

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108424

噪声激振下的油井动液面测量方法研究^{*}

罗久飞¹, 郑明轩¹, 冉超², 李锐², 杨平安²

(1. 重庆邮电大学先进制造工程学院 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)

摘要:油井动液面深度是原油开采中的关键工作参数,也是油田合理安排开采计划的重要依据。针对目前声共振法存在测量范围不足和测量精度较低的问题,论文提出了噪声激振下的油井动液面测量优化方法。本文首先探究了激励频带变化对测量结果的影响,并建立了强噪声激励下系统输出响应信号的数学模型。然后,根据建立的数学模型提出了共振信号的提取算法,通过功率谱估计和自适应同态滤波有效抑制了强噪声对共振信号的干扰。最后,研究了基于双线性插值的离散频谱校正算法,实现了共振特征参数的精确估计。实验结果表明,该方法能在强噪声干扰下提取出共振信号,实现了超过1 700 m的动液面稳定测量,且波动小于2 m。

关键词: 动液面; 功率谱估计; 同态滤波; 频谱校正

中图分类号: TE938 TH816 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 440.50

Research on detection of dynamic liquid level of oil wells based on noise excitation

Luo Jiufei¹, Zheng Mingxuan¹, Ran Chao², Li Rui², Yang Ping'an²

(1. College of Advanced Manufacturing Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: As an essential working parameter in crude oil exploitation, the dynamic liquid level depth of oil well is also the indispensable basis for the reasonable arrangement of oil exploitation. In this article, the optimization method based on noise excitation is proposed to ameliorate the existing acoustic resonance method, which has insufficient measurement range and low measurement accuracy. Firstly, the effect of various excitation frequency bands on the measurement results is investigated, and the mathematical model of the output response signal of the system with strong noise excitation is formulated. Then, the extraction algorithm of resonance signal is proposed, which is based on the established mathematical model. The power spectrum estimation and the adaptive homomorphic filtering are applied to suppress the interference of strong noise. Finally, the discrete spectrum correction algorithm based on bilinear interpolation is studied. The resonance characteristic parameters can be estimated accurately. Experimental results show that the resonance characteristic can be extracted under strong noise. The stable measurement of dynamic liquid level can be achieved, where the length of liquid level was over 1 700 m and fluctuation was less than 2 m.

Keywords: dynamic liquid level; power spectrum estimation; homomorphic filtering; spectrum correction

0 引言

液位深度检测在石油工程、化工工程、地质工程等领域具有广泛应用,是判断系统工作状态,进行监测维护的重要环节^[1-3]。例如,当前石油开采中普遍使用有杆泵进行抽油作业,泵在原油中的淹没深度是抽油泵

实现稳定工作的关键参数^[4-5]。淹没深度过大或者过小不仅影响机械本身的性能,还会造成巨大的能源浪费,增加开采成本^[6]。如果能实时精确地测量动液面深度,并根据井下液面变化及时调整作业,对提高油田生产效率具有重要意义。同时,动液面深度作为反映地液供给能力的主要指标之一,也是油田合理安排开采计划的重要依据^[7]。

目前动液面深度检测方法主要包括浮筒法^[8],压力计检测法^[9],声学法^[10]等。其中,基于声波传导的回波法由于操作简单,成本低廉等优势成为油井动液面测量中应用较广的方法之一,其基本原理是在井口发射高强度脉冲声波,通过探测动液面反射回波,估算声波在井内的传播时间实现动液面深度的计算^[11]。研究表明,脉冲波在井下尤其是套管内部压力较小的油井中传播时能量衰减快,导致液面反射波往往极其微弱^[12]。随着动液面深度的增加,回波信号常常淹没在较强的噪声之中,对动液面深度的准确测量构成挑战。除液面回波外,接收到的信号中还可能包括油管接箍反射的接箍波,油套管上黏附油污反射的回波等,这些假性回波严重干扰了液面回波的辨识^[13-14]。因此,复杂工况下的动液面回波信号识别方法得到了广泛的关注^[15-16]。然而,在实际测量中回波信号的精确辨识仍然面临诸多困难。

近年来,一些学者研究了基于声场特性的液位测量方法,为油井动液面深度的精确测量提供了新途径。例如,Donlagic 等^[17]利用声波共振原理,提出了一种适用于工业液位测量的方法。实验结果表明,该方法对液体表面的泡沫,管道内残留物等干扰具有很好的鲁棒性,但受到麦克风响应频率的限制,测量范围较小。文献[2]在此基础上通过高频声波对工业液位进行测量,克服了麦克风响应频率限制的问题,并分析了误差产生的原因,提出了一种误差补偿算法,进一步提升了测量精度,但测量范围仍然受限。2015 年,周伟等^[18]提出一种以宽频带白噪声为激励源的动液面测量方法。该方法以单端封闭管道为研究对象,根据其声场特性,建立液面深度与井下空气柱共振频率之间的数学关系,通过测量井内空气共振特性实现液面深度的计算,有效避免了回波法需要辨识微弱液面回波的缺点。文献[12]改进了相关算法,进一步提升了测量范围,但其测量精度和范围仍难以满足实际工程的需求。

本文根据共振法的测量原理,研究了响应信号的数学模型,设计了基于功率谱估计的自适应同态滤波器,并提出了一种适用于共振频率差精确估计的离散频谱校正算法,同时优化了噪声激振方式,提升了共振效果,最终建立了动液面优化测量算法。实验结果表明,改进的新方法在测量精度和测量范围方面都得到较大的提高。

