10 个信号采样点进行频率提取测试,并与第 2 节的 3 种频率提取方法进行对比分析,测试结果如表 5 所示。

表 5 可靠性测试对比

Table 4 Comparison of reliability testing (%)

系统名称	$x$ 轴	$y$ 轴	$z$ 轴
双稳态非线性系统	50	50	40
标准三稳态非线性系统	-	-	-
双稳态混沌系统	10	10	20
改进三稳态非线性系统	90	100	90

从测试结果可知,受频率参数过大、噪声干扰过强等因素影响,将导向钻具姿态测量信号输入标准三稳系统,随机共振作用失效,无法利用系统共振输出效应对信号频率进行识别。

双稳态混沌系统检测时要求待测信号与驱动信号的频率相匹配,然后受井下实际工况的影响,待测信号的频率并非固定不变,因此该方法的检测成功率很低,无法满足实际应用时对可靠性的需求。

将尺度变换和参数调节用于双稳态非线性系统,对其进行改进,可以在一定程度上实现系统共振输出效应,解决井下强振动弱 SNR 信号频率提取的问题。但是双稳态模型在应用时可靠性较低,三轴加速度计信号的频率提取成功率均不超过 50%,对后续姿态解算的准确性造成巨大偏差,进而影响导向钻具的井眼轨迹控制。

最后,将尺度变换和参数调整后的三稳非线性系统用于三轴姿态测量信号,可以看出频率提取的成功率接近 100%,可靠性最高,由此证明将本文所提方法应用于导向钻具动态测量信号频率提取不仅是切实可行的,而且具备极高的稳定性。

## 4 结 论

导向钻具动态测量过程中,受底部钻具强振动影响,姿态测量信号中含有多频高幅值噪声干扰信号。针对这一问题,本文提出基于尺度变换与参数调节三稳随机共振系统的井下弱 SNR 信号频率提取方法。通过实验室振动平台仿真试验和实钻井试验验证,得到如下结论。

1) 当大频率参数信号输入标准三稳非线性系统时,利用本文提出的变尺度计算方法,可以使系统输出有效产生共振输出效应,从而提取出待测信号的频率值。

2) 当井下噪声强度过高时,通过对系统阻尼比和平衡点参数进行调节,获得与噪声强度匹配的系统参数,可实现系统共振输出效应,仿真结果证明了该方法的可行性和可靠性。

## 参考文献

[ 1 ] 杨一,程为彬,汪跃龙,等. 随钻弱 SNR 信号的 Duffing 振子混沌检测与恢复[J]. 仪器仪表学报,2020,41(2):235-244.  
YANG Y, CHENG W B, WANG Y L, et al. Chaos detection and parameters recovery of Duffing oscillator for

weak SNR signal while drilling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(2):235-244.

- [ 2 ] 郭涛,程为彬,张夷非,等. 融合整段多项式和插值的井下姿态非线性校正[J]. 石油学报,2024,45(11):1690-1698.  
GUO T, CHENG W B, ZHANG Y F, et al. Non-linear correction of downhole attitude by fusing piecewise polynomial and interpolation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024,45(11):1690-1698.
- [ 3 ] 祝效华,胡志强. 基于钻头破岩钻进的下部钻具横向振动特性研究[J]. 振动与冲击,2014,33(17):90-93.  
ZHU X H, HU ZH Q. Lateral vibration characteristics analysis of a bottom hole assembly based on interaction between bit and rock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(17):90-93.
- [ 4 ] 程为彬,甘源滢,程贤箬,等. 垂直导向钻井工具安装误差的单象限校正[J]. 仪器仪表学报,2018,39(6):41-47.  
CHENG W B, GAN Y Y, CHENG X R, et al. Single quadrant correction of installation error for vertical steering drilling tool[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(6):41-47.
- [ 5 ] 程为彬,胡少兵,张夷非,等. 旋转导向钻井工具近垂直姿态校正矩阵误差的等角距均衡校正[J]. 仪器仪表学报,2022,43(6):19-28.  
CHENG W B, HU SH B, ZHANG Y F, et al. Equiangular interval balance correction of correction matrix error for rotary steering drilling tool under near-vertical position[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(6):19-28.
- [ 6 ] RAI A, ROY A, QAMAR S, et al. Modeling and simulation of FIR filter using distributed arithmetic algorithm on FPGA[J]. Multimedia Tools and Applications, 2024,83(31):75855-75868.
- [ 7 ] 徐肃,张彦军,徐贵,等. 基于 Spc-Shrink 平稳小波变换的 GIS 局部放电降噪方法[J]. 电子测量技术,2022,45(17):159-166.  
XU S, ZHANG Y J, XU G, et al. Based on Spc-Shrink stationary wavelet transform de-noising method of partial discharge for GIS device[J]. Electronic Measurement Technology, 2022,45(17):159-166.
- [ 8 ] 韩冬,孙伟,陈龙,等. 随钻姿态测量重力加速度自适应提取算法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(2):17-25.

