

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514021

# 钻具姿态动态测量信号的阵列三稳混沌系统检测<sup>\*</sup>

杨一, 卢劲因, 陈娇娜, 韩彬彬

(西安石油大学电子工程学院 西安 710065)

**摘要:** 导向钻井工具姿态动态测量过程中, 底部钻具组合与岩石相互作用以及钻柱与井壁的碰撞产生强烈振动, 导致原始测量信号中存在多频、高幅值的噪声干扰, 造成钻具姿态测量信号的信噪比极低, 甚至完全湮灭在噪声中, 严重影响井斜角等姿态参数解算的准确性。为了解决这一问题, 提出了一种适用于导向钻具姿态动态测量信号的阵列三稳混沌系统检测方法。首先, 对钻具测量信号进行变尺度处理, 即对特征信号的频率值进行重构和变换, 使其满足三稳系统输出相变的限制条件; 然后, 考虑到钻具测量信号初相角随机变化导致传统频率检测方法出现偏差的问题, 提出一种基于阵列三稳混沌系统的频率检测模型, 依托驱动信号不同的混沌方程组协同工作, 实现全相位覆盖的频率检测方法, 解决钻具测量信号初相角对频率检测结果的影响; 最后, 设计一种阵列三稳混沌系统参数估计模型, 对钻具测量信号的幅值和相位进行同步估计, 进而恢复出完整的钻具测量信号。仿真和实钻数据实验表明, 该方法可检测信号的信噪比阈值低至-18 dB, 解算后的井斜角误差低于1°, 相较于传统滤波方法在极低信噪比场景下的信号失真问题, 以及双稳混沌系统因相位覆盖不全导致的检测偏差问题, 该方法在信号检测准确性、井斜角解算精度方面均展现出显著优势。

**关键词:** 钻具姿态动态测量; 阵列三稳混沌系统; 频率检测; 参数估计

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

## Detection of array tri-stable chaotic system for dynamic measurement signals of drilling tool attitude

Yang Yi, Lu Jinnan, Chen Jiaona, Han Binbin

(College of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In the process of attitude dynamic measurement for steering drilling tool, the bottom drilling tool combination interacts with the rock and the collision between the drilling string and shaft wall generates strong vibration, which leads to multi-frequency and high-amplitude noise interference in the original measurement signal, resulting in the extremely low signal-to-noise ratio of the drilling tool attitude measurement signal, or even completely annihilated in the noise. This severely affects the accuracy of attitude parameter calculation such as inclination angle. In order to solve this problem, this paper proposes an array tri-stable chaotic system detection method used for the dynamic measurement signal. Firstly, a variable-scale processing of the drilling tool measurement signals is performed on the drilling tool measurement signals, which involves reconstructing and transforming the frequency values of the characteristic signals to meet the constraints of phase transition of the tri-stable system output. Second, considering the deviation of traditional frequency detection methods caused by the random variation of the initial phase angle of drilling tool measurement signals, a frequency detection model based on the array tri-stable chaotic system is proposed, relying on the collaborative work of the different chaotic equations for driving signals, a full-phase coverage frequency detection method is realized to eliminate the influence of the initial phase angle of drilling tool measurement signals on the frequency detection results. Finally, a parameter estimation model based on another array tri-stable chaotic system is designed to synchronously estimate the amplitude and phase of the drilling tool measurement signal, and then recovers the complete drilling tool measurement signal. Simulation and real drilling data experiments show that this method can detect the signal-to-noise ratio threshold of the measured signal as low as -18 dB, and that the errors of the inclination are

lower than 1°, Compared with the signal distortion problem of traditional filtering methods in extremely low SNR scenarios and the detection deviation problem of bi-stable chaotic systems due to incomplete phase coverage, this method exhibits significant advantages in both signal detection accuracy and inclination angle calculation precision.

**Keywords:** dynamic measurement of drilling tool attitude; array tri-stable chaotic system; frequency detection; parameter estimation

## 0 引言

导钻工具姿态动态测量能够在钻井过程中实时获取钻头井斜角、方位角和工具面角等关键姿态参数,在保证井眼轨迹动态稳定的的同时,还能有效提高钻具姿态测量的实时性<sup>[1-3]</sup>。然而,由于钻头与岩石的相互作用以及钻柱与井壁的碰撞所产生的强烈振动,使得姿态测量信号中存在复杂的强噪声干扰。研究表明,近钻头振动信号通常可达 10~30g,而有用信号通常约为 1g,因此传感器信号的信噪比会低至 -20 dB 左右,甚至更低<sup>[4-5]</sup>。另一方面,噪声的频谱分布呈现高频性、宽频性以及随机性等特征,导致噪声信号与有用信号频率混叠。因此,如何在多频、高幅值噪声背景下识别出传感器测量信号,是导向钻井工具姿态动态测量领域亟待解决的问题。

数字滤波是最早应用于井下传感器信号处理的技术方法<sup>[6-9]</sup>。在钻井液压力信号的处理中,通过设计合适的数字带通滤波器,可以有效地去除噪声干扰,提取出有用的压力信号,完成地面与井下的信息传输,实现对井下工况和钻具姿态参数的实时监测与控制。文献[10]采用有限脉冲响应(finite impulse response, FIR)数字滤波对泥浆脉冲信号进行降噪处理,实验结果表明,该系统能够对泥浆脉冲信号进行正确的提取和识别,且解码过程简单实用。但仍存在信号检测门限高,抗噪性能差等缺陷;并且在抑制噪声的同时,也会损害有用信号的相关信息。

针对上述问题,一些新型的信号处理方法被用于钻具姿态动态测量。文献[11-12]提出一种新的粒子群优化粒子滤波算法,用于非线性振动信号的实时滤波降噪。实验表明,该算法具有更低的均方根误差、更短的运行时间和更稳定的滤波性能。然而,该算法结合了粒子滤波和粒子群优化的双重计算过程,导致计算复杂度显著增加,实际应用时难以满足实时性的要求。文献[13-14]设计一种基于集合经验模态分解的脉冲信号滤波算法,将单位脉冲信号、周期噪声信号和高斯白噪声信号相结合,对随钻测量实时泥浆信号进行处理。但该方法存在分解次数多、且每次分解需处理多个本证模态函数(intrinsic mode function, IMF)分量,导致计算量极大,无法满足钻具姿态动态测量对实时性的要求。文献[15]提出一种基于深度学习的泥浆脉冲信号识别方法。由小波神经网络和自编码器组成检测模型,对泥浆脉冲信号分类进行训练并完成测试。实验结果表明,在相同的信噪比下,该

方法的识别性能优于现有方法。然而,自编码器的训练需大量数据与时间,低信噪比下需要更多的迭代次数以收敛。

近年来,研究人员对基于非线性系统动力学行为的微弱信号检测方法进行了深入研究<sup>[16-17]</sup>。其中,非线性系统的混沌相变特性因其具有对微弱周期信号敏感和对噪声信号免疫的突出特点,受到广泛关注。基于混沌相变特性的微弱信号检测方法不受噪声频谱的影响,且可检测信号的信噪比阈值极低,这种优势使其在实际应用中具有重要意义<sup>[18-19]</sup>。目前关于混沌相变在钻具姿态动态测量信号检测中的研究较少。Yang 等<sup>[20]</sup>提出一种基于阵列杜芬系统混沌效应的动态测量信号检测方法,利用杜芬系统所产生的混沌效应,对井下姿态测量信号进行频率检测和参数估计,从而得到完整的传感器信号。Li 等<sup>[21]</sup>通过改进的变尺度-凸峰法,利用随机 Melnikov 方法得到混沌阈值的解析表达式,明确了初相位对混沌阈值的影响,从而识别出微弱信号的频率。