1 基于声波共振的动液面测量原理和方法

1.1 动液面测量数学物理模型

根据平面声波在油套管中的传播原理,文献[12]和[18]建立了油井动液面深度与空气柱固有频率之间的数学关系。

$$L = \frac{v_c}{2f_\Delta} - 0.3d \quad (1)$$

式中: L 为油井动液面深度, v_c 为油套管内部的平均声速, f_Δ 为两相邻共振频率的差值, d 为油管和套管的内径差。由式(1)可知,当井下声速确定后,共振频率差 f_Δ 将是决定油井动液面深度估计的关键性参数。

1.2 测量方法

首先由计算机生成连续的噪声信号,经数模转换后通过功率放大器,进而驱动激振器连续发声,持续的噪声输入将引起油套环空内气柱发生共振。同时,由声传感器接收油套环空内声压变化,信号经放大和模数转换后传入计算机,最后处理得到井下液面深度。

需要指出的是宽频带噪声中的高频成分在长距离传播过程中能量衰减较快,往往还未传播至动液面处就已大部衰减。随着油井动液面深度的增加,共振谐波的分布频段向低频带偏移。测试表明,对于直径为 120 mm,长度大于 500 m 的聚乙烯给水管道,管内空气柱有效共振频带一般位于 100 Hz 以内,在激振功率一定的情况下,采用宽频带噪声激励效果有限。因此,本文采用小于 100 Hz 有限带宽低频噪声实施激振,能有效集中激振能量,显著提升低频带共振强度,有利于目标信号的检测和提取。

2 响应信号的数学模型

油井动液面测量过程中,由于信号采集端和噪声激励源位于同侧,导致采集到的声波信号中不仅包括套管环空气柱的共振声波,而且包含激励源发出的噪声,同时还可能伴有作业过程中的各种干扰。此外,考虑到空气柱共振声波信号通常较为微弱,如何精确地提取共振频率特征成为动液面测量的关键。若忽略系统的非线性因素,并且考虑管柱内空气为理想流体,则在一定时间内可将管柱声场近似为线性时不变系统。管柱声场的输出响应可由输入的窄带噪声信号与管柱声场特性卷积得到,因此采集到的声波信号 $y(t)$ 主要由管柱声场的输出响应,激励源噪声和测量系统其他干扰等叠加组成,即:

$$y(t) \approx z(t) * s(t) * p(t) * r(t, x) + z(t) * s(t) * q(t) + z_1(t) \quad (2)$$

式中: $*$ 为卷积运算; $p(t)$ 为油套环空声场特性; $s(t)$ 为系统特性,包括声传感器特性、功率放大器特性、激励源特性等; $z(t)$ 为激励噪声; $r(t, x)$ 表示声传感器位置特性函数; $q(t)$ 为激励源噪声到声传感器的传递路径函数; $z_1(t)$ 为其他干扰。对信号 $y(t)$ 采样后做快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)可得频域信号模型为:

$$Y(\omega) \approx P(\omega) \cdot R(\omega) \cdot S(\omega) \cdot Z(\omega) + Q(\omega) \cdot S(\omega) \cdot Z(\omega) + Z_1(\omega) \quad (3)$$

式(3)表明信号的频域主要由3部分构成,即油套环空的共振特性、激励源噪声和其他外部干扰。其中,油套环空的共振特性由激励噪声特性、声场特性、传感器位置和测量系统特性共同决定。与激励源噪声相比,外部干扰通常较小,在忽略其贡献基础之上,式(3)可以简化为:

$$Y(\omega) \approx [Q(\omega) + P(\omega) \cdot R(\omega)] \cdot S(\omega) \cdot Z(\omega) \quad (4)$$

式(4)表明采集到的声波信号具有同态特性。因此,可利用同态滤波将乘积转换为加性关系,从而有利于分离信号中测量系统特性和激励源噪声特性的干扰,便于确定共振特征频率。特别是当动液面深度增加时,共振信号的强度急剧减小,最终可能完全被激励噪声淹没,此时利用同态滤波稳定分离出共振特性至关重要。由于激励噪声的随机性影响,在实际处理中采用 Welch 功率谱估计^[12]可得到较为稳定的频域特性,式(4)可改写为:

$$|Y(\omega)|^2 \approx |G(\omega)|^2 \cdot |S(\omega)|^2 \cdot |Z(\omega)|^2 \quad (5)$$

其中, $G(\omega) = Q(\omega) + P(\omega) \cdot R(\omega)$ 。在采样频率和样本总数一定情况下, Welch 功率谱的频率分辨力主要取决于选用的窗函数和分段样本数 M 。频率分辨力大小对功率谱估计结果有直接的影响。当 M 较大,即分段数 L 较小时,频谱分辨力高,功率谱估计中的成分不仅包含系统特性,传递路径函数和噪声特性,还含有可分辨的多阶共振频谱峰群,即油套环空的声场特性。相反当 M 较小时,功率谱的频谱分辨力将下降,可能导致频域的共振峰群无法分辨,在频谱泄露效应的作用下共振峰群能量被分散到了附近频带。因此,可以利用不同频率分辨力大小的功率谱估计结果结合同态滤波实现系统特性和噪声特性分离。

3 信号处理算法

3.1 自适应同态滤波

记不同频率分辨力的 Welch 功率谱估计为 $|Y_1(\omega)|^2$ 和 $|Y_2(\omega)|^2$, 分段样本数分别为 M_1 和 M_2 ($M_1 > M_2$), 对每段样本进行后补零处理, 保证各段功率谱具有相同的 FFT 点数 M_w ($M_w > M_1$)。由式(5)可得:

$$\lg |Y_1(\omega)| \approx \lg |G_1(\omega)| + \lg |S_1(\omega)| + \lg |Z_1(\omega)| \quad (6)$$

以及:

$$\lg |Y_2(\omega)| \approx \lg |G_2(\omega)| + \lg |S_2(\omega)| + \lg |Z_2(\omega)| \quad (7)$$

