

基于频域抗混叠小波时间熵提取牵引器磁定位信息特征的研究^①

李浩昱^{②*} 陈继开^{③*} 肖 勇^{**} 刘兴斌^{**} 吴建强^{*}

(* 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院 哈尔滨 150001)

(** 大庆油田测试技术服务分公司 大庆 163412)

摘 要 提出了一种依据牵引器接箍磁定位信息特征提取判断水平井套管接箍及射孔位置的新检测方法。利用 Db4 小波基函数对磁定位信息进行小波变换,阐述相邻尺度重构信号能量泄露和混叠的成因;以小波熵为理论基础,对基于小波时间熵(WTE)的小波频域抗混叠方法进行研究,采用概率统计法论证小波时间熵在小波频域抗混叠及特征提取方面的应用机理,并通过算例仿真验证该理论的正确性;以牵引器运行于模拟水平井所获得的磁定位信息为分析对象,利用小波时间熵算法提取套管射孔、接箍等信息特征并进行分析。理论分析及实验结果证明,对磁定位信号进行小波时间熵变换,能够降低由小波频域混叠现象导致的负面影响,对磁定位信息特征进行有效的提取和分类,并判定套管射孔及接箍位置。

关键词 小波时间熵(WTE),小波混叠,特征提取,套管检测,套管接箍定位器(CCL)

0 引 言

水平井套管接箍和射孔定位是油田测井的一项必要内容,掌握接箍和射孔的物理位置对提高测井数据的准确性及精度具有重要意义^[1,2]。目前接箍和射孔的定位检测方法主要依靠井下牵引器将漏磁探伤设备送入水平井套管进行定位测量,但由于漏磁探伤设备结构复杂且对牵引器要求较高,国内对其核心技术尚未完全掌握,正处于研究仿制阶段。在水平井测井过程中,牵引器是不可或缺的测井仪器输送装置。为了实时掌握牵引器在套管内的爬行速度及井下位置,其内部装有套管接箍定位器(casing collar locator, CCL),当套管接箍定位器随牵引器通过套管接箍时,穿过感应线圈的磁通将发生突变并以感应电动势波动的形式反映接箍的存在,通过分辨磁定位信号的变化记录接箍的个数即可判断牵引器所处井下位置及平均爬行速度。然而这种测量方法会受到下述因素的影响:长期原油溶蚀使套管管壁被局部腐蚀并附着泥沙油污,导致管壁表面凹凸不平;许多套套管壁内部存在沙眼、气孔、隐性裂

缝等缺陷,导致局部管体密度不均;牵引器通过射孔区时射孔分布及原油的流动导致该段套管磁导系数变化。这些因素均可引发磁通变化异常,使接箍磁定位信号淹没于噪声中而无法识别。

由于小波分析能够同时在时频域对信号进行多尺度变换,具有多分辨率分析特点,所以被大量应用于信号特征提取及分类。文献[3]提出利用小波变换对磁记忆信号进行时频域分析,根据相邻尺度噪声不相关特性对磁记忆信号中的噪声进行滤波处理,提取了套管应力信号特征。我们选择多种正交小波对磁定位信号进行小波分解,试图通过多尺度变换对磁定位信号中的接箍及射孔信息特征进行提取。但由于目前几乎所有的小波函数族都存在频域混叠,导致相邻尺度能量泄露并产生混叠现象^[4,5],使基于小波分析的信号特征提取效果不佳。小波熵理论在生物医学、电力系统故障诊断等领域的应用为我们提供了解决小波频域混叠和信号特征提取的新思路^[6,7]。本文从理论角度对基于小波时间熵解决小波频域混叠问题展开了讨论,利用小波时间熵算法对磁定位信号进行熵运算,根据运算结果提取接箍、射孔等信息特征并予以分析。

① 863 计划(2007AA06Z231)资助项目。
② 男,1974 年生,博士,教授;研究方向:电力电子系统控制技术,水平井测井仪器输送技术及特种能量变换技术;E-mail: lihy@hit.edu.cn
③ 通讯作者,E-mail: funcjk@sina.com
(收稿日期:2009-04-28)