在众多可以产生混沌相变特性的系统中,三稳非线性系统因其更加稳定的系统输出状态,且对微弱信号的检测性能优于单稳、双稳非线性系统,成为混沌相变检测领域的研究热点<sup>[22-25]</sup>。综上所述,本文以三稳非线性系统为理论框架,提出一套适用于钻具姿态动态测量的阵列三稳混沌系统微弱信号检测方案,对钻具测量信号进行频率检测和参数估计,实现钻具姿态参数的实时、精确测量。

## 1 三稳混沌系统频率检测的基本原理

典型三稳混沌系统的表达式如式(1)所示。

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 + x^5 = A \sin(\omega t) \quad (1)$$

式中: $x$  为方程的解、也称系统输出,是时间  $t$  的函数; $k$  为阻尼系数,通常设为 0.5;表达式 $(-x+x^3+x^5)$  称为三稳非线性系统恢复力; $A \sin(\omega t)$  为驱动信号, $A$  和  $\omega$  分别表示驱动信号的幅值和角频率, $\omega$  一般取 1 rad/s。

由于非线性恢复力项的存在,三稳系统的输出相轨迹随驱动信号幅值  $A$  的变化依次经历同宿轨道、分岔、混沌以及大尺度周期状态。系统输出状态与幅值  $A$  之间的变化关系如图 1 所示,可以看出  $A$  在 0.588 处系统输出状态发生突变,研究可知  $A=0.588$  是三稳系统输出相轨迹由混沌转为大尺度周期态的临界值。

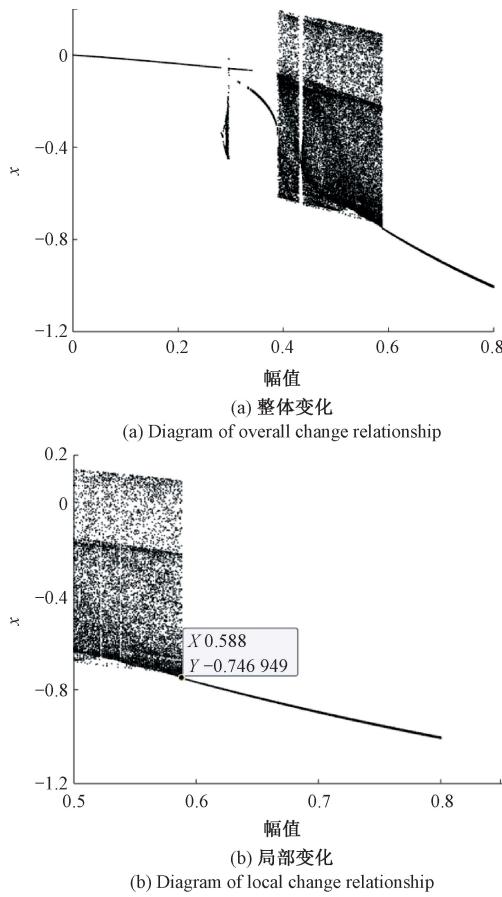


图1 三稳系统输出状态与幅值A的变化关系

Fig. 1 Change relationship between the output state and the amplitude A of the tri-stable system

由图1可知,当三稳系统处于混沌和大尺度周期之间的临界态时,幅值A的微小变化能够引起系统状态的根本转变。基于这一特性,建立基于三稳混沌系统的微弱信号频率检测模型如式(2)所示。

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 + x^5 = A_c \sin(t) + s(t) + n(t) \quad (2)$$

式中: $A_c$ 为驱动信号的幅值,略小于临界幅值A,本文取0.58;  $s(t)$ 是待测的有用信号;  $n(t)$ 是噪声干扰信号。

假设  $s(t)$  和  $n(t)$  分别如式(3)、(4)所示。

$$s(t) = 0.01 \sin(t) \quad (3)$$

$$n(t) = (2 \times D)/2 \times g(t) \quad (4)$$

式中: $D$ 表示噪声强度,取0.011;  $g(t)$ 是均值为0、方差为1的高斯白噪声信号。

信噪比定义如式(5)所示。

$$SNR = 10 \times \log(p_a/p_n) \quad (5)$$

式中: $p_a$ 表示有用信号的均方值; $p_n$ 表示噪声信号的均方值。

计算可知,式(2)中有用信号与噪声干扰信号的SNR约为-23.4 dB。此时,很难通过频谱分析直接从噪声中获取有用信号的信息。然而,如果将三稳混沌系统

置于混沌态向大尺度周期态转变的临界状态,并将信号  $s(t) + n(t)$  作为该状态下系统的输入,即可通过系统输出相轨迹的变化识别出有用信号的频率值。具体而言,不考虑输入信号  $s(t) + n(t)$  时,三稳系统的输出相轨迹如图2所示;输入含噪信号  $s(t) + n(t)$  后,系统输出相轨迹如图3所示。图2~3中x轴表示三稳系统的解,即系统输出响应  $x$ 、y轴表示系统输出响应的一阶导数,即  $x'$ 。

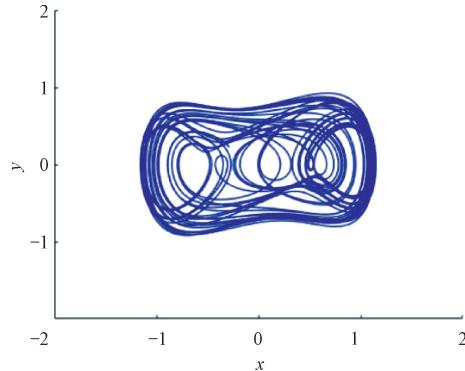


图2 未加输入信号时三稳系统输出相轨迹

Fig. 2 Trajectory diagram of the tri-stable system without the input signal

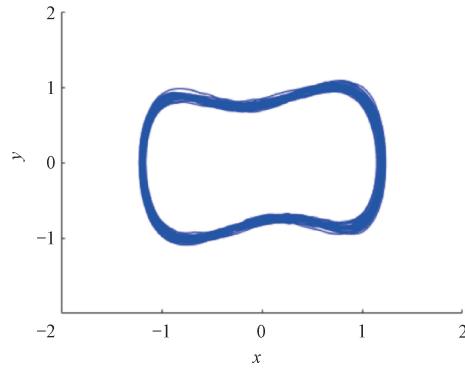


图3 加输入信号后三稳系统输出相轨迹

Fig. 3 Trajectory diagram of the tri-stable system after adding the input signal

由图2和3仿真结果可知,当待测信号频率与驱动信号频率一致时,叠加后幅值的变化可引起系统输出相轨迹的显著变化,即由混沌态跃变至大尺度周期态。噪声干扰信号会使相轨迹的周边变得毛糙,但并不影响系统状态本身。因此,利用三稳混沌系统对噪声的免疫性和对微弱信号的敏感性可成功识别出复杂噪声背景下的待测信号。这就是利用三稳混沌系统进行微弱信号检测的基本原理。

尽管利用三稳混沌系统可有效识别出复杂噪声背景下的微弱信号,但将其应用于井下钻具姿态动态测量时,仍存在的限制为:

- 1) 钻具姿态测量信号的角频率主要由转速决定,通

常在  $2\pi \sim 6\pi$  范围, 如果将驱动信号的角频率设置在这一区间, 系统动态响应会变差, 不易出现混沌和大尺度周期态; 并且驱动信号频率的变化会导致驱动信号幅值  $A_c$  难以确定。

2) 实际应用时, 有用信号  $s(t)$  的初相角可能取任意值, 当其不为 0 时, 即使  $s(t)$  的频率与驱动信号频率一致, 也会影响系统输出相轨迹, 进而对上述讨论结果的准确性产生影响。因此, 应用时需要对待测信号的初相角进行分析。

3) 现有基于混沌效应的微弱信号检测方法不能同时估计信号的多个参数, 必须逐一进行测定, 且传统基于二分法的相位参数估计方法效率较低, 难以满足钻具姿态动态测量对实时性的要求。

## 2 基于阵列三稳混沌系统的频率检测

### 2.1 基于变尺度三稳混沌系统的大频率信号检测方法

针对实际应用中存在的第 1 个限制, 本文将尺度变换理论与三稳非线性系统混沌检测相结合, 设计适用于大频率信号的弱信号检测方法。

假设有用信号  $s(t) = \gamma \sin(\omega t)$ , 保持式(2)中其他参数不变, 引入变尺度系数  $K$ , 将有用信号在时间轴上缩放  $K$  倍, 则新的时间尺度  $t_1 = K \cdot t$ 。对于钻具姿态动态测量信号,  $K \in [2\pi, 6\pi]$ 。假设钻具测量信号的角频率  $\omega = K \neq 1 \text{ rad/s}$ , 则有用信号如式(6)所示。

$$s(t_1) = \gamma \sin(\omega t_1) = \gamma \sin(K \times t_1 / K) = \gamma \sin(t_1) \quad (6)$$

由此可知, 钻具测量信号的角频率在新的时间轴上从  $K$  压缩到  $1 \text{ rad/s}$ , 满足三稳混沌系统对信号角频率的限制要求。然而, 在实际应用时, 无法直接通过式(6)中的线性变换对钻具动态测量信号进行角频率重构。因此, 通过调整数值计算的解算步长, 从而达到角频率变换的目标。具体步骤为:

假设钻具测量信号的采样频率为  $f_s$ , 相应的数值计算步长如式(7)所示。

$$T = 1/f_s \quad (7)$$

引入变尺度系数  $K$ , 则数值计算步长更新为式(8)。

$$T_1 = K \times T = K/f_s \quad (8)$$

通过上述变换, 将采样频率为  $f_s$ 、角频率为  $\omega$  的信号转化为采样频率为  $f_s/K$ 、角频率为  $\omega/K$  的信号, 完成钻具姿态动态测量信号的频率重构。然后, 将变换后的信号输入三稳混沌检测系统, 通过系统输出相轨迹识别出有用信号的频率值。

由此可知, 变尺度改变的是待测有用信号的频率而非驱动信号, 无论有用信号的频率值是多少都将通过变尺度处理压缩至  $1 \text{ rad/s}$ , 从而满足三稳混沌系统频率检测的第 1 个限制条件。此外, 变尺度处理仅对待测有用

信号的频率进行改变, 即在时间轴上进行压缩或放大, 并不改变系统其他参数或待测信号的数值, 因此不会影响检测结果的准确性。

### 2.2 基于阵列三稳混沌系统的全相位频率检测

为了研究待测信号初相角对频率检测结果的影响, 在式(2)中设  $s(t) = 0.01 \sin t$  和  $0.01 \sin(t + 180^\circ)$ , 其余参数不变, 得到系统输出相轨迹如图 4 和 5 所示。可以看出, 当待测信号的初相角为  $180^\circ$  时, 系统相轨迹仍为混沌态, 说明频率检测失效。

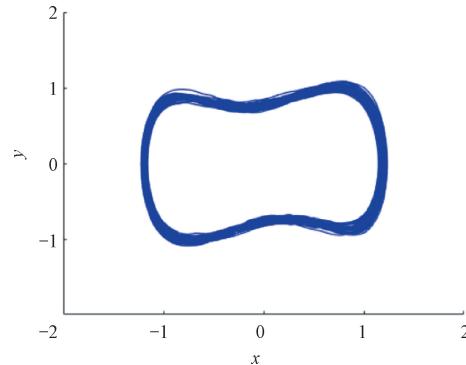


图 4 待测信号初相角为  $0^\circ$  时系统输出相轨迹

Fig. 4 Trajectory diagram of the tri-stable system while initial phase angle of the measured signal is  $0^\circ$

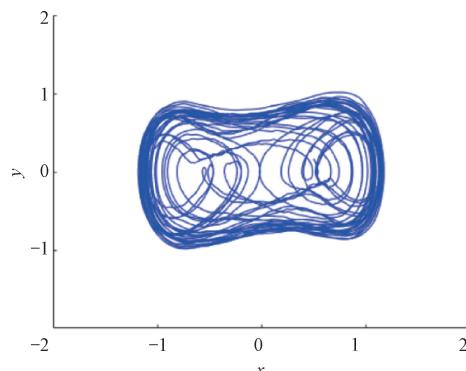


图 5 待测信号的初相角为  $180^\circ$  时系统输出相轨迹

Fig. 5 Trajectory diagram of the tri-stable system while initial phase angle of the measured signal is  $180^\circ$

为解决初相角对检测结果的影响, 设计一种基于阵列三稳混沌系统的全相位频率检测模型。假定有用信号的角频率已通过变尺度处理归算至  $1 \text{ rad/s}$ , 其余参数不变, 得到考虑初相角的三稳混沌系统频率检测模型如式(9)所示。

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 + x^5 =$$

$$0.58 \sin(t + \gamma) + \eta \sin(t + \varphi) + n(t) \quad (9)$$

式中:  $\eta$  和  $\varphi$  分别为有用信号的幅值和初相角;  $\gamma$  为驱动信号的初相角。

将式(9)的右端前两项合并化简,可得:

$$\begin{aligned} 0.58\sin(t + \gamma) + \eta\sin(t + \varphi) &= (0.58\sin t \cos \gamma + \\ 0.58\cos t \sin \gamma) + (\eta \sin t \cos \varphi + \eta \cos t \sin \varphi) = \\ (0.58\sin \gamma + \eta \sin \varphi) \cos t + (0.58\cos \gamma + \eta \cos \varphi) \sin t = \\ \sqrt{(0.58\sin \gamma + \eta \sin \varphi)^2 + (0.58\cos \gamma + \eta \cos \varphi)^2} \sin(t + \delta) = \\ \sqrt{0.58^2 + 1.16\eta \sin \gamma \sin \varphi + 1.16\eta \cos \gamma \cos \varphi + \eta^2} \sin(t + \delta) = \\ \sqrt{0.58^2 + 1.16\eta \cos(\varphi - \gamma) + \eta^2} \sin(t + \delta) \quad (10) \end{aligned}$$

由式(10)可以看出,有用信号和驱动信号叠加后组成一个三角函数。 $\delta$  为三角函数的初相角,对叠加信号的幅值影响不大,其作用主要是改变轨迹解的初始位置。对叠加信号幅值起主导作用的是三角函数的幅值,因此建立关于三角函数幅值的表达式如式(11)所示。

$$\sqrt{0.58^2 + 1.16\eta \cos(\varphi - \gamma) + \eta^2} \geq 0.59 \quad (11)$$

