

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107326

## 井下动液面声波信号处理方法研究\*

王路平<sup>1</sup> 魏勇<sup>1</sup> 汪玉祥<sup>1</sup> 陈强<sup>2</sup> 刘国权<sup>2</sup> 马伟楠<sup>2</sup>

(1.长江大学电子信息学院荆州434023;2.中国石油集团测井有限公司西安710077)

**摘要:**石油采收过程中油井动液面深度监测对确保油井的安全生产非常重要。当使用声波法测量油井动液面深度时,受到套管中复杂结构的影响,井口接收到的声波信号的接箍波和液面回波易受到噪声的干扰,导致传统的信号处理方法很难计算声波的速度和旅行时间,从而无法获得油井动液面深度。针对这一问题,首先对接箍波进行巴特沃斯低通滤波,采用短时平均幅度差函数来获取接箍波的平均采样次数,以此来计算声波在油井中传播的速度;在此基础上,对液面回波进行小波去噪,采用小波奇异值检测方法来获取液面回波位置,以此来计算起爆波和液面回波位置的时间差,进而实现油井动液面深度的检测。为了更加直观方便地对比处理效果,设计了基于MATLAB的可视化数据处理软件。选取多组采油现场获得的声波信号进行测试,结果表明,测量绝对误差控制在1 m以内,相对误差不超过0.075%,与其他信号处理方法(相对误差范围0.3%~0.5%)相比,所提的方法误差较小,能够较好地满足实际工程中的需求。

**关键词:**井下动液面;声波信号;巴特沃斯低通滤波;短时平均幅度差函数;小波去噪;小波奇异值检测

**中图分类号:**TE151 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**510.4

## Research on acoustic signal processing method of downhole moving liquid level

Wang Luping<sup>1</sup> Wei Yong<sup>1</sup> Wang Yuxiang<sup>1</sup> Chen Qiang<sup>2</sup> Liu Guoquan<sup>2</sup> Ma Weinan<sup>2</sup>

(1. Electronics &amp; Information School, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

2. China Petroleum Logging Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In the process of oil recovery, the depth monitoring of the oil well's fluid level is very important to ensure the safe production of the oil well. When the acoustic method is used to measure the dynamic liquid level depth of oil well, the coupling wave and the liquid level echo of the acoustic signal received by the wellhead are easily interfered by the noise due to the influence of the complex structure in the casing. As a result, it is difficult for the traditional signal processing method to calculate the velocity and travel time of the acoustic wave, so the dynamic liquid level depth of oil well can not be obtained. In order to solve this problem, this paper firstly conducts Butterworth low-pass filter for coupling wave, and uses short-time mean amplitude difference function to obtain the average sampling times of coupling wave, so as to calculate the propagation velocity of acoustic wave in oil well. On this basis, the liquid level echo was denoised by wavelet, and the liquid level echo position was obtained by using the wavelet singular value detection method, so as to calculate the time difference between the detonation wave and the liquid level echo position, and then realize the detection of the dynamic liquid level depth of oil well. In order to compare the processing effect more intuitively and conveniently, this paper designs a visual data processing software based on MATLAB. This paper selects multiple sets of acoustic signals obtained from oil production sites for testing. The results show that the absolute measurement error is controlled within 1 m, and the relative error does not exceed 0.075%. Compared with other signal processing methods (relative error range 0.3%~0.5%), the proposed method has less error and can better meet the needs of actual engineering.

**Keywords:** downhole moving liquid level; acoustic signal; Butterworth low-pass filtering; short-term average amplitude difference function; wavelet denoising; wavelet singular value detection

## 0 引言

油井的动液面是反映地层供液能力的一个重要指标,

是油田确定合理沉没度,判断油井工作状态与地层能量匹配程度的重要依据<sup>[1-2]</sup>。不仅如此,随着石油开采过程中油藏能量日益衰减,采油机空抽现象日益增多,造成巨大的机

收稿日期:2021-07-20

\* 基金项目:国家科技重大专项项目(2017ZX05019001-009)资助

械损伤和经济损失。因此,研究井下动液面深度测量具有重大意义。

目前国内外油井动液面深度测量的方法有很多,其中声波法具有操作方便、工艺简单和价格低廉的优点,被大家广为使用<sup>[3]</sup>。使用声波法对油井动液面深度检测需要解决两个关键问题:1)准确获得井下声速;2)正确识别液面回波位置<sup>[4]</sup>。如果能够根据接箍波的周期性估算出声速,进而根据液面回波位置确定起爆波和液面回波位置的时间差,那么就可以计算出油井动液面的深度。然而由于油井中环境复杂,实际检测信号中不可避免地混入各种噪声,使得声波在传播和反射过程中受到各种因素的干扰,导致接箍波声波的速度和旅行时间不易计算,从而无法准确地获得油井动液面深度。

针对上述问题,许多学者提出了多种解决方案来提高动液面深度测量的精度。在声速计算方面,Sainath等<sup>[5]</sup>提出最佳神经网络结构来获得声波周期信号,极大地抑制了大量数据处理可能出现的过拟合问题。此外,王柯<sup>[6]</sup>研究出一种基于全相位 FFT 的油套环空中声速计算方法,能够获得更加准确的频率谱与相位谱。以上这些方法对一些特定类型的接箍波声速提取效果较好,但仍有改进空间。针对动液面回波位置法识别提取声波旅行时间问题,Hou等<sup>[7]</sup>建立了基于改进 SVR 的抽油杆泵井动态液位预测模型。该建模方法采用滑动窗口限制样本数量,应用遗传算法实现作为 SVR 参数的自动优化。梁鑫等<sup>[8]</sup>提出了一种基于短时能量和 LSTM 的油井动液面深度探究方法,并将建立所得测量模型应用于实际生产井动液面深度测量中,由于此方法所需样本容量较小,并未得出准确的技术指标。