1 小波频域混叠现象及其负面影响

1.1 小波频域混叠现象的形成原因

对于 $\forall x(t) \in L^2(R)$, $x(t)$ 的连续小波变换函数为

$$W_{Tx}(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中 a 为尺度参数, b 为平移参数, $\psi(t)$ 为小波基函数; $\bar{\psi}(t)$ 为 $\psi(t)$ 的复共轭。式(1)的频域表达式为

$$W_{Tx}(a, b) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \bar{\hat{\psi}}_a(\omega) \exp(j\omega b) d\omega \quad (2)$$

式中 $\bar{\hat{\psi}}_a(\omega)$ 为 $\bar{\psi}\left(\frac{t}{a}\right)$ 的频域表达式, $X(\omega)$ 为 $x(t)$ 的频域表达式。则有

$$\omega_a = \frac{\omega_0}{a} \quad (3)$$

式中 ω_0 为 $\hat{\psi}(\omega)$ 的中心频率, ω_a 为 $\hat{\psi}_a(\omega)$ 的中心频域。选取 Db4 作为小波基函数 $\psi(t)$, 绘制小波基函数在不同尺度 a 上的频域波形(如图 1)。

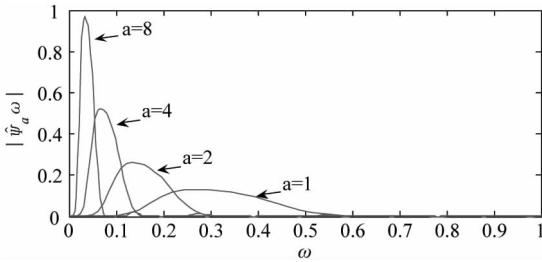


图 1 Db4 在不同尺度上的频域波形

由式(2)和式(3)可知, $\hat{\psi}_a(\omega)$ 的频域中心 ω_a 随着尺度 a 的伸缩而移动, 当被测信号的频率与相应尺度的小波函数中心频率相同或相近时, 其小波变换系数 $W_{Tx}(a, b)$ 较大。但由图 1 可知, $\hat{\psi}_a(\omega)$ 的频域窗并不是矩形窗, 即使利用 Mallat 算法将尺度 a 进行 2 进制离散, 相邻较近的尺度对应的频域窗依然有较明显的交叠。所以一个尺度对应频域窗口内的能量必然扩散到其它尺度对应频段, 同时其它频段的能量也会渗透到这一频段内, 可见各尺度之间存在频域混叠现象是由于大部分正交小波函数自身的频域紧支性不理想, 频域波形窗不是规则矩形所致, 这是造成小波分析误差的一个主要原因。

1.2 小波频域混叠对小波分析结果的负面影响

为了进一步说明小波频域混叠现象对小波分析

结果的影响, 构造一个被测信号:

$$\begin{cases} x_1(t_1) = 0.01 \times \sin(2\pi f_1 t_1) + 0.3 \times \sin(2\pi f_2 t_1) \\ \quad + 0.4 \times \sin(2\pi f_3 t_1) + 0.3 \times \sin(2\pi f_4 t_1) \\ \quad + 0.3 \times \sin(2\pi f_5 t_1) + x_2(t_2) + \text{whitenoise} \\ \quad (0 \leq t_1 \leq 1\text{s}) \\ x_2(t_2) = 0.2 \times \sin(2\pi f_0 t_2) \\ \quad (0.525\text{s} \leq t_2 \leq 0.625\text{s}) \end{cases}$$

设采样频率 $f_s = 4000\text{Hz}$, $f_0 = 10\text{Hz}$, $f_1 = 83\text{Hz}$, $f_2 = 220\text{Hz}$, $f_3 = 260\text{Hz}$, $f_4 = 600\text{Hz}$, $f_5 = 1100\text{Hz}$ 。利用 Mallat 算法, 基于 Db4 小波基函数对该信号进行 3 层分解。图 2 所示为小波变换重构信号。根据 Mallat 尺度划分原则, 尺度 3 的近似重构部分 A3 应体现突变信号 x_2 的信息特征。然而由图 2 可知, 因为相邻尺度上的重构信号存在能量泄漏和混叠, 重构信号 D3 与 A3 波形较为相似, 应在 A3 上表现出的突变点特征被相邻尺度的能量泄漏和同尺度中具有近似频率的噪声所淹没, 利用小波变换进行信号突变点检测的方法失效。同时, 当干扰信号与特征信号频段相近且同处一个尺度内时, 特征信号与干扰信号将发生调制现象, 如果单纯依靠加大小波分解尺度, 不但增加了数据运算量, 而且不能从根本上解决问题。