由图 1 仿真结果可知,系统输出相轨迹发生变化的临界幅值为 0.588,因此式(11)右端的 0.59 表示使系统输出相轨迹发生变化的最小幅值。当有用信号幅值  $\eta$  已知时,可根据式(11)求取有用信号与驱动信号初相角的差。钻具姿态测量信号的幅值一般在 0.02~0.1,因此将  $\eta=0.02$  代入式(11),可得式(12)。

$$\begin{aligned} -\arccos \frac{0.59^2 - 0.58^2 - 0.02^2}{1.16 \times 0.02} < \varphi - \gamma < \arccos \frac{0.59^2 - 0.58^2 - 0.02^2}{1.16 \times 0.02} \quad (12) \end{aligned}$$

求解式(12)可知,  $\varphi - \gamma$  的变化范围为  $(-60.85^\circ, 60.85^\circ)$ ;另一方面,由仿真验证可得,当  $\gamma=0$  时,式(9)所示三稳混沌系统可检测信号初相角  $\varphi$  的范围为  $(-60^\circ, 60^\circ)$ ,与理论计算结果基本一致。此外,如式(12)所示,如果钻具测量信号的幅值  $\eta$  增大,  $\varphi$  的可变范围也相应增加,所以上述关于  $\varphi$  的可检测范围适用于所有幅值  $\geq 0.02$  的钻具姿态测量信号。

由以上分析可知,当三稳混沌系统其他参数确定时,有用信号的初相角必须在一定范围内,才能通过系统相轨迹变化识别出有用信号的频率,即有用信号的初相角存在可检测窗口,如图 6 所示。

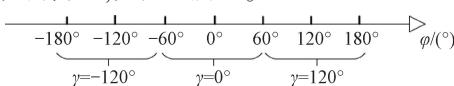


图 6 不同初相位时阵列三稳系统可检测窗口

Fig. 6 Detectable window for array tri-stable systems under different initial phase

从图 6 可以看出,如果要在  $[-\pi, \pi]$  整个检测窗口内全覆盖,可通过调整驱动信号的初相角  $\gamma$  实现。具体来说,当  $\gamma$  设置为  $-120^\circ$  时,  $\varphi$  对应的可检测窗口从  $-180^\circ$  到  $-60^\circ$ ;当  $\gamma$  设置为  $120^\circ$  时,  $\varphi$  对应的可检测窗口从  $60^\circ$  到  $180^\circ$ 。因此,提出将 3 个驱动信号初相角不同的非线

性方程组成阵列三稳混沌系统,如式(13)所示,进而实现钻具测量信号的全相位频率检测。

$$\begin{cases} \ddot{x} + 0.5\dot{x} - x + x^3 + x^5 = 0.58\sin(t + 0^\circ) + \\ \eta\sin(t + \varphi) + n(t) \\ \ddot{x} + 0.5\dot{x} - x + x^3 + x^5 = 0.58\sin(t + 120^\circ) + \\ \eta\sin(t + \varphi) + n(t) \\ \ddot{x} + 0.5\dot{x} - x + x^3 + x^5 = 0.58\sin(t - 120^\circ) + \\ \eta\sin(t + \varphi) + n(t) \end{cases} \quad (13)$$

当钻具测量信号分别代入式(13)阵列三稳系统中的 3 个方程,只要其中任意一个方程的输出相轨迹发生变化,就可以认为存在与驱动信号同频的有用信号,进而检测出频率值。因此,阵列三稳混沌系统的提出,可有效解决钻具测量信号初相角对频率检测的影响,从而满足三稳混沌系统频率检测的第 2 个限制条件。

### 3 参数估计

结合变尺度技术和提出的阵列三稳混沌系统,可有效解决井下钻具姿态动态测量信号的频率检测问题。然而,为了获取钻具实时姿态解算信息,还需确定动态测量信号的幅值和初相角,进而恢复出完整的信号波形。为解决这一问题,提出一种基于阵列三稳混沌系统的信号参数同步估计方法。

由第 2 章分析结果可知,当式(11)成立时,三稳非线性系统的输出相轨迹将发生变化。假设  $\lambda_1$  为系统输出相轨迹刚从混沌跃变为大尺度周期态的驱动信号幅值,表达式如式(14)所示。

$$\sqrt{\lambda_1^2 + 2\lambda_1\eta\cos(\varphi - \gamma) + \eta^2} = 0.59 \quad (14)$$

式中:  $\lambda_1$  的值可通过观察系统输出相轨迹确定。

$\lambda_1$  确定后,式(14)是一个以钻具测量信号幅值  $\eta$ 、相位  $\varphi$  为变量的二元方程。因此,可以用类似的方法建立另一个关于  $\eta$  和  $\varphi$  的二元方程,然后通过求解两个二元方程确定  $\eta$  和  $\varphi$  值。值得注意的是,由于  $\varphi$  的变化范围是从  $-\pi$  到  $\pi$ ,所以考虑  $\varphi$  为负的情况,还需要再增加一个类似的二元方程。因此,建立基于阵列三稳混沌系统的信号参数估计模型如式(15)所示。

$$\begin{cases} \ddot{x} + 0.5\dot{x} - x + x^3 + x^5 = \lambda_1\sin(t + 0^\circ) + \\ \eta\sin(t + \varphi) + n(t) \\ \ddot{x} + 0.5\dot{x} - x + x^3 + x^5 = \lambda_2\sin(t + 180^\circ) + \\ \eta\sin(t + \varphi) + n(t) \\ \ddot{x} + 0.5\dot{x} - x + x^3 + x^5 = \lambda_3\sin(t + 90^\circ) + \\ \eta\sin(t + \varphi) + n(t) \end{cases} \quad (15)$$

首先,令驱动信号初相角  $\gamma$  分别 =  $0^\circ$ 、 $\pi/2^\circ$  和  $\pi^\circ$ ,如式(15)所示;然后,将钻具测量信号分别输入式(15)的

3 个阵列方程中, 并调整  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$ ; 最后, 观察阵列三稳系统的输出相轨迹, 记录相变发生时  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  的幅值, 将其分别代入式(14), 可得关于钻具测量信号幅值  $\eta$  和相位  $\varphi$  的二元方程组如式(16)所示。

$$\begin{cases} \lambda_1^2 + 2\lambda_1\eta\cos\varphi + \eta^2 = 0.59^2 \\ \lambda_2^2 - 2\lambda_2\eta\cos\varphi + \eta^2 = 0.59^2 \\ \lambda_3^2 + 2\lambda_3\eta\sin\varphi + \eta^2 = 0.59^2 \end{cases} \quad (16)$$

求解上述方程, 可得:

$$\begin{cases} \eta = \sqrt{0.59^2 - \lambda_1\lambda_2} \\ \varphi = \arccos\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2\sqrt{0.59^2 - \lambda_1\lambda_2}}\right) \cap \\ \arcsin\left(\frac{\lambda_1\lambda_2 - \lambda_3^2}{2\lambda_3\sqrt{0.59^2 - \lambda_1\lambda_2}}\right) \end{cases} \quad (17)$$

式(17)是钻具测量信号幅值和相位的估算式。基于以上分析, 在处理实际姿态测量信号时, 其频率检测与参数估计的步骤为:

1) 确定三稳混沌系统的初始参数。在式(2)中, 设置阻尼比  $k$  为 0.5、驱动信号幅值和角频率分别为 0.58 和 1 rad/s、系统数值计算的初值  $(x(0), x'(0))$  为  $(0, 0)$ ;