上述方法有的侧重于研究提高井下声速的精度,有的侧重于研究确定旅行时间的准确度,在处理井下动液面声波信号时尚不全面,在实际应用中不够理想。为此本文从声速和旅行时间提取两方面进行讨论,提出了一种更全面的动液面声波信号处理方法。首先利用巴特沃斯低通滤波(Butterworth low pass filter, BLPF)在通频带的频率响应曲线最平滑这一优势,将其与短时平均幅度差函数(average magnitude difference function,  $\Delta$ MDF)相结合来获取接箍波的平均周期,以此计算平均声速,在一定程度上克服了因为接箍波的无规律性而导致的声速测量不准的技术难题。在此基础上,利用小波去噪(wavelet domain denoising, WDD)和小波奇异值检测(wavelet singular value detection, WSDV)相结合的方法来获取液面回波位置,以此计算出起爆波和液面回波位置的时间差,克服了液面位置不易识别的技术难题,提高了动液面深度的测量精度。为了更加直观方便地对比处理效果,设计了基于 MATLAB 的可视化数据处理软件。选取多组采油现场获得的动液面反射波数据进行测试,结果表明,该方法能够准确计算井下动液面深度,为井下实际动液面声波信号处理提供了理论基础和解决方案。

## 1 动液面测量原理及声波信号基本特征

### 1.1 油井结构

油井是在地面和地下油层之间建立的用于开采石油的管道,它主要由井口装置、井筒和完井结构 3 部分组成,如图 1 所示<sup>[9]</sup>。井口装置主要是由套管头、油管头和采油树组成,它的功能是控制和调节石油的流量大小。井筒由外部套管和内部油管构成,套管和油管之间形成了环形空间,油管接箍存在于两个相邻油管的连接处,它会改变环形空间的截面面积<sup>[10]</sup>。完井结构层主要由射孔和封隔器组成,井下原油通过射孔流入到封隔器以下的密闭井筒中,并经过油管到达地面。当采用声波法对油井动液面深度检测时,声波发生器和接收器会安装在井口。

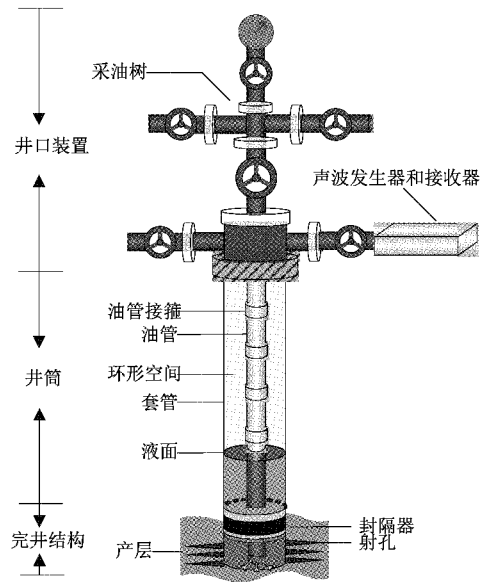


图 1 油井结构

### 1.2 油井动液面测量原理

油井动液面深度测量的基本原理是基于声波反射测距原理<sup>[11]</sup>。声波在井中的传播过程如图 2 所示,具体描述如下:井口声波发生器产生声波,声波沿着油管向下传播,当遇到油管接箍等障碍时,一部分声波(称之为接箍回波)将反射回井口被声波接收器所接收,而另一部分声波会继续向井下传播。随着深度的增加,反射回的声波信号将变得越来越弱。当剩余的部分声波信号遇到动液面时会发生反射,地面的接收器会接收到信号特征明显的液面回波。

根据上述原理,可以利用声波在油井中传播的速度和时间的乘积来计算油井的动液面深度,即:

$$h = \frac{vt}{2} \quad (1)$$

式中: $h$  为动液面深度, $v$  为声波在井中传播的速度, $t$  为声波在井中传播的时间。

### 1.3 动液面回波信号的基本特性

动液面声波信号如图 3 所示,包含起爆波、接箍回波和

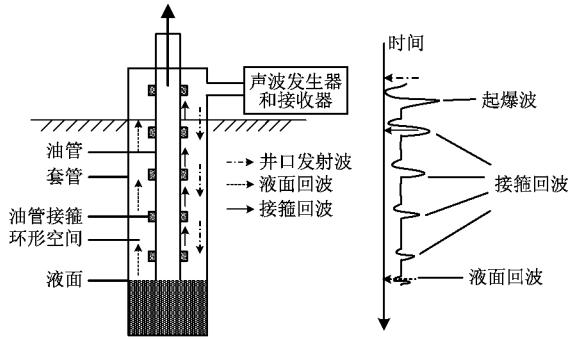


图 2 油井中声波传播过程

液面回波。其中起爆波和液面回波比相邻信号波形大得多；因为井下油管长度是相等的，所以接箍回波信号是准周期信号。此外，由于井下环境复杂，一些噪声信号和有效信号混合在一起，使得接箍回波和液面回波中毛刺较多，信号不光滑，影响了特征识别<sup>[13]</sup>。根据上述动液面声波信号的特性分析，为了提高动液面深度测量的准确性，就必须对其进行信号处理。其基本思路是，首先对原始声波进行去噪处理，然后根据接箍回波的周期获得声速，进而根据液面脉冲幅度突变特征来确定声波旅行时间，最后根据声速与时间乘积来计算液面深度。