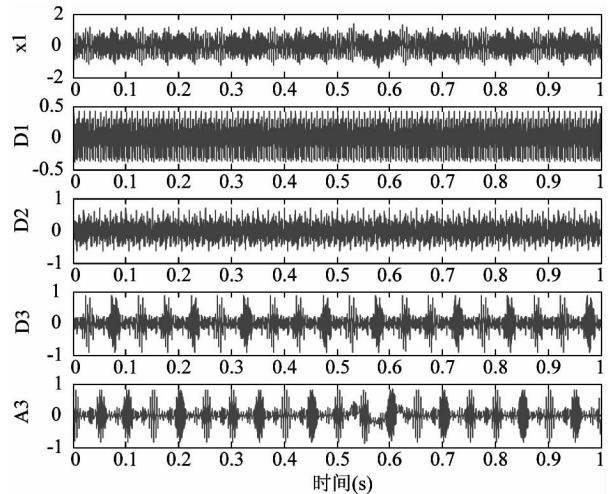


图 2 Db4 小波变换重构信号

2 频域抗混叠小波时间熵应用机理

小波熵是将小波分析的时频局部化优点与信息熵善于估计随机信号复杂性的优点结合起来, 对小波分解后不同尺度上的小波系数或重构信号进行信

息熵运算得到的熵值。按照运算对象选取的不同,小波熵可分为小波时间熵、能量熵、奇异熵等^[6,8]。这里以小波时间熵为研究对象,分析其在小波频域抗混叠方面的应用机理。

2.1 小波时间熵的定义

设在尺度 j 下,离散小波系数(或重构信号)为 $D = \{d(k), k = 1, 6 \cdots, N\}$, 在小波系数(或重构信号)上定义一个滑动数据窗,设窗宽为 $w \in \mathbf{N}$, 滑动因子为 $\delta \in \mathbf{N}$, 则滑动数据窗可表示为

$$W(m; w, \delta) = \{d(k), k = 1 + m\delta, \cdots, w + m\delta\} \tag{4}$$

上式中 $m = 1, 2, \cdots, M$, 其中 $M = (N - w)/\delta \in \mathbf{N}$ 。将滑动窗划分为 L 个区间,有

$$W(m; w, \delta) = \bigcup_{l=1}^L Z_l$$

上式中 $\{Z_l = [s_{l-1}, s_l], l = 1, 2, \cdots, L\}$, s_l 互不重叠且 $s_0 < s_1 < \cdots < s_L, s_0 = \min[W(m; w, \delta)], s_L = \max[W(m; w, \delta)]$ 。

设 $p^m(Z_l)$ 表示小波系数(或重构信号) $d(k)$ 落于区间 Z_l 的概率,其等于 $d(k)$ 落在 Z_l 的数目与 $W(m; w, \delta)$ 中总的个数 w 之比值,则定义在第 j 尺度下时刻 $w/2 + m\delta$ 的小波时间熵为

$$W_{TE}^j(m) = - \sum_{l=1}^L p^m(Z_l) \log(p^m(Z_l)) \tag{5}$$

每一尺度均可计算对应的 $W_{TE}^j(m)$, 并可描绘 W_{TE}^j 变化曲线图 $\{w/2 + m\delta, W_{TE}^j(m)\}$ 。

2.2 小波时间熵频域抗混叠应用机理的分析

为了揭示小波时间熵在小波频域抗混叠方面的应用机理,首先基于 1.2 节中算例的小波变换结果,对其重构信号 A3 进行数据散布概率统计,运算步骤如下:

(1) 建立一个滑动数据窗,窗宽为 $w = 50$, 滑动步长 $\delta = 2$ 。

(2) 将滑动数据窗划分为 20 个数据散布区间 $W(m; w, \delta) = \bigcup_{l=1}^{20} Z_l, \{Z_l = [s_{l-1}, s_l], l = 1, 2, \cdots, 20\}, m = 1, 2, \cdots, M$ 。