令 $I(\omega) = \lg |Y_1(\omega)| - \lg |Y_2(\omega)|$ 则有:

$$I(\omega) \approx \lg (|G_1(\omega)| / |G_2(\omega)|) + \Delta S(\omega) + \Delta Z(\omega) \quad (8)$$

其中, $\Delta S(\omega) = \lg |S_1(\omega)| - \lg |S_2(\omega)|$, $\Delta Z(\omega) = \lg |Z_1(\omega)| - \lg |Z_2(\omega)|$ 。若 M_2 足够小, 则可有效抑制功率谱 $|Y_2(\omega)|^2$ 中的共振峰群, 此时有:

$$|G_2(\omega)| = |Q_2(\omega) + P_2(\omega)R_2(\omega)| \approx |Q_2(\omega)| \approx |Q_1(\omega)| \quad (9)$$

同时考虑到多段平均作用, 对于同一样本不同分辨力的 Welch 功率谱, 系统特性和噪声特性几乎不会发生明显变化, 即有 $\Delta S(\omega) \approx 0$ 和 $\Delta Z(\omega) \approx 0$ 。式(8)变为:

$$I(\omega) \approx \lg |1 + P_1(\omega)R_1(\omega)/Q_1(\omega)| \quad (10)$$

若 M_1 足够大并能保证功率谱 $|Y_2(\omega)|^2$ 中的共振峰群辨识能力, 则有 $P_1(\omega) \approx P(\omega)$ 。同时令 $A(\omega) = R(\omega)/Q(\omega)$, 式(10)简化为:

$$I(\omega) \approx \lg |1 + P(\omega) \cdot A(\omega)| \quad (11)$$

式(11)可进一步改写为:

$$I(\omega) \approx \lg(1 + |P(\omega)| \cdot |A(\omega)|) + \Delta P(\omega) \quad (12)$$

其中, $\Delta P(\omega)$ 是由相位变化产生的修正项。考虑到油套环空中空气共振较弱 $|P(\omega)| \cdot |A(\omega)| < 1$, 利用泰勒展开可得:

$$I(\omega) \approx |P(\omega)| \cdot |A(\omega)| + \Delta P(\omega) \quad (13)$$

式中: $|P(\omega)|$ 为声场特性, 具有较强的周期性; $\Delta P(\omega)$ 较小且不具有明显的周期性; $A(\omega)$ 由激励源噪声传递路径和传感器位置特性决定, 在低频段其频率特性较为稳定, 二者乘积可认为对共振特性 $|P(\omega)|$ 进行了频域加窗处理。因此, 选取 $I(\omega)$ 中周期性较强的部分再次进行 FFT 变换, 即可计算出共振频率差 f_Δ 为:

$$f_\Delta = \frac{M_F f_s}{\gamma M_w} \quad (14)$$

式中: M_F 为选取的共振峰群总点数, f_s 为信号采样频率, γ 为截选频段内共振谱峰波动次数, M_w 为 Welch 功率谱估计中每段样本的 FFT 点数。

3.2 共振频率差的精确估计

式(14)表明动液面深度测量问题可转化为噪声干扰下的参数估计。通过 FFT 变换计算 γ 时, 通常取频谱中最大谱线号作为 γ 的估计值, 然而受到频谱泄露和栅栏效应的影响, 导致其与实际值可能存在较大误差, 最终造成共振频率差的计算结果具有较大波动。例如, 液面深度若为 1 700 m、声速为 340 m/s、 f_Δ 的实际值约为 0.10 Hz, 即使 f_Δ 估计误差仅为 0.01 Hz, 也将导致超过百米的估计误差。因此, 通过采用离散频谱校正算法, 对 γ 的初步估计值进行校正, 降低 f_Δ 的误差, 可显著提升动液面深度的测量稳定性和精度。

插值法是目前研究最为深入, 应用最广的频谱校正方法之一, 其原理是利用若干谱线幅值比求得校正量 δ 。通常当窗函数选定, 离散频谱中谱线比值与校正量存在一定的对应关系。对于某些特殊的窗函数可反解得到

校正量与谱线比值的简单显式表达^[19-20]。式(13)中声场特性 $|P(\omega)|$ 具有较强周期性,若只考虑其最主要的周期性成分,则可认为 $|P(\omega)|$ 是关于 ω 的单频周期信号。 $|P(\omega)|$ 与 $|A(\omega)|$ 相当于对 $|P(\omega)|$ 进行加窗处理,记为 $P_A(\omega)$ 。由于 $|A(\omega)|$ 未知,且不同测量条件下 $|A(\omega)|$ 可能变化较大,采用传统的插值法难以达到较好效果。因此,本文提出一种基于双线性插值的离散频谱校正算法,能够自适应 $|A(\omega)|$ 特性的变化,从而实现 γ 的快速精确估计。设 l 为归一化频率初始估计值,与理论值误差为 δ ,定义比值 ξ 为:

$$\xi = \frac{|X(l+0.5)| - |X(l-0.5)|}{|X(l+0.5)| + |X(l-0.5)|} \approx \frac{W(\delta-0.5) - W(\delta+0.5)}{W(\delta-0.5) + W(\delta+0.5)} \quad (15)$$

其中, $X(\cdot)$ 表示 $P_A(\omega)$ 的离散傅里叶变换, $W(\cdot)$ 表示窗谱函数。可见比值 ξ 是关于 δ 的奇对称函数。记 $g(\delta) = \xi$,并将 $g(\delta)$ 在 $\delta=0$ 处 H 阶泰勒展开,则式(15)可改写为:

$$g(\delta) \approx \sum_{i=2n+1, n \in \mathbb{N}}^H \kappa_i \delta^i \quad (16)$$