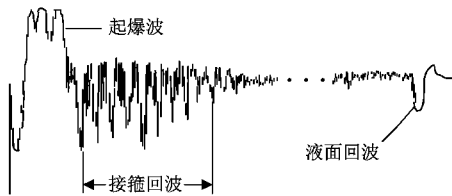


图 3 动液面声波信号

## 2 声速提取

### 2.1 声波提取原理

油井声波法计算声速的基本思路是：首先选取合适的接箍回波，然后对接箍回波进行滤波处理，相邻的接箍产生的接箍波采样点可以看作近似相同的，接下来利用数字信号处理的方法求出接箍波采样点的平均周期，最后通过油管长度和接箍波采样点的平均周期计算声速  $v$ 。即：

$$v = \frac{2L}{T_m} = \frac{2L}{nT_s} \quad (2)$$

式中： $L$  为一节油管的长度， $T_m$  为声波经过一节油管所用的时间， $n$  为接箍波平均采样次数， $T_s$  是系统采样周期。

### 2.2 接箍回波滤波处理

在实际测量中，由于井下情况复杂，声波在传输过程中会受温度、压强、密度等环境因素的影响<sup>[13]</sup>，导致接箍反射波的周期不易识别，无法准确计算声波信号在井下传播的速度。为了解决这一问题，本节分析了两种滤波方法，通过对比选出最优的滤波方法，为后续计算井下声速提供了保障。

BLPF 是一种常见的数字滤波方法，其特点是通频带内的频率响应曲线最大限度平坦，起伏较小，而在阻频带逐

渐下降为零。因此，BLPF 在通频带内外都有平稳的幅频特性，但有较长的过渡带，在过渡带上容易造成失真<sup>[14]</sup>。巴特沃斯低通滤波器的幅度平方函数定义为：

$$|H(j\lambda)|^2 = \frac{1}{1 + C^2\lambda^{2N}} \quad (3)$$

式中： $C$  为一与通带最小衰减有关的常数； $N$  为滤波器阶数； $\lambda$  为归一化低通截止频率； $|H(j\lambda)|$  为幅度响应。

中值滤波去噪是另一种常用的非线性平滑滤波器，它的基本原理是数字序列中一点的值用该点的一个邻域中各点值的中值代替，让周围的值接近的真实值，从而消除孤立的噪声点<sup>[15-16]</sup>。

实际声波信号如图 4 所示，波形由 3 部分组成，其中起始部分是起爆波，其特征是幅度较大，中间部分为接箍回波，后面部分为液面回波。由于起爆波之后的声波衰减较快，接箍回波很难被直接识别出来。为此截取实际声波信号的第 800~2 000 个数据点作为接箍波，并运用上述两种方法进行滤波处理，结果如图 5 所示。

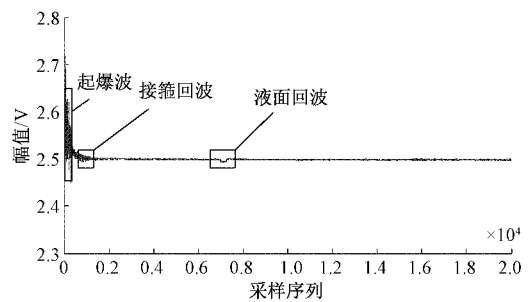
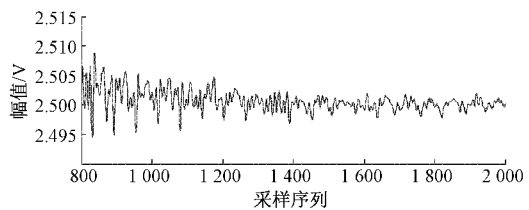
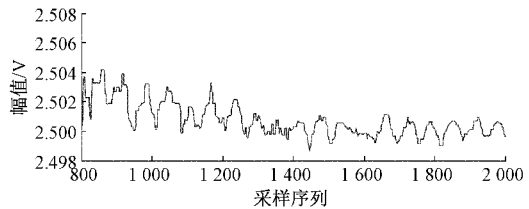


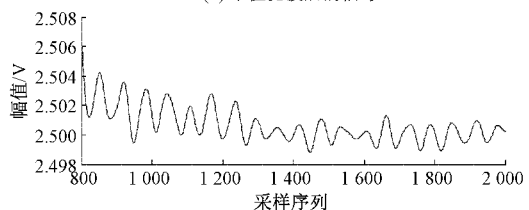
图 4 实际声波信号



(a) 原始接箍回波信号



(b) 中值滤波后的信号



(c) BLPF 后的信号

图 5 两种滤波方法与原始接箍回波信号对比

由图 5 可见,虽然中值滤波起到了一定的去噪作用,但是接箍波的周期却未识别出来,而 BLPF 后的信号波形平滑呈周期分布,去噪效果好。对接箍波进行信号处理的特殊性在于既要滤除其高频杂波,同时又要保留原始信号严格的相位关系,BLPF 可以完全满足这一要求。

### 2.3 接箍波反射周期检测方法

为了计算出声波在环形空间中的接箍波周期,可以参考语音信号处理中的基因估计的一些方法,例如短时自相关函数 (autocorrelation function, ACF) 和 AMDF,它们均是时域基因检测算法,运算量对比频域基因检测算法相对较小,结果直观,具有良好的时间复杂度。

经典的 ACF 是 1977 年 Rabiner 等提出的,该函数的思想就是测定原始信号和它位移后的信号之间的相似性,当时延等于信号周期的倍数时就会出现极大值,根据除原点外的多个极大值之间的位置,可获得信号周期<sup>[17]</sup>。对于非平稳信号,一般采用逐帧进行短时相关分析<sup>[18]</sup>。ACF 的定义如下:

$$R_w(l) = \sum_{n=0}^{N-l-1} s_w(n)s_w(n+l) \quad (4)$$

式中: $N$  为帧长; $l$  为时间延迟量; $s_w(n) = s(n)\omega(n)$  为加窗信号; $s(n)$  为信号序列, $\omega(n)$  是方窗函数,即:

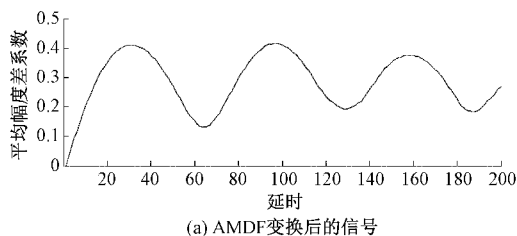
$$\omega(n) = \begin{cases} 1, & n = 0:N-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

经典的 AMDF 是由 Ross 等在 1974 年提出的,该函数的设计初衷和短时自相关函数一致,也是为了测定原始信号和它位移后的信号之间的相似性,但表现和短时自相关函数不同。AMDF 会在时延等于基因周期的倍数处出现谷值点,找出除原点外的多个谷值点,就可以获得信号的周期<sup>[19]</sup>。对于非平稳信号,一般采用逐帧进行短时平均幅度差分析。AMDF 的定义<sup>[20]</sup>如下:

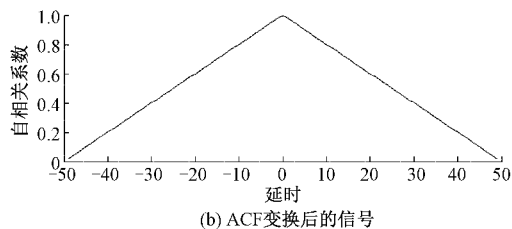
$$F_w(l) = \sum_{n=0}^{N-l-1} |s_w(n+l) - s_w(n)| \quad (6)$$

在平稳无噪声的周期信号中,由于这两种算法原理相似,因而均能达到计算周期的能力,但在实际的声速测量中,只有 AMDF 能实现周期的获取。下面分别用这两种方法计算图 5(c)中的波形的周期,结果如图 6 所示(取窗长为 50)。

图 6 表明,ACF 法无法识别出实际信号中的波峰与波谷的周期特征,因而无法获得信号的周期,而 AMDF 法可以明显地看到 3 个波谷,因此,可以通过计算相邻的两个波谷之间的间隔得到周期。总的来说,虽然 ACF 是一种简单有效的函数,但是无论处理什么信号,该算法必定涉及大量



(a) AMDF变换后的信号



(b) ACF变换后的信号

图 6 两种周期检测方法

的乘法,这严重影响了算法的效率,并且该算法受噪声影响较大,当信号中的谐波成分丰富时,易受“半频”、“倍频”错误的影响。而 AMDF 算法原理简单,只要通过一些加减法就可以实现,算法复杂度小<sup>[21]</sup>。

### 2.4 声速的确定

通过上述分析对比,最终确定选用 BLPF 和 AMDF 提取周期相结合的方法来对声速进行获取。若要从回波中提取有效的接箍回波,选取接箍回波的范围至关重要。大量实验表明,井下 150~700 m 内接箍回波较为明显,若假设仪器的采样周期是 0.96 ms,则选取采样点序列 1 000~4 000 较为合适,部分接箍回波波形如图 7 所示。接下来对选取的数据点进行 BLPF,滤波后的结果如图 8 所示。

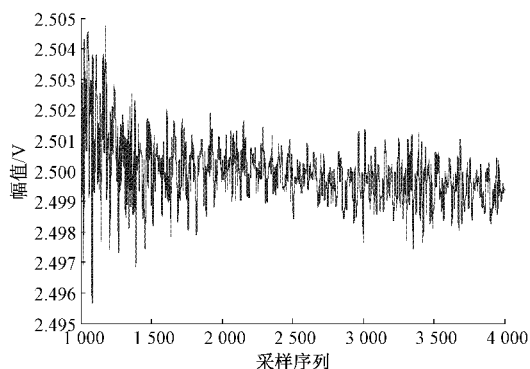


图 7 部分接箍回波波形

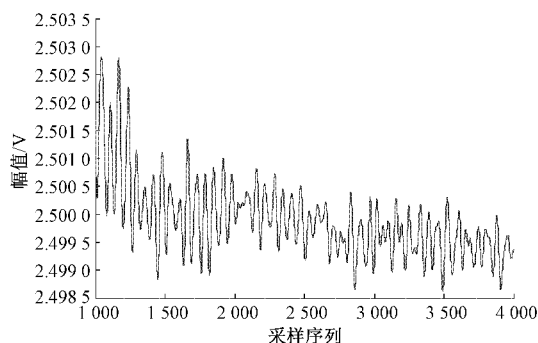


图 8 部分接箍回波 BLPF 后的结果

为了准确地计算出一节油管上的平均采样次数  $n$ ,本文取了 30 帧数据,每帧的帧长为 200 个采样点,帧移为 100 个采样点,然后对  $n$  进行计算。图 9 是接箍回波前 4 帧的 AMDF 计算结果,可见输出波形类似正弦波,波峰与波谷

较为明显,且呈等周期分布特征。在此基础上,通过计算两个波谷之间的距离即为当前帧所对应的  $n$  值。同理,对后续 26 帧数据按照相同的方法处理,最后通过算数平均的方法计算出一节油管上的平均采样次数  $n = 61.58$ , 由于采样周期  $T_s = 0.96 \text{ ms}$  为系统已知,因此,根据式(7)可计算出声速  $v$ :

$$v = \frac{2L}{T_s n} = \frac{2 \times 9.6 \times 1000}{0.96 \times 61.58} = 324.78 \text{ m/s} \quad (7)$$