(3) 对处于滑动数据窗内的 A3 数据按数值散布区间进行划分,并记录落入每个区间内数值点的个数,以数据散布区间为纵坐标、时间为横坐标,数据点个数对应灰度值大小,绘制区域数据散布图(如图 3)。

(4) 将滑动数据窗沿时间轴以步长 $\delta = 2$ 在 A3 上平移,重复(3)。

由图3可以发现,在没有出现突变点的时段,数

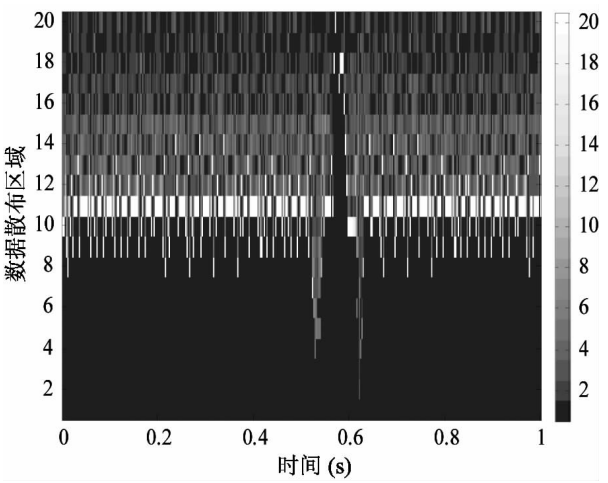


图 3 重构信号 A3 的区域数据散布图

据点落在各个区间的散布概率基本相似,大部分数据主要集中在 $Z_9 \sim Z_{15}$ 数据区域,其中 Z_{11} 数据区内数据最为集中,并向两侧区域递减;而在突变信号发生时段(0.525 ~ 0.625s),各个区间数据点的散布概率出现了巨大波动,在 0.525 ~ 0.550s 时段各区间数据点散布概率趋于平均,而 0.550 ~ 0.600s 时段数据点散布概率呈倒 V 字分布,0.600 ~ 0.625s 时段数据点散布概率再次趋于平均。同时发现突变信号发生时段与其他时段的区间数据散布的相似度存在明显差异,这说明突变信号导致了信号的数据组成发生了改变。对于这样的复杂时变信号,若用一个取值有限的随机变量 X 表示其状态特征,取值为 x_j 的概率可表示为 $p_j = P\{X = x_j, j = 1, 2, \cdots, L\}$, 且 $\sum_{j=1}^L p_j = 1$, 则 X 的某一结果得到的信息可以用 $I_j = \log(1/p_j)$ 表示,于是 X 的信息熵为

$$H(X) = - \sum_{j=1}^L p_j \log(p_j) \tag{6}$$

式中 $p_i = 0$ 时,令 $p_i \log(p_i) = 0$ 。当散布概率 p_i 发生改变时信息熵相应改变,即信息熵是散布概率的泛函。由于信息熵 H 是在一定状态下标定被测信号的一种信息测度,是对序列未知程度的一种度量,可以用来估计随机信号的复杂性,所以被测信号的任何突变都会引起熵值的明显变化,从而在一定程度上避免了小波频域混叠导致的突变信号信息特征丢失。因此设定恰当步长和数据窗宽对被测信号的小波系数(或重构信号)进行小波时间熵求取,依据时间熵波形即可提取信号特征。

对 1.2 节算例中小波变换重构信号 A3 进行小波时间熵运算,归一化的熵值(无量纲)结果如图 4

所示。从图 4 可以发现,通过小波时间熵运算,发生在时段 0.525 ~ 0.625s 的突变信号特征被成功提取。

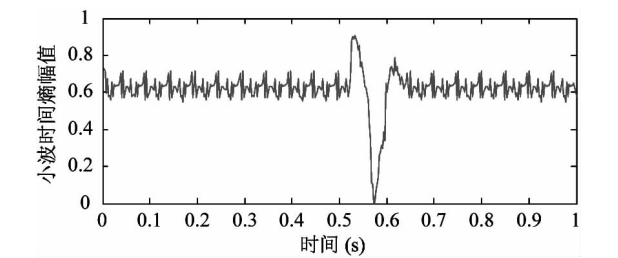


图 4 突变信号的小波时间熵波形

3 牵引器磁定位信息特征提取实验

为了验证小波时间熵在牵引器磁定位信息特征提取的应用效果,搭建实验平台模拟水平井套管状态,选取 3 根水平井套管(参数见表 1)并利用接箍连为一体。套管内牵引器套管接箍定位器位移速度为 10cm/s,磁定位信号采样频率 $f_s = 1000\text{Hz}$,数据采