式中: $\kappa_i = g^{(i)}(0)/i!$ 表示泰勒级数第 i 项的系数。研究表明对于矩形窗,汉宁窗等窗函数 $\kappa_i (i > 1)$ 为0,对于其他窗函数 $\kappa_i (i > 1)$ 远远小于 κ_1 。因此,式(16)可简化为:

$$g(\delta) \approx \kappa_1 \delta \quad (17)$$

于是校正量 δ 可初步估计为:

$$\hat{\delta} = \xi / \kappa_1 \quad (18)$$

在动液面深度测量中由于很难获得 $|A(\omega)|$ 的特性,因此可采用双线性插值方法以避免计算 κ_1 。首先对 $P_A(\omega)$ 后补充三倍零,并计算其离散频谱 $\bar{X}(\cdot)$ 。设幅值谱 $|\bar{X}(\cdot)|$ 中最高谱线和次高谱线所对应的归一化频率分别为 γ_1 和 γ_2 ,则有:

$$\begin{cases} \xi_1 = \frac{|\bar{X}(\gamma_1+2)| - |\bar{X}(\gamma_1-2)|}{|\bar{X}(\gamma_1+2)| + |\bar{X}(\gamma_1-2)|} \\ \xi_2 = \frac{|\bar{X}(\gamma_2+2)| - |\bar{X}(\gamma_2-2)|}{|\bar{X}(\gamma_2+2)| + |\bar{X}(\gamma_2-2)|} \end{cases} \quad (19)$$

根据式(18)和(19),分别利用 γ_1 和 γ_2 可计算两个归一化频率估计值为:

$$\begin{cases} \hat{\gamma}_1 = \gamma_1/4 + \xi_1/\kappa_1 \\ \hat{\gamma}_2 = \gamma_2/4 + \xi_2/\kappa_1 \end{cases} \quad (20)$$

忽略噪声干扰的条件下满足 $\hat{\gamma}_1 = \hat{\gamma}_2$,则根据式(20)可得:

$$\begin{cases} \kappa_1 = 4(\xi_2 - \xi_1)/(\gamma_1 - \gamma_2) \\ \hat{\gamma}_1 = \gamma_1/4 + \xi_1/\kappa_1 \end{cases} \quad (21)$$

整理可得最终归一化频率估计值为:

$$\hat{\gamma} = \frac{\gamma_1}{4} + \frac{\xi_1(\gamma_1 - \gamma_2)}{4(\xi_2 - \xi_1)} \quad (22)$$

因此,通过上述算法对 γ 的初步估计值进行校正,并根据式(14)可最终实现共振频率差 f_Δ 的精确估计。

3.3 信号处理流程

本文提出的信号处理流程如表1所示,首先对采集到的共振声波信号进行Welch功率谱估计,然后进行同态滤波处理,之后通过短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)确定共振频段,并对选取的共振频段再次进行FFT计算得到 γ 值,结合离散频谱校正算法对 γ 进行校正,最后由式(1)和(14)计算动液面深度。

表1 信号处理流程

Table 1 Flow of signal processing

序号	步骤方法
1	采集共振声波信号
2	对测量信号进行不同频率分辨力的Welch功率谱估计
3	自适应同态滤波
4	通过STFT确定共振信号分布频段
5	对选取的功率谱频段再次进行FFT计算,初步估计 γ
6	通过双线性插值频谱校正算法计算 γ 的精确值
7	计算动液面深度

4 实验验证与分析

4.1 模拟实验平台

为了验证本文所提动液面深度测量方法的可行性以及相关信号处理算法的准确性,搭建了如图1所示,包括实验管道、功率放大器、激励源、声传感器、NI9234数据采集卡等的实验平台,其中实验管道为两条长度不同,直径均为406 mm的钢管管道,其末端没入水中形成封闭液面,通过测量管口至末端液面的距离以模拟液面深度的测量。

4.2 测量方法对比实验

1) 实验1

首先采用传统回波法测量管口至液面距离,采集到的信号如图2所示,其中信号采样频率 $f_s = 5120$ Hz,采样时间30 s。图中可明显识别液面回波信号,同时还包含由弯曲管壁或管内污渍反射产生的假性回波,其波形与液面回波信号高度相似,干扰了液面回波的辨识,不利于声波传播时间的精确提取。对信号做自相关分析可得脉冲信号与液面回波信号的时间间隔为5.46 s,实验管道内平均声速约为350 m/s,并且考虑到麦克风置于管内0.8 m处,最终得到管口至液面距离为 $L_1 = 957.10$ m。



图1 液面测量实验平台

Fig. 1 Liquid level measurement platform

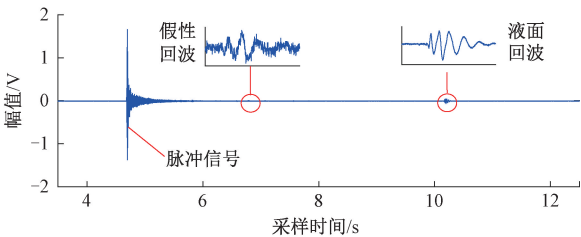


图2 回波法测量信号

Fig. 2 Signal of the echo method

在回波法测量的基础上,分别采用传统声共振法和本文所提新方法进行动液面测量实验。图3为宽频带噪声和有限带宽低频噪声(10~100 Hz)激振下的测量信号,其中有限带宽低频噪声由白噪声经过带通滤波处理后生成,采样频率为 $f_s = 5\ 120\ \text{Hz}$,采样时间为120 s。