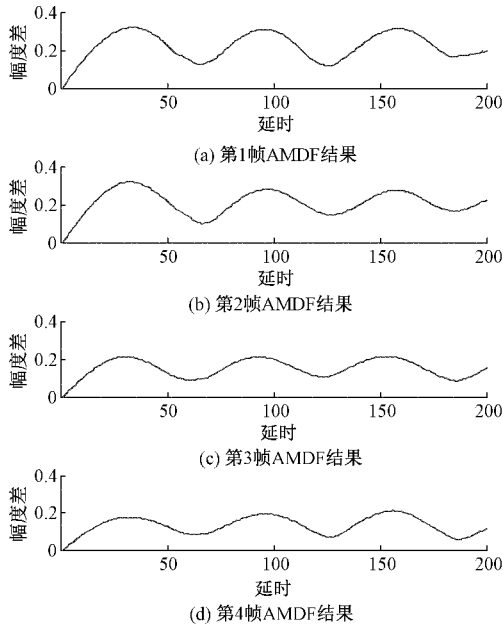


图9 部分接箍回波前4帧AMDF计算结果

### 3 时间提取与液面深度计算

声波从发射到液面回波再次被换能器接收之间的时间称为声波旅行时间,它是计算油井动液面深度的重要参数之一。由于声波在井中受各种噪声干扰,且随着距离变长会衰减较快,导致液面回波位置不易识别,从而引起时间提取错误。因此,时间提取的基本思路是:首先截取液面回波位置附近的数据点,对其进行去噪处理,然后采用一定的方法对液面位置进行识别。

#### 3.1 液面回波滤波处理

理想情况下,液面回波清晰且无噪声,可以清楚地看到动液面的位置,从而容易确定回波时间。但是在实际的油井中环境复杂,噪声可能比声波信号的强度大得多,会出现液面位置无法辨别的情况,这会严重影响测量结果的准确性。为此,本文分析了BLPF和WDD两种去噪方法,并给出了处理结果。

WDD是一种时间窗和频率窗都可改变的时频分析方法,其基本思想是将信号通过小波变换后,有用信号的小波系数幅值较大,噪声的小波系数幅值较小,通过在不同尺度上选取阈值,将低于阈值的小波系数置0,重构后的信号能

有效地消除噪声的影响<sup>[22-24]</sup>。WDD的流程如图10所示。

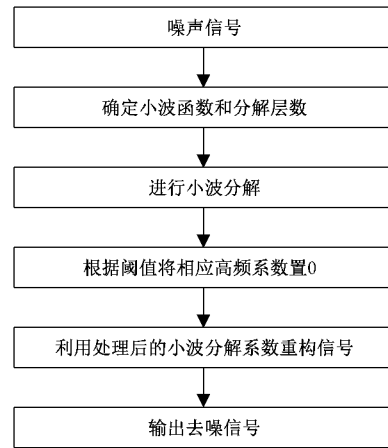


图10 WDD流程

图11为液面回波滤波前后的对比图。为了确保不丢失液面回波信息,图中原始采样点序列取4000~12000。结果表明,WDD可以很好地保存信号和局部突出部分,其效果优于BLPF去噪。

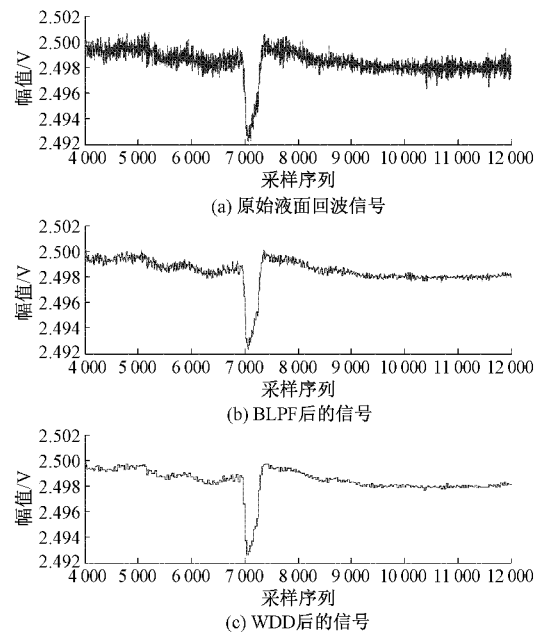


图11 两种滤波方法对比

#### 3.2 时间提取

为了提取声波的旅行时间,就需要准确地确定声波回波中突变点的位置。本文提出了直接提取法和WSVD法两种信号处理方法,如下对这两种方法进行描述。

所谓直接提取法,就是通过判断回波中突变点的位置而直接确定回波时间的方法。具体做法是:首先利用MATLAB中min函数直接提取采样序列4000~12000中幅度最小值的位置,例如本例中,运算得最小值的序列号  $n = 7041$ 。

所谓 WSVD 法是指小波变换中信号的奇异点和信号中的其他点会存在不同的特性,也就是说小波变换模极大值的地方会对应着信号突变发生的位置<sup>[25]</sup>。例如,一个函数  $f(x)$  在  $x_0$  处不可微,那么,  $f(x)$  在  $x=x_0$  处是奇异的。将 Lipschitz 指数引中到  $0 \leq \alpha < 1$ , 在  $x=x_0$  的邻域内,如果满足式(8)时,就称  $f(x)$  在  $x=x_0$  的 Lipschitz 奇异值为  $\alpha$ <sup>[26]</sup>。

$$|f(x) - f(x_0)| \leq C |x - x_0|^\alpha \quad (8)$$

式中:  $C$  为常数。

如果小波函数  $\varphi(x)$  和  $N$  阶及其以下的多项式都正交,对任意  $0 \leq k \leq N$  时,存在:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^k \varphi(x) dx = 0 \quad (9)$$

则称该小波函数具有  $N$  阶消失矩。

Lipschitz 指数和小波变换之间有着重要的关系<sup>[27]</sup>。Mallat 证明,如果小波函数具有  $N+1$  阶消失矩,  $f(x)$  在  $x=x_0$  处是 Lipschitz 奇异值是  $\alpha$ , 则对任意尺度和  $x_0$  所有邻域中的点,存在:

$$|Wf(s, x)| \leq As^\alpha \left(1 + \left|\frac{x - x_0}{s}\right|^\alpha\right) \quad (10)$$