2) 将钻具测量信号输入式(9), 令驱动信号初相角分别  $= 0, \pm 2\pi/3$ , 且信号幅值  $\geq 0.02$ , 得到用于频率检测的阵列三稳混沌系统;

3) 引入变尺度系数  $K$ , 以计算步长  $T_1 = K/f_s$  求解上述阵列方程, 将采样频率为  $f_s$ 、角频率为  $\omega$  的钻具测量信号转化为采样频率为  $f_s/K$ 、角频率为  $\omega/K$  的新信号;

4) 调整变尺度系数  $K$  并观察阵列方程的输出相轨迹, 只要其中一个方程的相轨迹发生跃变, 就说明存在频率为  $K$  的钻具测量信号;

5) 设计适用于参数估计的阵列三稳混沌系统, 令驱动信号的初相角分别等于  $0, \pi/2$  和  $\pi$ , 并将确定频率后的钻具测量信号分别输入阵列方程;

6) 调整阵列方程驱动信号的幅值  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , 当阵列系统输出相轨迹发生跃变时, 分别记录  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  的值并将其代入式(17), 得到钻具姿态动态测量信号的幅值和相位。

## 4 实验与分析

通过实验室振动平台模拟和实钻测量数据对基于阵列三稳混沌系统的钻具测量信号频率检测与参数估计进行验证, 并将结果与传统滤波方法和双稳混沌系统进行对比, 分析评估所提方法的可行性和准确性。

### 4.1 实验室振动平台仿真验证

实验室振动平台测试系统如图 7 所示, 主要设备包括测斜仪、六维空间振动台及信号采集模块等。测斜仪型号 TX-3 S, 内置三轴加速度计传感器, 通过调整控制面板可模拟钻具钻进时的空间姿态; 通过对振动台的控制平台进行参数设置, 产生不同强度、频率的噪声干扰信号, 以模拟井下多频强振动噪声环境。



图 7 振动平台测试系统

Fig. 7 Vibration platform test system

#### 1) 频率检测仿真实验

首先, 设置测斜仪的控制面板, 模拟钻具实时姿态角, 并利用存储示波器记录传感器输出信号。设  $x$  轴加速度计信号为  $0.02\sin(10t - 2\pi/3)$ , 即待测的有用信号; 然后, 设置六维空间振动台产生方差为 0.02 的随机干扰信号  $n(t)$ , 频率变化范围为 0~10 Hz, 即存在与有用信号混频的噪声; 最后, 将上述两种信号进行叠加得到三稳混沌系统的输入信号如式(18)所示。

$$I(t) = 0.02\sin(10t - 2\pi/3) + n(t) \quad (18)$$

计算可知, 输入信号  $I(t)$  的 SNR 约为 -20 dB, 说明有用信号完全湮灭在噪声中, 且存在频谱混叠的噪声, 难以通过频谱分析等传统方法获取有用信号的频率信息。以 MATLAB/Simulink R2021a 软件为平台, 采用改进的四阶 Runge-Kutta 算法进行迭代计算, 对于本文中形如  $\ddot{x} + kx + f(t, x) = sn(t)$  的非线性微分方程, 将其化为状态空间方程如式(19)所示。

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -ky - f(t, x) + sn(t) \end{cases} \quad (19)$$

将式(19)进行离散化后, 利用四阶 Runge-Kutta 算法进行求解, 迭代计算过程为:

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\ y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4) \\ K_1 = h \cdot y_n \\ L_1 = h \cdot [-ky_n - f(t_n, x_n) + sn(t_n)] \\ K_2 = h \cdot \left(y_n + \frac{L_1}{2}\right) \\ L_2 = h \cdot [-k(y_n + \frac{L_1}{2}) - f(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{L_1}{2}) + sn(t_n + \frac{h}{2})] \\ K_3 = h \cdot \left(y_n + \frac{L_2}{2}\right) \\ L_3 = h \cdot [-k(y_n + \frac{L_2}{2}) - f(t_n + h, x_n + \frac{L_2}{2}) + sn(t_n + h)] \\ K_4 = h \cdot L_3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_2 = h \cdot \left[ -k \left( y_n + \frac{L_1}{2} \right) - f \left( t_n, x_n + \frac{K_1}{2} \right) + s n(t_n) \right] \\ K_3 = h \cdot \left( y_n + \frac{L_2}{2} \right) \\ L_3 = h \cdot \left[ -k \left( y_n + \frac{L_2}{2} \right) - f \left( t_n, x_n + \frac{K_2}{2} \right) + s n(t_{n+1}) \right] \\ K_4 = h \cdot (y_n + L_3) \\ L_4 = h \cdot [-k(y_n + L_3) - f(t_n, x_n + K_3) + s n(t_{n+1})] \end{cases} \quad (20)$$

式中: $h$  为计算步长; $K$  和  $L$  是 Runge-Kutta 算法中分步计算状态变量变化率的中间变量。

由此建立阵列三稳混沌系统频率检测模型,并将  $I(t)$  输入模型,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

类别	参数	值
三稳态系统模型	阻尼系数 $k$	0.5
	非线性系数 $a$	1
	非线性系数 $b$	1
	非线性系数 $c$	1
三稳系统驱动信号	临界幅值 $\lambda_c$	0.58
	角频率 $\omega$	1
	初始相位角	$0, \pm 2\pi/3$
数值计算初值	$x(0)=0; x'(0)=0$	
	算法	Ode4(Runge-Kutta)

由式(18)可知,有用信号的角频率  $\gg 1 \text{ rad/s}$ ,且初相角不为 0,若要实现系统相轨迹跃变,需要根据第 3 章步骤 1)~4)构建阵列三稳混沌系统模型,并对阵列方程进行变尺度处理,由此得到仿真结果如图 8 所示。

可以看出,在不考虑输入信号  $I(t)$  时,阵列三稳混沌系统输出相轨迹为混沌态,如图 8(a)所示。输入信号  $I(t)$  后,引入变尺度系数  $K=10$  对计算步长和采样时间进行调整,并用调整后的仿真参数对系统进行求解。然而,受输入信号初相角的影响,系统输出相轨迹仍为混沌态,如图 8(b)所示,说明频率检测失效。

另一方面,如果只引入所提阵列三稳频率检测系统,但未对输入信号进行变尺度处理,阵列三稳系统输出相轨迹仍为混沌态,如图 8(c)所示,频率检测仍然无效。在引入阵列三稳混沌系统的同时,用变尺度系数  $K=10$  对仿真参数进行调整,可以看到当驱动信号初相角为  $-120^\circ$  时,系统输出相轨迹跃变至大尺度周期态,如图 8(d)所示。由此可知,输入信号  $I(t)$  中存在角频率为  $10 \text{ rad/s}$  的传感器测量信号,频率检测有效。