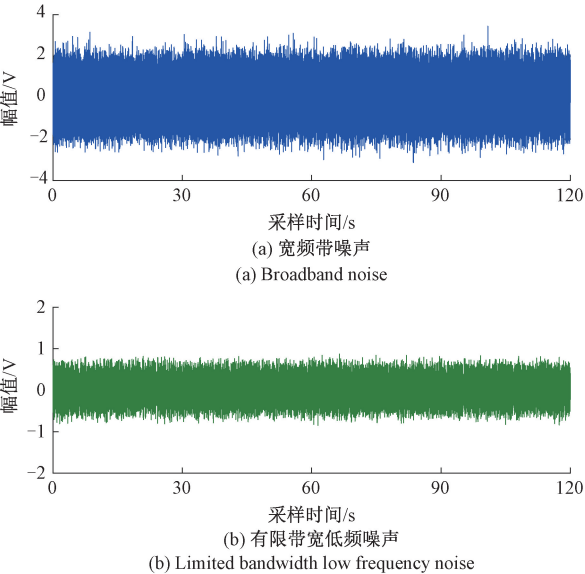
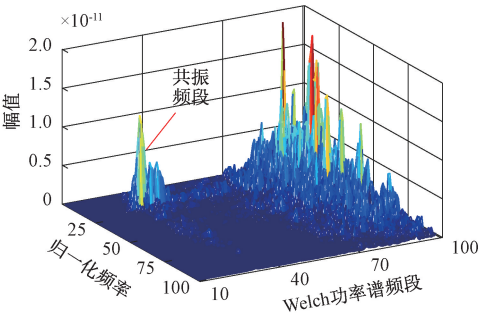


图3 声共振法测量信号

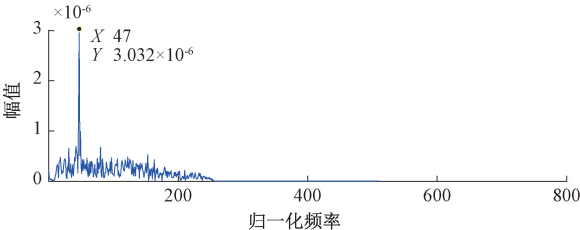
Fig. 3 Signals of the acoustic resonance-based method

传统声共振法采用 Welch 功率谱估计及高通滤波对测量信号进行降噪处理,然后结合 STFT 确定共振频段,提取共振信号。其中,Welch 功率谱估计的分段样本数为 $M = 30 f_s$,并对每段样本数据后补零以保证 FFT 点数为 $M_w = 120 f_s$ 。图4(a)为功率谱经过高通滤波后的 STFT 结果,其中窗口长度为 448,窗中心每次移动 64 点,红色箭头指向即为管内空气柱共振频段。结果显示,经传统算法处理后的功率谱中仍然存在较强噪声干扰,不利于共振信号分布频段的确定。图4(b)为选段功率谱的 FFT 结果,其中选段点数 $M_F = 1\ 024$, $\gamma = 47$,计算得管口至液面距离为 963.56 m。



(a) 共振频带时频分析

(a) Time-frequency analysis of resonant frequency bands



(b) 选段功率谱的FFT

(b) Spectrum of regional power spectrum

图4 传统方法处理结果

Fig. 4 Results of the traditional method

本文所提新方法首先对测量信号进行不同频率分辨力的 Welch 功率谱估计,分段样本数分别为 $M_1 = 30 f_s$, $M_2 = 2 f_s$,对每段样本数据后补零并进行 FFT 点数为 $M_w = 120 f_s$ 的功率谱估计得 $|Y_1(\omega)|^2$ 和 $|Y_2(\omega)|^2$ 。随后采用自适应同态滤波对功率谱降噪。图5(a)为 $|Y_1(\omega)|^2$ 和 $|Y_2(\omega)|^2$ 经自适应滤波后的 STFT 结果,其中窗口长度为 448,窗中心每次移动 64 点。对比图4(a)可知,新算法较大程度抑制了功率谱中的噪声干扰,同时保留了更宽的共振信号可用频段,有利于提高 γ 的估计精度。图5(b)为选段功率谱的 FFT 结果,其中选段点数 $M_F = 1\ 920$, $\gamma = 88$,计算得管口至液面距离为 962.19 m。实验结果表明,新方法相较于传统方法具有更好的降噪效果,易于共振信号的辨识。

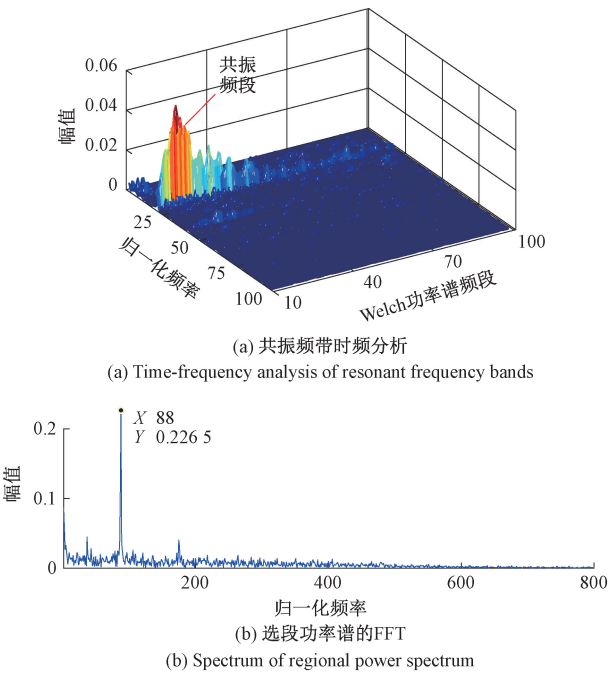


图 5 本文方法处理结果

Fig. 5 Results of the proposed method

为了进一步提升测量结果的稳定性,采用离散频谱校正技术对 γ 进行校正,补偿 FFT 运算引入的误差。图 6 所示为不同选段点数 M_F 下的频谱校正前后测量结果。显然,校正前的测量结果随着 M_F 的增大呈锯齿型波动,最大波动超过 20 m。相比之下,通过 Jain^[21] 算法, JacAmp^[22] 算法, Macleod^[23] 算法和本文提出的双线性插值算法分别对 γ 进行校正后,最终测量结果在 958.50 m 附近小幅波动,稳定性均有一定程度提升。其中,新算法基本不受到选段点数 M_F 的影响。可见,利用离散频谱校正算法能够有效提升液面测量精度,双线性插值算法的稳定性相较于其他传统校正算法具有明显优势。