集时间 $t = 180\text{s}$,获得磁定位信号实验数据并绘制波形如图 5。观察图 5 发现,由于 1 号套管内壁无腐蚀且结构致密,在时段 0 ~ 40s 磁定位信号幅值接近于 0;当套管接箍定位器通过 1 号和 2 号套管接箍时,磁定位信号出现一个大幅度波动;时段 40.15 ~ 180s 套管接箍定位器通过 2 号套管与部分 3 号套管接箍,由于两个套管局部腐蚀严重且内壁存在裂纹并附着污渍,反映 2 号套管射孔与接箍的磁定位特征信息被淹没于噪声中,无法识别。

表 1 水平井套管参数

套管 编号	套管 长度 (cm)	管壁 腐蚀	管壁 致密度	射孔区 长度 (cm)	射孔 直径 (cm)	射孔 间距 (cm)	套管 直径 (cm)
1	800	无	优	无	/	/	14
2	800	严重	差	100	0.7	10	14
3	800	严重	差	无	/		14

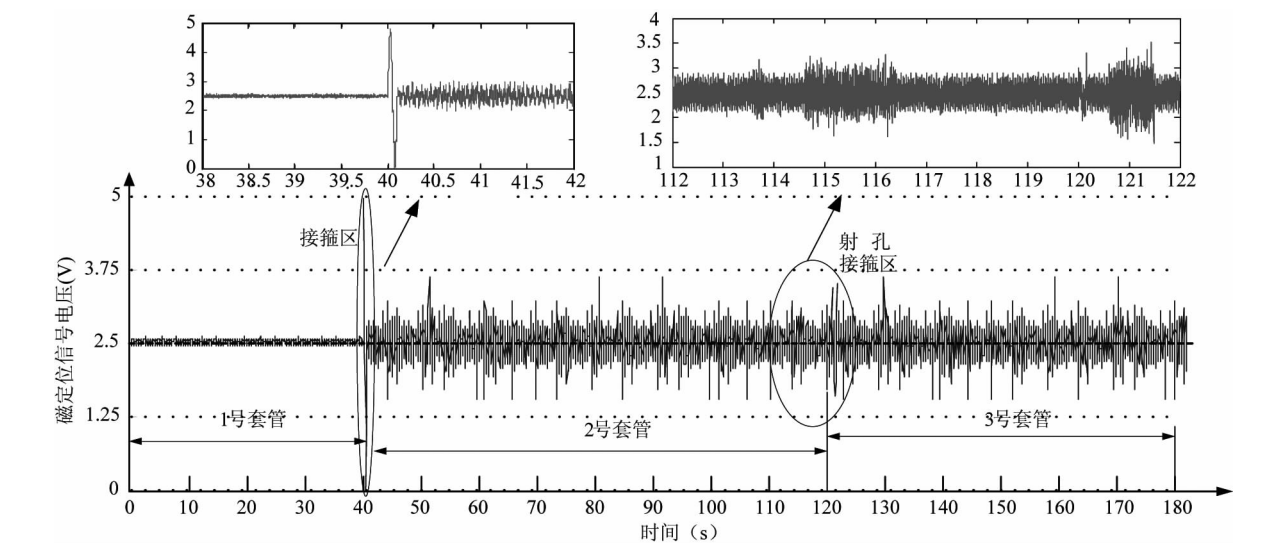


图 5 牵引器套管接箍磁定位信号

3.1 牵引器磁定位信号小波频域混叠现象

根据套管接箍定位器位移速度可知,在时段 $112\text{s} \leq t \leq 122\text{s}$,套管接箍定位器应通过 2 号套管的射孔区和一个接箍,因此截取磁定位信号在该时段的数据并归算到 -1 ~ 1 之间,利用 Db4 小波对这一时段数据进行 3 层小波变换,变换结果如图 6 所示。由于射孔和套管接箍引发的磁定位信号突变频率范围为 $1.5\text{Hz} \leq f_x \leq 20\text{Hz}$,根据 Mallat 算法的 2 进制尺度划分原则,反映射孔和套管接箍的磁信号特征应包含于近似重构信号 A3 中。但因为小波频域混叠现象及同频带噪声的影响,A3 中射孔和套管接箍的磁信号特征被淹没,无法识别。