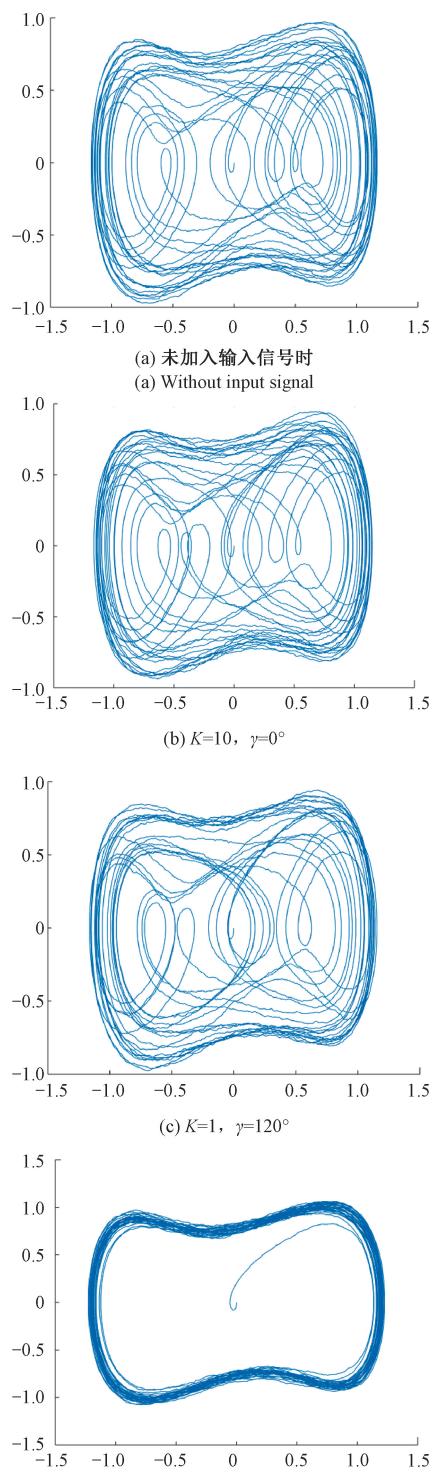


图 8 不同参数下阵列三稳系统输出相轨迹

Fig. 8 Phase trajectories of array tri-stable system under different parameters

## 2) 参数估计仿真实验

当传感器测量信号的频率值确定后,将  $I(t)$  输入式(15)所示阵列三稳混沌系统进行参数估计。首先,将信

号  $I(t)$  输入式(15)所示阵列方程 1, 并对驱动信号的幅值  $\lambda_1$  进行微调。当  $\lambda_1 = 0.6021$  时, 系统输出相轨迹呈现出有混沌趋势的大尺度周期态, 如图 9(a)所示。为进一步明确  $\lambda_1 = 0.6021$  是否为阵列方程 1 输出相轨迹跃变的临界值, 将噪声信号  $n(t)$  的强度降低, 使输入信号  $I(t)$  的 SNR 从-20 dB 提高到-18 dB, 仿真结果如图 9(b)所示。

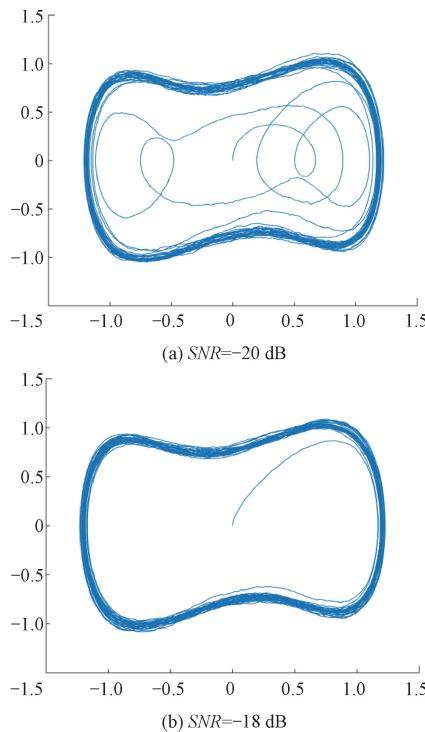


图 9 阵列方程 1( $\gamma=0^\circ, \lambda_1=0.6021$ )的输出状态

Fig. 9 Output of the array equation 1 ( $\gamma=0^\circ, \lambda_1=0.6021$ )

可以看到, 此时阵列方程 1 的输出相轨迹呈现清晰的大尺度周期态, 说明  $\lambda_1 = 0.6021$  的确是临界值, 但是参数估计的 SNR 阈值为-18 dB, 略高于频率检测的 SNR 阈值。

式(15)所示阵列方程 2 和 3 的临界值的确定过程与上述方程 1 的确定过程相同。当  $\lambda_2 = 0.5775$  且  $SNR = -18$  dB 时, 式(15)所示阵列方程 2 的输出相轨迹如图 10 所示, 可以看出呈现出清晰的大尺度周期态, 因此  $\lambda_2 = 0.5775$  是阵列方程 2 的临界值; 当  $\lambda_3 = 0.6056$  且  $SNR = -20$  dB 时, 式(15)所示阵列方程 3 的输出相轨迹如图 11 所示, 可以看出呈现出清晰的大尺度周期态, 因此  $\lambda_3 = 0.6056$  是阵列方程 3 的临界值。需要说明的是, 尽管阵列方程 3 的 SNR 阈值为-20 dB, 但整体用于参数估计的阵列三稳混沌系统的 SNR 阈值仍为-18 dB, 略高于频率检测的 SNR 阈值。

由以上分析可知, 当阵列三稳混沌系统的输出相轨迹发生跃变时, 3 个方程的驱动信号幅值分别为  $\lambda_1 = 0.6021, \lambda_2 = 0.5775, \lambda_3 = 0.6056$ 。先将  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  代入式(17), 得到传感器测量信号幅值的估计值为 0.0197,

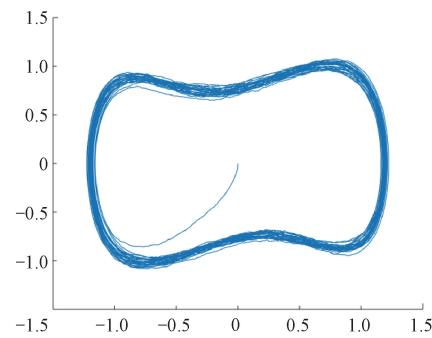


图 10 阵列方程 2( $\gamma=180^\circ, \lambda_2=0.5775$ )的输出状态

Fig. 10 Output of the array equation 2 ( $\gamma=180^\circ, \lambda_2=0.5775$ )

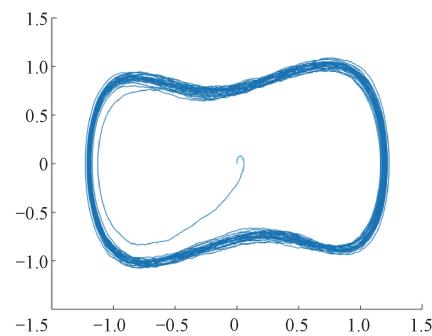


图 11 阵列方程 3( $\gamma=90^\circ, \lambda_3=0.6056$ )的输出状态

Fig. 11 Output of the array equation 3 ( $\gamma=90^\circ, \lambda_3=0.6056$ )

初相角的第 1 组估计值约为  $\pm 128^\circ$ ; 然后再将  $\lambda_3$  代入式(17), 得到传感器测量信号初相角的第 2 组估计值约为-52°或-128°。取两组估计结果的交集, 即-128°为最终估计结果。

进一步统计可得参数估计的详细误差结果, 如表 2 所示。

### 3) 姿态解算仿真实验

利用前述频率检测和参数估计方法, 对 200 个数据点的检测结果进行姿态解算, 并与原始测量信号、FIR 滤波和双稳混沌系统的结果进行比较, 证明所提方法的有效性。数据点的信噪比仍为-18 dB。