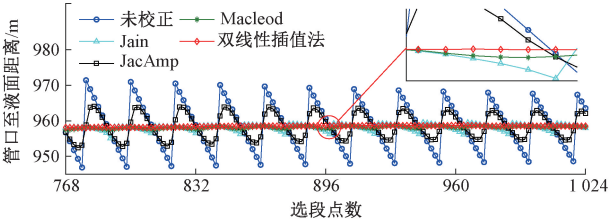


图 6 频谱校正前后测量结果

Fig. 6 Measurement results before and after spectrum correction

2) 实验 2

为了检验新方法在深井测量中的有效性,实验 2 选用长管道进行实验。图 7 所示为长管道下的回波法测量信号,通过自相关分析得到脉冲信号与液面回波信号的时间间隔为 10.16 s,实验管道内平均声速约为 348 m/s

且麦克风位于管口处,计算得回波法测量下管口至液面距离为 $L_2 = 1\,767.84\text{ m}$ 。

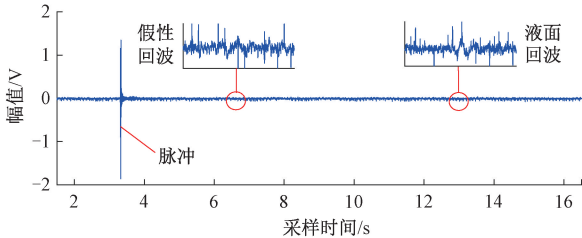
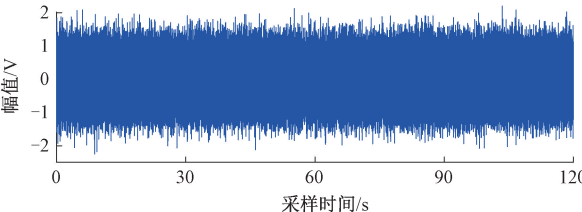


图 7 回波法测量信号

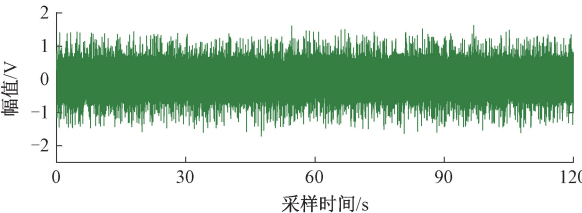
Fig. 7 Signal of the echo method

图 8 为宽频带噪声和有限带宽低频噪声激振下的空气柱共振信号。图 9 为传统方法和新方法的共振频带时频分析结果,参数设置同实验 1。结果显示,图 9(a)中的共振信号极其微弱,无法有效定位共振频段。相比之下,图 9(b)中仍可准确识别共振信号并确定共振频段。可见,当液面深度较大时,传统方法难以有效识别共振信号,而本文所提改进方法依然能快速定位共振频段,且避免了滤波器类型和截止频率等参数的设定,只需选择合适的分段样本数,就能实现对噪声的抑制,较大程度上保留了功率谱中的共振信号,提高了测量范围,有利于深井和无压井下的动液面测量。



(a) 宽频带噪声

(a) Broadband noise



(b) 有限带宽低频噪声

(b) Limited bandwidth low frequency noise

图 8 声共振法测量信号

Fig. 8 Signals of the acoustic resonance-based method

图 10 为不同选段点数 M_F 下的频谱校正前后的测量结果。结果显示,校正前的最大测量值为 1 779.94 m,最小测量值为 1 753.58 m,波动超过 25 m。而经过新算法校正后的测量结果约为 1 766.20 m,与回波法测量结果高度吻合,且波动在 2 m 以内,表明本文所提校正算法在长距离动液面测量中仍具有较强稳定性。