- HAN D, SUN W, CHEN L, et al. Adaptive extraction algorithm of gravity acceleration in attitude measurement while drilling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(2):17-25.
- [9] 师浩伟,王薇,裴东兴,等. 基于改进小波变换的火炮膛压测试降噪方法[J]. 国外电子测量技术,2022,41(3):41-44.
- SHI H W, WANG W, PEI D X, et al. Noise reduction method of gun bore pressure test based on improved wavelet transform pressure test[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022,41(3):41-44.
- [10] ZHOU X L, LI G L, ZHANG H B, et al. Variable step size methods of the hybrid affine projection adaptive filtering algorithm under symmetrical non-Gaussian noise[J]. Symmetry, 2023,15(6):1158.
- [11] WU ZH D, ZHANG ZH, ZHENG L, et al. The denoising method for transformer partial discharge based on the whale VMD algorithm combined with adaptive filtering and wavelet thresholding[J]. Sensors, 2023,23(19):8085.
- [12] 李炜,刘禹,李立刚,等. 基于自适应降噪的柱塞泵故障音频特征提取方法[J]. 国外电子测量技术,2023,42(1):1-6.
- LI W, LIU Y, LI L G, et al. Audio feature extraction method for plunger pump fault based on adaptive noise reduction[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023,42(1):1-6.
- [13] 乔岩茹,陈建龙,侯文. 基于布谷鸟算法优化随机共振参数的轴承故障检测算法[J]. 电子测量技术,2021,44(20):88-93.
- QIAO Y R, CHEN J L, HOU W. Cuckoo search algorithm based optimization of stochastic resonance parameters for bearing fault detection[J]. Electronic Measurement Technology, 2021,44(20):88-93.
- [14] 李靖,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, HAN P, ZHU Y. Application of an improved stochastic resonance technique detecting ship's shaft-rate electric field signal[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021,40(4):130-134.
- [15] YANG Y, DING Q, GAO Y, et al. Chaotic effect-based array Duffing systems with improved nonlinear restoring force for weak signal detection in dynamic MWD[J]. Sensors, 2023,23(17):7598.
- [16] RAFEZI H, HASSANI F. Drilling signals analysis for tricone bit condition monitoring[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021,31(2):187-195.
- [17] WANG Y S, ZHANG S, GUO H, et al. Hybrid time-frequency algorithm for active sound quality control of vehicle interior noise based on stationary discrete wavelet transform[J]. Applied Acoustics, 2021,171:107561.
- [18] 贺利芳,徐家琦,黄笑笑. 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[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(5):98-111.
- HE L F, XU J Q, HUANG X X. Bearing fault detection based on coupled piecewise symmetric tri-stable stochastic resonance driven by dual-input signals[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024,38(5):98-111.
- [19] HU B B, ZHANG SH, PENG M, et al. Weak feature extraction of local gear damage based on underdamped asymmetric periodic potential stochastic resonance[J]. Symmetry, 2021,13(11):2008.
- [20] ZHANG X S, ZHANG H X, GUO J SH, et al. Research on mud pulse signal detection based on adaptive stochastic resonance[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017,157:643-650.
- [21] KIM H, TAI W C, ZUO L. Stochastic resonance energy harvesting from general rotating shaft vibrations[C]. SPIE Proceedings, 2017:101641C.
- [22] 陈晨,程为彬,康思民,等. 井下声波通讯信号的随机共振检测方法[J]. 计算机仿真,2015,32(3):230-233,277.
- CHEN CH, CHENG W B, KANG S M, et al. Stochastic resonance detection method of borehole acoustic communication signal[J]. Computer Simulation, 2015,32(3):230-233,277.
- [23] YANG Y, LI F, ZHANG N, et al. Research on the cooperative detection of stochastic resonance and chaos for weak SNR signal in measurement while drilling[J]. Sensors,2021,21(9):3011.
- [24] 赖志慧,冷永刚. 三稳系统的动态响应及随机共振[J]. 物理学报,2015,64(20):81-92.
- LAI ZH H, LENG Y G. Dynamic response and stochastic

resonance of a tri-stable system [ J ]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(20):81-92.

- [25] ZHANG C L, LAI ZH H, TU ZH SH, et al. Stochastic resonance induced weak signal enhancement in a second-order tri-stable system with single-parameter adjusting[ J ]. Applied Acoustics, 2024, 216:109753.

## 作者简介



**杨一** (通信作者), 2007 年于西安石油大学获得学士学位, 2011 年于昆明理工大学获得硕士学位, 2016 年于西北工业大学获得博士学位, 现为西安石油大学副教授, 主要研究方向为导向钻井姿态测量、微弱信号检测以及智能控制。

E-mail: yiyang@xsyu.edu.cn

**Yang Yi** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Shiyou University in 2007, M. Sc. degree from

Kunming University of Science and Technology in 2011, and Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2016. Now he is an associate professor at Xi'an Shiyou University. His main research interests include steering drilling attitude measurement, weak signal detection and intelligent control.



**周可馨**, 2022 年于西安石油大学获得学士学位, 现为西安石油大学硕士研究生, 主要研究方向为随钻动态测量、井下弱信号检测的建模与仿真。

E-mail: 1900481334@qq.com

**Zhou Kexin** received her B. Sc. degree from Xi'an Shiyou University in 2022. Now she is a M. Sc. candidate at Xi'an Shiyou University. Her main research interests include dynamic measurement while drilling, modeling and simulation of weak signal detection downhole.