假设  $|x - x_0| \leq cs$ , 那么:

$$|Wf(s, x)| \leq As^\alpha (1 + c^\alpha) \quad (11)$$

对式(11)两边取以 2 为底的对数,

$$\log_2 |Wf(s, x)| \leq \log_2 A(1 + c^\alpha) + \alpha \log_2 s \quad (12)$$

如果存在一点  $(s_0, x_0)$  使得:

$$\frac{\partial Wf(s, x)}{\partial x} \Big|_{s_0, x_0} = 0 \quad (13)$$

就称该点  $(s_0, x_0)$  为小波变换的模极大值点。

小波变换的模极大值可以用来检测信号的突变,假设信号  $f(x)$  在区间  $[a, b]$  上,小波函数  $\varphi(x)$  具有  $N$  阶消失矩且具有  $N$  阶可微性,对任意  $s < s_0$ , 都不存在小波模极大值,那么在区间  $[a + \epsilon, b - \epsilon]$  上,  $f(x)$  具有一致的 Lipschitz 奇异值  $\alpha$ <sup>[28]</sup>。

考虑到起始波与反射波大小位置悬殊产生的影响,使用图 11 中 WDD 后的信号,用 Daubechies 小波系列中的 db5 小波对该曲线进行奇异值检测并确定突变点的位置。利用小波变换对原始信号进行分解,并且重构分解得到的第 1 层信号细节如图 12 所示。曲线表明,突变点的序列号为 7 008,这与原始信号突变点位置保持一致,表明重构小波变换后的细节信号可以将信号中的突变点清晰地显示出来。

### 3.3 动液面深度计算

根据 4.2 节中的讨论,直接提取法和 WSVD 法所得到的回波突变点序列号  $n$  分别是 7 041 和 7 008,将其代入式(14),即可计算动液面深度  $h$  分别为 1 097.65 m 和 1 092.51 m。

$$h = \frac{vnT_s}{2} \quad (14)$$

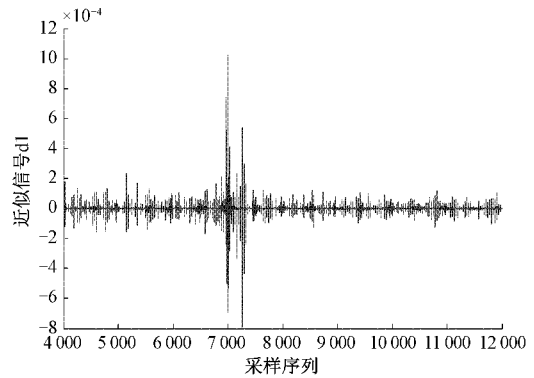


图 12 奇异值检测结果

式中:  $v$  取值 324.78 m/s,  $T_s$  取值 0.96 ms。

与实际深度值 1 092.45 m 相比,两种方法得到的测量误差分别为 5.2 m 和 0.06 m。可见,直接提取法虽然原理简单,但是易受各种因素影响,准确率差,误差高,在实际中并不适用。而 WSVD 法在时域和频域同时具有良好的局部特征以及对信号的自适应能力,不失为一种分析非平稳信号奇异性的有效方法。

## 4 动液面深度检测系统与应用效果

在实际油井动液面测量过程中,设计一款可视化软件非常有必要,它能使操作人员清晰直观地了解声波全波列信号,并用来显示和存储声波数据处理的中间过程与最后结果。为此,本文利用 MATLAB 平台开发了如图 13 所示动液面深度检测系统软件。软件使用了专门用于图形用户界面设计的 GUI 模块,具有操作简单,信息丰富,可读性高的特点<sup>[29]</sup>。该软件主要包括如下功能:

- 1) 可以导入 excel 形式的数据并绘制波形;
- 2) 对选取的接箍波进行 BLPF;
- 3) 查看 1~30 帧 AMDF 变换结果,显示所有帧的平均采样点数,并由此计算声速;
- 4) 对选取的液面回波进行 WDD;
- 5) 对去噪之后的波形进行 WSVD,得到声波旅行时间,并计算动液面深度。

### 4.1 系统的使用方法

首先,为了导入并显示声波数据,在界面中设计了“导入波形数据”按钮和“绘制波形”按钮,依次单击上述按钮,即可选择声波文件,并以曲线形式将波形显示在图形窗中;其次,考虑到采样周期的灵活可调,设计了采样周期输入框;然后,针对接箍回波设计了 BLPF 按钮和 AMDF 变换按钮,依次点击这两个按钮,能够在对应的图形窗中显示处理之后的结果,同时,平均采样点数和声速也会在点击 AMDF 变换按钮之后依次计算出来;最后,针对声波时间提取问题,设计了 WDD 和 WSVD 功能按钮,依次点击这两个按钮,可见 WDD 结果和奇异值检测结果在对应窗口中显示出来,同时计算出动液面的深度。