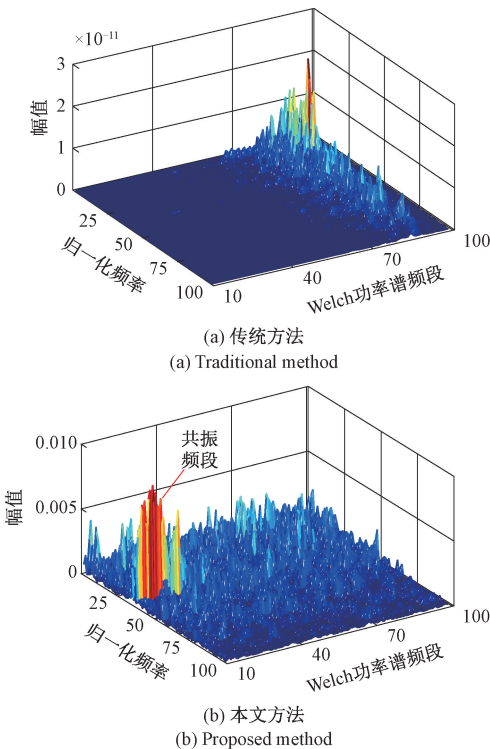


图9 共振频带时频分析结果
Fig. 9 Time-frequency analysis of resonant frequency bands

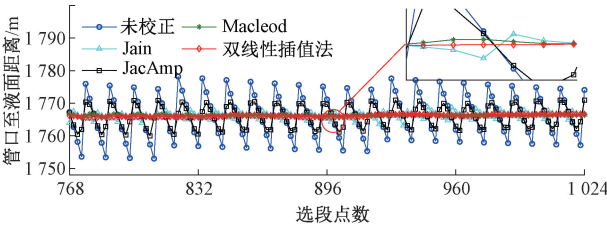


图10 频谱校正前后测量结果
Fig. 10 Measurement results before and after spectrum correction

4.3 管道接箍与障碍物干扰测量实验

为验证管道接箍和障碍物干扰对测量结果的影响,开展了如图11所示的实验,其中实验管道由30根长度约为6 m,直径约为120 mm的聚乙烯给水管通过热熔连接而成,热熔使管道内壁形成凸起以模拟油套管接箍,并且在距离管口约30 m处设置管内障碍物,管道末端沉入水中形成封闭液面。回波法的测量结果如图12所示,信号采样频率 $f_s=5\ 120\ \text{Hz}$,采样时间为10 s,图中可见液面回波、一系列接箍反射波以及由障碍物导致的多个假性回波。根据放置障碍物的位置,经计算可得 T_1 时刻为障碍物反射波, T_2 时刻为障碍物第一次外反射后传播到液面处形成的回波, T_3 时刻为障碍物第二次外反射后传播到液面处形成的回波。对信号做自相关分析可以得到脉

冲信号与液面回波信号的时间间隔为1.032 s,管内平均声速约346.5 m/s,考虑到麦克风位于管内0.5 m处,最终计算得管口至液面距离为 $L_3=179.79\ \text{m}$ 。在实际测量中,随着液面距离的增大,液面回波信号快速衰减,伴随着接箍波等假性回波和大量噪声的干扰,液面回波的精确辨识存在巨大困难。



图11 接箍与障碍物干扰实验
Fig. 11 Relevant experiments with pipe splices and barriers

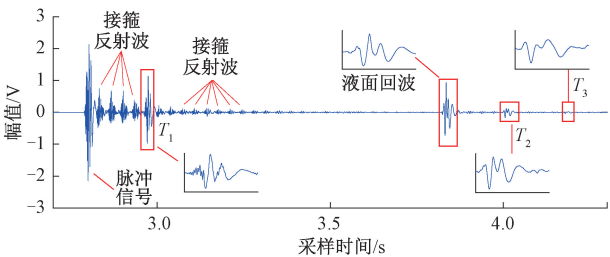


图12 回波法测量信号
Fig. 12 Signal of the echo method

图13显示了基于管柱声场特性的测量结果,其参数设置与实验1一致。图13(a)所示STFT结果中可明显识别共振信号分布频段,通过提取共振带内不同点数的样本并进行 γ 的参数估计,可得图13(b)所示的液面距离值,其中本文所提双线性插值法下的测量结果最为稳定,约为179.38 m。聚乙烯给水管实验表明,改进的动液面测量方法在具有多处接箍的管道中依然有效,且测量结果具有较强稳定性。

4.4 实验结果分析与讨论

上述实验结果表明,声波共振法下的动液面距离测量值只与油套环空气柱的长度相关,且在保证一定测量精度的前提下可避免回波法中由于油管接箍、噪声干扰等因素导致液面回波难以辨识的缺陷。当动液面深度较大时,传统共振测量方法难以有效提取振动特性,而新方法通过自适应同态滤波较大程度抑制了功率谱中的噪声干扰,便于共振频段的快速定位,并通过双线性插值校正

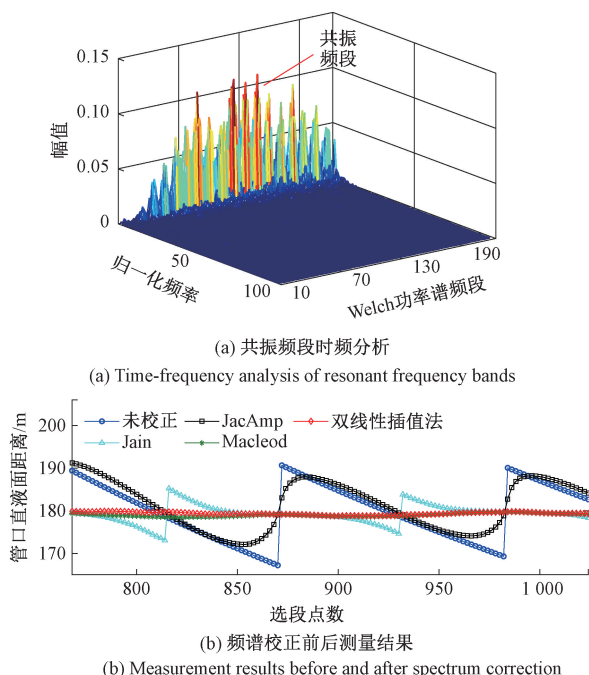


图 13 本文方法处理结果

Fig. 13 Results of the proposed method

算法,提高了测量的稳定性,实现动液面深度的精确可靠测量。

5 结 论

针对传统方法测量范围有限和测量精度不足的问题,本文提出了一种基于管柱声场特性的液面测量新方法。首先在传统声共振法理论基础上,选用有限带宽低频噪声激励方式,提升低频带的共振强度。随后建立了响应信号的数学模型,并基于 Welch 功率谱估计算法设计了自适应同态滤波器,有效抑制信号中的噪声干扰。最后研究了基于双线性插值的离散频谱校正算法,以提高液面深度测量的稳定性。模拟测量实验结果表明论文提出的改进方法相较于传统方法具有更高的测量精度,可实现较长距离的液面测量,能够有效避免管内接箍对测量结果的影响,为液面深度精确稳定测量提供了新的解决方案。

参考文献

- [1] 徐鸿,郭鹏,田振华,等. 非侵入式超声导波液位测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1150-1158.
XU H, GUO P, TIAN ZH H, et al. Research on non-immersive water level measurement method based on ultrasonic guided waves[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1150-1158.
- [2] XU X B, LI G, LI Z H, et al. An acoustic resonance-

based liquid level detector with error compensation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(4): 963-971.