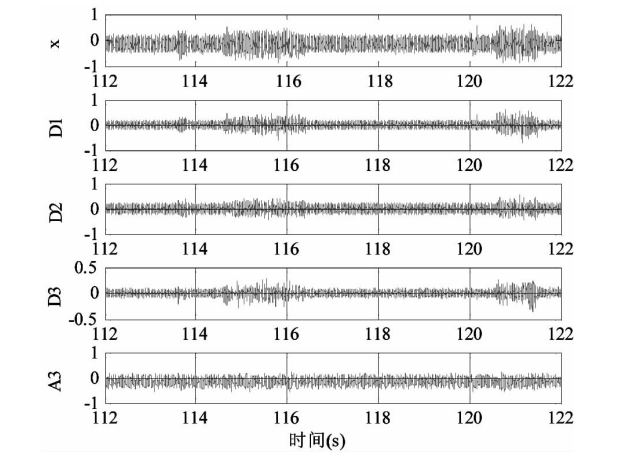


图 6 Db4 小波变换重构信号

3.2 牵引器磁定位信号的小波时间熵特征分析

根据式(4)和式(5),设滑动数据窗宽 $w = 50$, 滑动步长 $\delta = 2$, 分别对时段 38 ~ 42s 和 112 ~ 122s 的重构信号 A3 进行小波时间熵运算并绘制归一化小波时间熵波形(如图 7)。

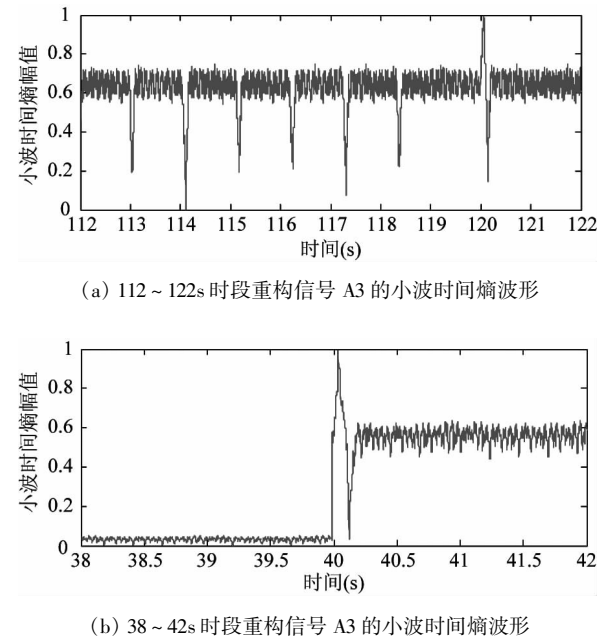


图 7 重构信号 A3 的小波时间熵波形

由图 7(a)可以发现:在时段 112 ~ 119s,磁定位信号的小波时间熵出现了有规律的 V 形波动,经比对与套管射孔位置基本吻合,可以确定 V 形波动是由磁定位信号中射孔信息引起的,分析其波动周期、幅度以及间隔,可判断射孔大小及物理间距。在时段 119.7 ~ 120.15s,套管接箍定位器通过连接 2 号和 3 号套管接箍,磁定位信号的小波时间熵出现了近似一个周期的正弦波突变,可以确定这是由接箍磁定位信号引起的小波时间熵突变,分析其发生时间、周期及幅度可确定接箍所在的具体位置及连接状况。观察图 7(b)可以发现:在时段 0 ~ 40s,磁定位信号小波时间熵值近似为零,说明此时段磁定位信号成分简单且无奇异信号干扰,经比对与 1 号套管位置吻合,可以确定此段 1 号套管不存在射孔和接箍;在时段 40 ~ 40.15s,套管接箍定位器通过连接 1 号和 2 号套管接箍,磁定位信号的小波时间熵曲线出现明显上跳并伴随近似一个周期的正弦波波动,可以确定这是由接箍磁定位信号引起的小波时间熵突变;在时段 40.15 ~ 42s,套管接箍定位器通过部分 2 号套管,由于套管管壁腐蚀严重引发磁定位信号噪声,所以该时段小波时间熵值在 0.55 处作小