井斜角解算结果如图 12 所示, 误差统计结果如表 3 所示。由统计结果可知, 原始测量信号的解算结果误差最大, 可得 19.31°; 经 FIR 滤波处理后的解算结果误差仍然较大, 最大值和均方根 (root mean square, RMS) 分别为 8.8° 和 3.01°; 相比 FIR 滤波, 经双稳混沌系统处理后的解算精度大幅提高, 然而最大误差仍超过 4°, 均方根误差 (root mean square error, RMSE) 超过 1°; 本文提出的三稳混沌系统井斜角解算结果最佳, 最大误差为-2.67°, RMSE 仅为 0.79°。

## 4.2 实钻数据验证

为了进一步验证基于改进三稳系统混沌效应的钻具动态测量信号检测的准确性, 利用某实钻井现场所得

表 2 参数估计的误差统计结果

Table 2 Error statistics for parameter estimation

传感器测量信号	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	振幅		初相角		信噪比阈值
				估计值	相对误差	估计值	相对误差	
$s(t)$	0.602 1	0.577 5	0.605 6	0.019 7	1.5%	-128°	6.7%	-18 dB

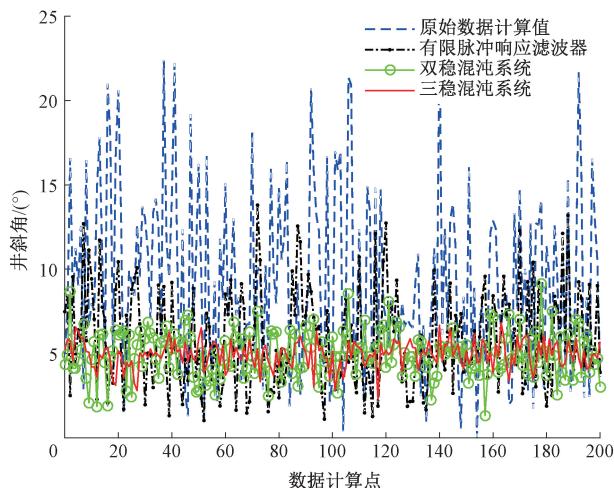


图 12 井斜角的解算结果对比

Fig. 12 Comparison of solution results for inclination

数据进行测试和分析。传感器设备的安装位置和现场钻采过程如图 13 所示。

表 3 井斜角误差统计结果

Table 3 Error statistics of inclination (°)

计算方法	井斜角解算误差统计	
	最大误差	RMSE
原始数据计算值	19.31	6.79
FIR 滤波	8.80	3.01
双稳混沌系统	4.16	1.36
三稳混沌系统	-2.67	0.79

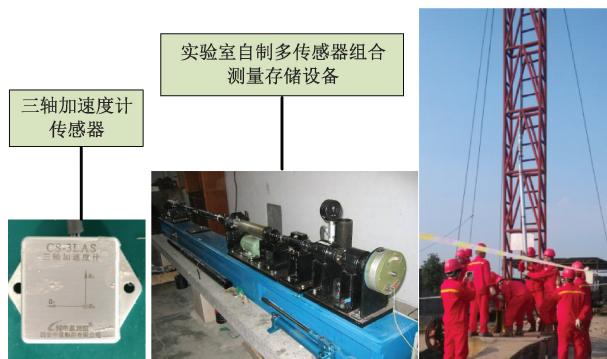


图 13 实钻井测试主要设备示意图

Fig. 13 Schematic diagram of main equipment for field drilling testing

钻具钻进状态接近稳定直钻,井斜角设置为 2.5°,环境参数如表 4 所示。此外,选用中星测控公司研制的 CS-3LAS 传感器作为加速度计,主要参数如表 5 所示。

表 4 实钻井测试基本参数

Table 4 Basic parameters of the field-drilling test

参数	数值
井深	1 740~1 805 m
钻压	10 MPa
井下温度	40°C
泵压	6.6 MPa
钻井液密度	1.15 g/cm³
悬移质	79 kN
操作时间	75 h
转速	120 rpm
倾角设定值	2.5°

表 5 加速度计传感器的主要参数

Table 5 Parameters of accelerometer sensors

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

首先,对采集到的三轴加速度计测量数据进行离散化处理,并将其输入改进的三稳混沌系统进行检测;然后,对检测后的传感器信号进行姿态解算;最后,将解算

结果与双稳混沌系统、FIR 滤波器处理结果进行比较,计算结果如图 14 所示。

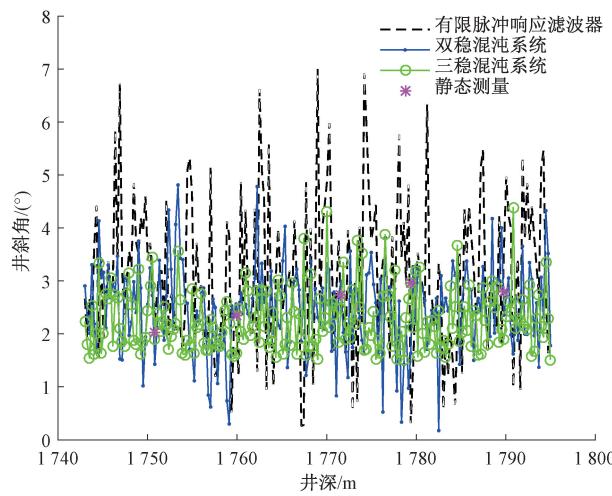


图 14 不同算法下井斜角的求解结果

Fig. 14 Solution results for inclination under different algorithms

可以看出,使用 FIR 滤波器对钻具测量信号进行处理时,受噪声干扰的影响显著,井斜角解算结果波动幅度最大,明显偏离设定值。相比 FIR 滤波,经双稳混沌系统处理后的井斜角波动幅度显著下降,但仍然和设定值有较大的误差。采用改进三稳混沌系统对钻具测量信号进行处理,井斜角的波动幅度最小,姿态解算结果与设定值最接近。因此,所提方法在识别钻具测量信号时确实具有较好的噪声免疫性,可有效提高动态测量时井斜角的解算精度。

为了进一步验证所提方法在应用于钻具动态测量时的准确性,给出 5 个测量点的静态测量结果作为参考值,并对这 5 个点的动态解算结果进行统计,结果如表 6 所示。

表 6 实钻井测试下井斜角误差统计结果

Table 6 Error statistics of inclination in field-drilling test

(°)

计算方法	姿态参数	井深				
		1 750.8 m	1 759.9 m	1 771.6 m	1 779.4 m	1 789.8 m
		井斜角	井斜角	井斜角	井斜角	井斜角
FIR 滤波	井斜角	2.02	2.34	2.73	2.97	2.80
	误差	-1.77	-1.21	+1.64	-2.65	+0.81
	井斜角	0.25	1.13	4.37	0.32	3.61
双稳混沌系统	井斜角	1.43	1.64	2.99	1.64	3.86
	误差	-0.59	-0.70	+0.26	-1.33	+1.06
三稳混沌系统	井斜角	1.70	2.93	2.48	2.96	2.06
	误差	-0.32	+0.59	-0.25	-0.01	-0.74