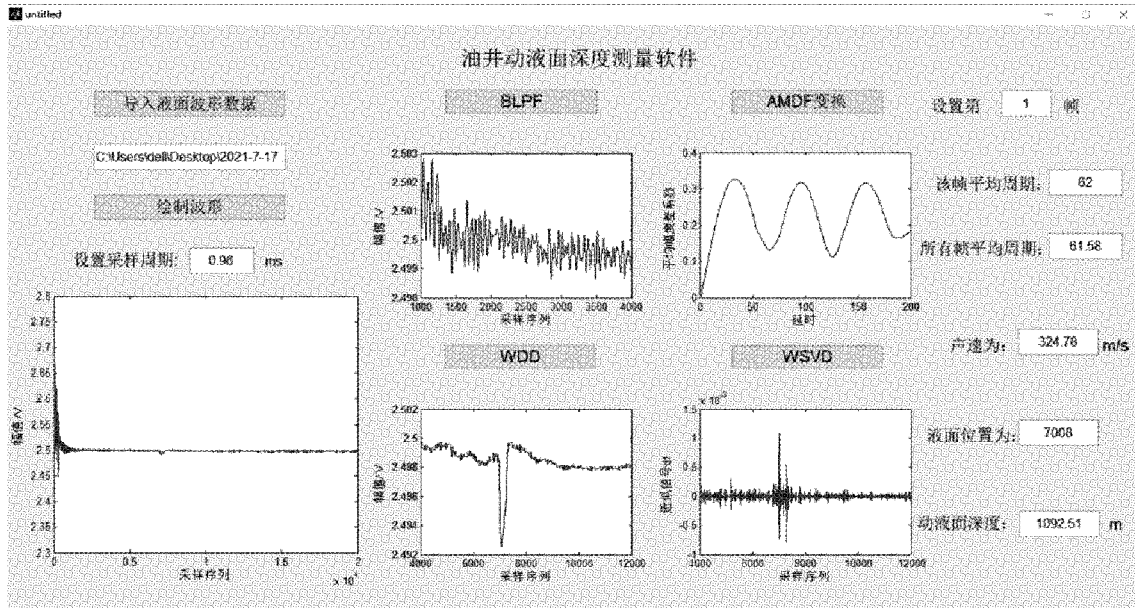


图 13 油井动液面深度检测软件界面

#### 4.2 与其他动液面识别算法对比分析

为了测试本文方法的液面深度计算效果,选取文献[6]和文献[8]中方法与本文方法进行比较。文献[6]主要利用全相位 FFT 来计算井下声速,通过动液面反射信号的自动辨识技术来得到动液面深度。而文献[8]是根据改进型短时能量过零函数和削波函数提出的油井液面深度计算算法。采用控制变量法,确保声波信号来自课题组自制的声波信号模拟器<sup>[30]</sup>产生的同一次波形(其波形特征可控,声速和液面深度已知),采用上述 3 种方法获得的井下声速和液面深度值与设定值进行比较,结果如表 1 所示。

表 1 本文方法与其他方法比较

类型	误差	文献[6]	文献[8]	本文方法
声速	绝对误差/(m·s <sup>-1</sup> )	0.96	1.56	1.03
	相对误差/%	0.296	0.481	0.318
动液面深度	绝对误差/m	5.20	3.84	0.96
	相对误差/%	0.401	0.296	0.074

由表 1 可知,各算法产生的误差存在一定的差异:在声速计算方面,本文方法与文献[6]的方法的相对误差较为接近,相对与文献[8]的方法中更有优越性;在深度计算方面,本文方法具有明显的优势。总的来说,本文所提出的方法在声速和深度方面的准确度均较高,更适用于油井的液面深度计算。

#### 4.3 实测动液面数据分析

为了验证本文方法的可行性,选用某采油厂 1 天采集的 24 组声波数据进行实验,用本文方法测得的油井动液面相关数据(视为测量值)与一种市面上较为成熟的动液

面深度仪的实测数据(视为参考值)进行分析对比,对比结果如图 14 和 15 所示。

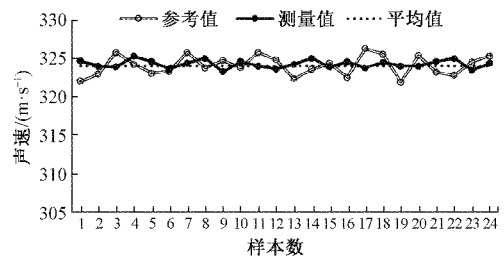


图 14 声速对比图

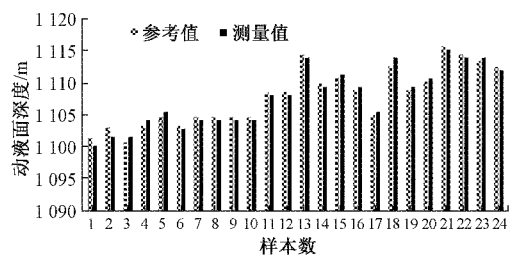


图 15 动液面深度对比图

由图 14 可见,1 天内声速平均值为 324 m/s,声速测量值在平均值上下小幅度浮动;由图 15 可知,动液面深度的测量值与参考值相差不大。上述研究表明本文方法可行,满足测量要求。

为了验证本文方法的精确度,用本文方法对任选的 6 组油井液面深度值进行分析,结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,对比参考值,本文的深度测量绝对误差均不大于 1 m,相对误差不超过 0.075%,说明该方法有效可靠,能够满足实际工程中的需求。

表2 动液面深度测量值和参考值对比

序号	测量值/m	参考值/m	绝对误差/m	相对误差/%
1	1 092.51	1 092.45	0.06	0.005
2	1 171.48	1 170.65	0.83	0.071
3	1 176.81	1 176.09	0.72	0.061
4	1 173.48	1 174.17	-0.69	0.059
5	1 187.49	1 187.60	-0.11	0.009
6	1 177.81	1 178.01	-0.2	0.017

## 5 结论

针对声波法对油井动液面测量过程中声速提取和时间提取的技术难题,本文所做的工作如下:1)根据实际油井结构,分析了声波法测量的基本原理以及井下声波信号的特点;2)通过两种滤波和提取周期方法对比,确定了使用BLPF和AMDF变换结合的方法提取接箍波的平均周期,从而计算井下速度的方案;3)通过两种去噪和提取时间方法对比,确定了使用WDD和WSVD结合的方法提取液面位置,从而得到到达液面所用的时间,以此来计算出井下动液面深度的方案;4)为了直观、实时地分析和处理油井反射声波数据,采用MATLAB可视化工具编写油井动液面深度检测系统软件,最后对多组实测数据进行分析,验证其可行性。