幅振荡。

根据小波时间熵理论分析和实验结果可以发现,利用小波时间熵对小波变换结果进行二次处理,能够抑制小波频域混叠,同时可提取突变点对应的小波时间熵信号特征,并指示突变点发生时刻;通过对时间熵特征波形的对比分析,可以实现突变点的辨识与分类,为准确掌握套管接箍和射孔状态提供数据支持。

4 结论

利用频域抗混叠小波时间熵对牵引器磁定位信号中套管接箍及射孔信息特征进行提取,进而实现接箍、射孔定位,是判断水平井套管接箍及射孔物理位置的一种新方法。通过理论研究和实验结果分析得到以下结论:

- (1) 小波时间熵对小波频域混叠具有一定程度的抑制作用,避免了由于小波变换过程中相邻尺度能量泄漏、混叠导致的特征信息丢失。
- (2) 当干扰噪声与特征信息频段相似且经小波变换处于同一尺度上时,在不增大分解尺度的前提下,小波时间熵具有较强的信息特征分辨能力,能准确地描述突变信号特征及发生时刻。
- (3) 小波时间熵应用于牵引器磁定位信息特征提取,通过对原有磁定位信号的数据挖掘和数据分析,能够方便、准确地对接箍、射孔等套管状态特征进行提取,在提高测量精度的同时,简化了检测步骤,为生产测井提供了数据支持。

参考文献

[1] 李进旺,吕秀梅,刘继生等. 大庆油田葡北 X 断块套管损坏预测方法及矿场试验. 石油学报,2008,29(4): 625-628

[2] 罗天雨,郭建春,赵金洲等. 斜井套管射孔破裂压力及起裂位置研究. 石油学报,2007,28(1):139-142

[3] 张军,王彪. 金属磁记忆检测中应力集中区信号的识别. 中国电机工程学报,2008,28(18):144-148

[4] Du T J, Chen G J, Lei Y. Frequency domain interpolation wavelet transform based algorithm for harmonic analysis of power system. *International Conference on Communications, Circuits and Systems*, 2004, 2: 742-746

[5] Shah V P, Younan N H, Durbha S S, et al. A systematic approach to wavelet-decomposition-level selection for image information mining from geospatial data archives. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(4):875-878

- [6] 何正友,蔡玉梅,钱清泉.小波熵理论及其在电力系统故障检测中的应用研究.中国电机工程学报,2005,22(5): 38-43
- [7] 王刚,黄海,谢洪波等.心室纤颤和心动过速的小波非广度熵分析.哈尔滨工业大学学报,2008,40(3): 458-461
- [8] 符玲,何正友,麦瑞坤等.小波熵证据的信息融合在电力系统故障诊断中的应用.中国电机工程学报,2008,28(13): 64-69

Study of the approach to extract casing collar locator information features based on anti-aliasing wavelet time entropy in frequency domain

Li Haoyu^{*}, Chen Jikai^{*}, Xiao Yong^{**}, Liu Xingbin^{**}, Wu jianqiang^{*}

(^{*} School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(^{**} Logging & Testing Services Company, Daqing Oilfield Company LTD., Daqing 163412)

Abstract

A novel approach to detection of the position of casing collar and perforation based on extraction of the information features from the casing collar locator (CCL) in the retractor was proposed. The magnetic signal of casing collar location was transformed to different scales using the Db4 wavelet function and the reason of energy leakage and aliasing was analyzed. Based on the wavelet entropy theory, and by using the wavelet time entropy (WTE), the anti-aliasing approach in the frequency domain and the application mechanism of feature extraction were discussed in virtue of the method of probability statistics, and the simulation results showed the validity of the approach. To collect the magnetic signal of casing collar location as analytical object, a test platform was built, on which the data analysis and information feature extraction were performed with the wavelet time entropy algorithm. The theoretical analysis and experiment results illustrate that the proposed approach can efficiently reduce negative influence caused by wavelet aliasing, and the position of casing collar and perforation can be accurately located by feature extraction and classification using the wavelet time entropy.

Key words: wavelet time entropy (WTE), wavelet aliasing, feature extraction, casing detection, casing collar locator (CCL)