- [3] 崔明涛,田芳,李玉全,等. 差压补偿液位测量的不确定度评定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1524-1531.
CUI M T, TIAN F, LI Y Q, et al. Research on uncertainty evaluation of the compensated differential pressure level measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1524-1531.
- [4] 田海峰,余先川. 基于位置感知和位移复用的示功图传感系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 172-180.
TIAN H F, YU X CH. Design of the indicator diagram sensing system based on position sensing and displacement multiplexing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 172-180.
- [5] ZHOU W, LIU J, GAN L. Measurement of sound velocity in oil wells based on fast adaptive median filtering[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2020, 28(2): 836-849.
- [6] 谭多鸿. 抽油机井合理沉没度的确定[J]. 石油天然气学报, 2007(1): 147-148.
TAN D H. Determination of reasonable sinking depth of pumping wells[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007(1): 147-148.
- [7] 杨江天,雷小强,窦宏恩. 新型油井液位测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 682-686.
YANG J T, LEI X Q, DOU H EN. Novel measurement system for oil wells level [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(4): 682-689.
- [8] 陈殿房,韩祥立,杨晶. 油井液面探测方法探讨[J]. 油气井测试, 2008(2): 60-61,78.
CHEN D F, HAN X L, YANG J. Discuss on survey method for liquid level of oil well[J]. Well Testing, 2008(2): 60-61,78.
- [9] 张洪涛,付威,王春寿,等. 光纤温压法实现油井动液面的实时监测[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(6): 1-6.
ZHANG H T, FU W, WANG CH Q, et al. Real time monitoring of oil well dynamic liquid level with pressure and temperature based on optical fiber sensor [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018, 23(6): 1-6.
- [10] BUDENKOV G A, PRYAKHIN A V, STRIZHAK V A. Device for detecting the liquid level in the annular space[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2003, 39(9): 654-656.

- [11] 张朝晖, 弓志谦, 迟健男, 等. 采油井动态液面测量技术研究 [J]. 传感技术学报, 2007, 20(5): 1180-1183.
ZHANG ZH H, GONG ZH Q, CHI J N, et al. Research on measurement of dynamic level in the oil-well [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(5): 1180-1183.
- [12] ZHOU W, LIU J, GAN L. Dynamic liquid level detection method based on resonant frequency difference for oil wells [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2018, 26(6): 2968-2976.
- [13] 王海文, 林立星, 杜中卫, 等. 基于谱减算法的声波法测油井动液面的信号处理 [J]. 石油天然气学报, 2012, 34(1): 118-122.
WANG H W, LIN L X, DU ZH W, et al. Signal processing in liquid level detection with acoustic method based on spectral subtraction [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(1): 118-122.
- [14] 刘彦萍, 仵杰, 陈延军, 等. 基于端点检测的时频峰值滤波液面提取技术 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 169-175.
LIU Y P, WU J, CHEN Y J, et al. Working fluid level extraction technique using time-frequency peak filtering based on voice activity detection [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2018, 40(2): 169-175.
- [15] ZHANG X, FAN J, WU S, et al. A novel acoustic liquid level determination method for coal seam gas wells based on autocorrelation analysis [J]. Energies, 2017, 10(12): 1-22.
- [16] 何顺昌, 王茂. 基于小波变换的油井油液面深检测 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(4): 378-381.
HE SH CH, WANG M. Oil well depth test based on wavelet algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(4): 378-381.
- [17] DONLAGIC D, ZAVRSNIK M, SIROTIC I. The use of one-dimensional acoustical gas resonator for fluid level measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(5): 1095-1100.
- [18] 周伟, 贾威, 郭小渝, 等. 基于管柱声场模型的油井动液面检测新方法 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(4): 166-172.
ZHOU W, JIA W, GUO X Y, et al. A new method for oil well dynamic fluid level detection based on the column sound field model [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37(4): 166-172.
- [19] LUO J, XIE Z, XIE M. Frequency estimation of the weighted real tones or resolved multiple tones by iterative interpolation DFT algorithm [J]. Digital Signal Processing, 2015, 41: 118-129.
- [20] DUDA K. DFT interpolation algorithm for Kaiser-Bessel and Dolph-Chebyshev windows [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(3): 784-790.
- [21] JAIN V K, COLLINS W L, DAVIS D C. High-accuracy analog measurements via interpolated FFT [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1979, 28(2): 113-122.
- [22] JACOBSEN E, KOOTSOOKOS P. Fast, accurate frequency estimators [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 123-125.
- [23] MACLEOD M D. Fast nearly ML estimation of the parameters of real or complex single tones or resolved multiple tones [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(1): 141-148.

作者简介



罗久飞, 分别于 2009 年和 2012 年在重庆理工大学获得工学学士学位和工学硕士学位, 2015 年于重庆大学获得工学博士学位, 现为重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为信号处理、故障诊断以及智能传感等。
E-mail: luojf@cqupt.edu.cn

Luo Jiufei received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Chongqing University of Technology in 2009 and 2012, respectively, and received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2015. He is currently an associate professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include signal processing, fault diagnosis and intelligent sensor, etc.



杨平安 (通信作者), 2012 年于重庆邮电大学获得工学学士学位, 分别于 2013 年和 2017 年在重庆大学获得工学硕士学位和工学博士学位, 现为重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为信号处理、测控技术、软体机器人等。

E-mail: yangpa@cqupt.edu.cn

Yang Ping'an (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2012, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Chongqing University in 2013 and 2017, respectively. He is currently an associate professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include signal processing, measurement and control technology, software robots, etc.