可以看出,经 FIR 滤波器处理后的井斜角解算结果误差较大,基本都在 1°以上,最大值接近 3°,说明该方法在处理动态测量信号时确实受井下振动噪声的影响很大。经双稳混沌系统检测后的姿态解算精度明显更高,但由于该方法对正弦信号的敏感性较差,因此仍有两个点的误差在 1°以上。提出的改进三稳混沌系统获得的井斜角解算精度最高,所有 5 个点的误差都在 ±1°。实验结果与仿真结果基本一致,进一步证明所提方法的有效性和准确性。

## 5 结 论

在钻具动态测量过程中,井底钻具组合的强烈振动和快速旋转导致姿态测量信号中存在多频、高幅值的噪声干扰,造成井下姿态测量信号的信噪比极低。针对这一问题,提出基于阵列三稳系统混沌效应的姿态测量方法。通过仿真实验和实钻井数据计算,可以得到以下结论:

1)结合变尺度方法,提出一种改进的阵列三稳混沌系统,以解决随钻动态测量信号频率值过大的问题;并使检测窗口覆盖全部初相位,解决待测信号初相角对频率检测结果的影响。仿真和实钻数据计算结果证明了该方法的有效性和可行性。

2)设置驱动信号初相位为 3 个不同值,组成阵列三稳混沌系统,该系统可同步估计待测信号的幅值和相位,进而恢复出完整的姿态测量信号。仿真和实钻数据计算结果表明,所提方法在处理动态测量信号时具有较高的解算精度,且待测信号的 SNR 阈值低至 -18 dB。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] RAO ZH H, ZHANG W G, XIAO M L, et al. Optimal configuration design and attitude measurement method of redundant accelerometer for steering drilling tools [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2901 (1): 012039.
- [3] MALEKIZADEH A, AFARIDEH H, MOHAMADIAN M, et al. Calibration of accelerometer and magnetometer sensors of MWD systems in directional drilling application [J]. Measurement Science and Technology, 2024,

- 35(5): 055111.
- [4] YANG Y, LI F, ZHANG N, et al. Research on the cooperative detection of stochastic resonance and chaos for weak SNR signals in measurement while drilling [J]. Sensors, 2021, 21(9): 3011.
- [5] 张夷非, 程为彬, 郭涛, 等. 井下工具倾斜姿态误差的非线性融合补偿 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 335-343.
- ZHANG Y F, CHENG W B, GUO T, et al. Fusion-based compensation for tilt error nonlinearity of downhole tool [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 335-343.
- [6] 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. An adaptive extraction algorithm of gravity acceleration in MWD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 17-25.
- [7] 杨一, 蔡泉堃, 田丹丹. 基于改进自适应 UKF 的随钻动态测量方法研究 [J]. 计算机仿真, 2024, 41(3): 342-346, 440.
- YANG Y, CAI Q K, TIAN D D, et al. Research on dynamic measurement method while drilling based on improved adaptive UKF [J]. Computer Simulation, 2024, 41(3): 342-346, 440.
- [8] 杨金显, 蔡纪鹏, 尹凤帅, 等. 随钻测量钻具重力加速度提取方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10): 145-152.
- YANG J X, CAI J P, YING F SH, et al. Method for extracting drill string gravitational acceleration from downhole measurement equipment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(10): 145-152.
- [9] 隋修武, 付世雄, 刘金雨, 等. 基于卡尔曼滤波的小波去噪和 IWOA-ELM 的颈肩肌肉疲劳分类方法 [J]. 电子测量技术, 2024, 47(10): 10-18.
- SUI X W, FU SH X, LIU J Y, et al. A method for classifying neck and shoulder muscle fatigue based on wavelet denoising with kalman filtering and IWOA-ELM [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(10): 10-18.
- [10] TU B, LI D SH, LIN EN H, et al. Research on mud pulse signal data processing in MWD [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012, 2012(1): 182.
- CHEN H X, FAN D L, FANG L, et al. Particle swarm optimization algorithm with mutation operator for particle filter noise reduction in mechanical fault diagnosis [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2020, 34(10): 2058012.
- [12] XING H Y, ZHANG Q, LU CH X. Adaptive stochastic resonance method for weak signal detection based on particle swarm optimization [J]. Instrumentation, 2015, 2(2): 3-10.
- [13] ZHENG Y, SUN X F, CHEN J, et al. Extracting pulse signals in measurement while drilling using optimum denoising methods based on the ensemble empirical mode decomposition [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 798-801.
- [14] 凌威, 梁竹关, 李海燕. 基于变分模态分解的脉搏信号联合去噪 [J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(9): 1-8.
- LING W, LIANG ZH G, LI H Y. Joint pulse signal denoising based on variational modal decomposition [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(9): 1-8.
- [15] ZHANG X S, ZHANG H X, GUO J SH, et al. Auto measurement while drilling mud pulse signal recognition based on deep neural network [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 167: 37-43.
- [16] GUAN ZH R. Weak signal detection method based on nonlinear differential equations [J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2024, 24(2): 1207-1221.
- [17] 张刚, 杨玉蕾, 张天骐. Levy 噪声下自适应级联三稳随机共振系统研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4): 160-168.
- ZHANG G, YANG Y L, ZHANG T Q. Study on adaptive cascade tri-stable stochastic resonance systems under Levy noise [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(4): 160-168.
- [18] YAN SH H, SUN X, WANG ER T, et al. Application of weak signal detection based on improved duffing chaotic system [J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2023, 11(7): 3057-3068.
- [19] 孙淑琴, 祁鑫, 袁正海, 等. 基于混沌理论的电力系统微弱谐波检测方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 76-86.
- SUN SH Q, QI X, YUAN ZH H, et al. Research on weak harmonic detection methods for power systems based on chaos theory [J]. Protection and Control of Power Systems, 2023, 51(15): 76-86.
- [20] 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.
- [21] LI H P, TIAN R L, XUE Q, et al. Improved variable scale-convex-peak method for weak signal detection [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2022, 156: 111852.
- [22] 李海涛, 丁虎, 陈立群, 等. 三稳态能量收集系统的同宿分岔及混沌动力学分析[J]. 应用数学和力学, 2020, 41(12): 1311-1322.
- LI H T, DING H, CHEN L Q, et al. Homoclinic bifurcation and chaotic dynamics analysis of a tri-stable energy harvesting system[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2020, 41(12): 1311-1322.
- [23] GUO Q, NING L J. Bifurcation analysis of a tristable system with fractional derivative under colored noise excitation[J]. Physica Scripta, 2024, 99(2): 025240.
- [24] ZHAO ZH J, YANG R Y, LIU J, et al. Study on weak signal amplitude detection and circuit simulation based on a new chaotic system[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2025, 198: 116554.
- [25] 杨一, 周可馨, 张楠, 等. 导向钻具动态测量的三稳随机共振频率提取[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 295-306.
- YANG Y, ZHOU K X, ZHANG N, et al. Frequency extraction of tri-stable stochastic resonance system for dynamic measurement of steering drilling tool [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 295-306.

### 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@xsys.edu.cn

**Yang Yi** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Shiyou University in 2007, his M. Sc. degree from Kunming University of Science and Technology in 2011, and his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2016. He is currently an associate professor at Xi'an Shiyou University. His main research interests include steering drilling attitude measurement, weak signal detection and intelligent control.



卢劲囡,2022年于榆林学院获得学士学位,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、弱信号检测的建模与仿真。

E-mail: 2457614105@qq.com

**Lu Jinnan** received her B. Sc. degree from Yulin University in 2022. Now she is a postgraduate student at Xi'an Shiyou University. Her main interests include dynamic measurement while drilling, modeling and simulation of weak signal detection downhole.