## 参考文献

- [1] 宫照天. 基于动液面的油井优化控制方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- [2] JIA W,ZHOU W,LI T F. A review of dynamic fluid level detection for oil well[J]. Applied Mechanics & Materials,2014,456:582-586.
- [3] 刘冬. 采油井动态液面测量技术质量研究[J]. 中国石油和化工标准与质量,2017,37(10):31-32.
- [4] 林立星. 声波法测油井动液面信号辨识技术研究[D]. 青岛:中国石油大学,2011.
- [5] SAINATH T N, KINGSBURY B, SAON G, et al. Deep convolutional neural networks for large-scale speech tasks [J]. Neural Networks; The Official Journal of the International Neural Network Society, 2015,64: 39-48.
- [6] 王轲. 动液面测量中的声波特性数值模拟与应用研究[D]. 西安:西安石油大学,2020.
- [7] HOU Y B,GAO X W,WANG M S,et al. Application of dynamic liquid level prediction model based on improved SVR in sucker rod pump oil wells [C]. Proceeding of the 32nd Chinese Control Conference, 2013:7826-7830.
- [8] 梁鑫,张著洪. 基于短时能量与LSTM的油井动液面深度研究[J]. 计算机与现代化,2021(4):15-19,26.
- [9] 魏勇,余厚全,戴家才,等. 基于CPW的油水两相流含水率检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(6):1506-1515.
- [10] 张鹏. 基于声波信号盲分离的井下液面深度检测研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2016.
- [11] 吴进峰. 油井动液面测量算法研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2019.
- [12] 任武昆,岳列红,李宁. 基于声波法油井动液面的特殊波形分析[J]. 信息记录材料,2019,20(7):120-122.
- [13] MOLENAAR M M, HILL D, WEBSTER R, et al. First downhole application of distributed acoustic sensing for hydraulic-fracturing monitoring and diagnostics [J]. SPE Drilling & Completion, 2012, 27(1): 32-38.
- [14] 汪宁,查明,李纵,等. 巴特沃思型低通滤波器的归一化设计[J]. 舰船电子工程,2018,38(1):61-64.
- [15] 刘鹏宇,哈睿,贾克斌. 改进的自适应中值滤波算法及其应用[J]. 北京工业大学学报,2017,43(4):581-586.
- [16] 卢晨,凌兴宏. 基于强度-梯度映射与多方向中值滤波的红外弱小目标检测算法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(12):151-158.
- [17] KOLOKOLOV A S, LYUBINSKII I A. Measuring the pitch of a speech signal using the autocorrelation function[J]. Automation and Remote Control, 2019, 80(2): 317-323.
- [18] 纪振发,杨晖,李然,等. 基于短时自相关及过零率的语音端点检测算法[J]. 电子科技,2016,29(9):52-55.
- [19] 吴艳君,黄坚,夏家莉. 基于AMDF的脉搏周期检测改进算法[J]. 计算机应用与软件,2014,31(6):52-54.
- [20] 马莎莎,戴曙光,穆平安. 基于短时能量的循环AMDF基音检测算法[J]. 计算机仿真,2014,31(7):278-282.
- [21] 刘迪,樊建春,刘书杰,等. 基于ACF-AMDF的气井环空液面回波特征提取方法[J]. 中国安全生产科学技术,2018,14(9):63-68.
- [22] WANG Z Y, ZHU J J, YAN Y H, et al. A new modified wavelet-based ECG denoising [J]. Computer Assisted Surgery,2019,24: 174-183.
- [23] 谢丽娟,路锋,王旭,等. 一种用于信号去噪的小波阈值去噪算法[J]. 国外电子测量技术,2020,39(4):32-36.
- [24] 李红延,周云龙,田峰,等. 一种新的小波自适应阈值函数振动信号去噪算法[J]. 仪器仪表学报,2015, 36(10):2200-2206.
- [25] DING W S, LI Z G. Research on adaptive modulus maxima selection of wavelet modulus maxima denoising [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(13): 175-180.
- [26] 张军,郑玉新,赵静. 经验小波变换在信号趋势项提取中的应用研究[J]. 电子测量技术,2019,42(16):17-22.
- [27] 冯媛硕,宋吉江. 基于小波变换的信号特征与突变点检



- 测算法研究[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2015, 41(1):76-80.
- [28] 傅之越,张睿,李福凤. 基于小波模极大值的脉搏信号特征点识别方法[J]. 计算机工程, 2019, 45(11): 287-297.
- [29] HAMZEH S, ÓLAFUR G, ARI T. GSpecDisp: A matlab GUI package for phase-velocity dispersion measurements from ambient-noise correlations [J]. Computers and Geosciences, 2018, 110: 41-53.
- [30] 颜丽君,吴爱平,付青青,等. 基于FPGA的声波测井信号模拟器设计[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(6):21-27.
- 魏勇(通信作者),副教授,主要研究方向为声电测井新方法方法与仪器研究、信号检测与传输、无线能量传输、人工智能与深度学习等。  
E-mail: weiyong@yangtzeu.edu.cn
- 汪玉祥,硕士研究生,主要研究方向为信号采集与智能控制。  
E-mail: wangyuxiang202@163.com
- 陈强,高级工程师,主要研究方向为生产测井方法研究与仪器研制。  
E-mail: zycjchcnqiang@cnpc.com.cn
- 刘国权,总工程师,主要研究方向为生产测井方法研究与仪器研制。  
E-mail: 122694950@qq.com

### 作者简介

王路平,硕士研究生,主要研究方向为信号处理与智能仪器研究。

E-mail: 1339538346@qq.com

马伟楠,中级工程师,主要研究方向为生产测井仪器现场试验与测井工艺研究。

E-mail: manan0329@qq.com