

# 压裂停泵水击压力波信号滤波方法与特征分析

胡晓东, 周福建\*, 李宇娇, 丘阳, 李卓龙

中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249

\* 通信作者, zhoufj@cup.edu.cn

收稿日期: 2021-01-05

国家自然科学基金青年基金“基于水击压力波信号的多裂缝识别方法研究(No. 51004300)”资助

**摘要** 水击压力诊断是近年来兴起的压裂诊断技术, 具有实时性强、成本低等优点, 潜力巨大。该技术通过对停泵形成的压力波进行频谱分析, 确定裂缝处压力波动传至井口的响应时间, 然后乘以波速求得裂缝位置, 实现裂缝识别。在压裂停泵过程中, 由于管线震动、裂缝开启等各种井底波动事件, 实际采集的水击压力波信号会包含大量的随机噪声、固定频率噪声, 大量噪声的存在会对压裂停泵频谱分析、确定响应时间产生强烈的干扰, 影响分析的准确度。通过合理的滤波方式去掉停泵过程中存在的各种随机噪声、固定频率噪声, 提高信噪比, 是水击压力波诊断技术的关键问题。本文分析了压裂停泵水击压力波信号的特征, 分别研究了在纯净水击信号中添加随机噪声、与模拟信号频率不相近的固定频率噪声以及频率相近的固定频率噪声后信号的特点, 并以滤波信噪比的提高和倒谱效果为指标, 进行了叠加平均法、FIR低通滤波法、自适应滤波法以及自适应噪声对消方法的原理分析及滤波效果的比较。在本文中, 经理论分析和仿真验证, 叠加平均法可以滤除随机噪声, 且随着叠加次数的增大, 叠加后信号的信噪比提高程度会逐渐变缓; 自适应噪声对消方法对于固定频率噪声滤波效果最好, 其信噪比提高最大且倒谱识别效果最好。该研究可以为压裂作业中信号的滤波提供指导。

**关键词** 倒谱分析; 叠加平均滤波; FIR低通滤波; 自适应滤波; 自适应噪声对消

## Filtering methods and characteristic analysis of water hammer pressure—wave signals from fracturing stop pumps

HU Xiaodong, ZHOU Fujian, LI Yujiao, QIU Yang, LI Zhuolong

Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

**Abstract** Water hammer pressure diagnostics is a novel technique for fracture diagnosis developed in recent years. This advanced technique, with advantages of real-time monitoring and low cost, has potential for future applications. By analyzing the spectrogram of the pressure signal generated by pump shut-down in the fracturing process, this technique determines the response time corresponding to the pressure wave propagating from the fracture to the wellhead. Computing the product of the tube wave velocity and reflection time, estimates the depth of the fracture. In the process of the fracturing pump shutdown, because of the fluid compressibility, the water hammer pressure wave signal can be obtained at the wellhead. The pressure wave signal contains a large amount of random noise and fixed frequency noise. This noise is generated by the pipeline vibration, hydraulic fractures opening and other bottom wave events. The existence of a lot of noise affects the accuracy of spectrum analysis, which leads to the challenge of determining the response time. The key problem of water hammer pressure wave diagnosis technology is to

引用格式: 胡晓东, 周福建, 李宇娇, 丘阳, 李卓龙. 压裂停泵水击压力波信号滤波方法与特征分析. 石油科学通报, 2021, 01: 79-91

HU Xiaodong, ZHOU Fujian, LI Yujiao, QIU Yang, LI Zhuolong. Filtering methods and characteristic analysis of water hammer pressure—wave signals from fracturing stop pumps. Petroleum Science Bulletin, 2021, 01: 79-91. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.007

remove all kinds of random noise and fixed frequency noise. It is necessary to improve the signal-to-noise ratio (SNR) through reasonable filtering. In this paper, we analyzed the characteristics of the water hammer pressure wave signal and the effect of filtering. Firstly, noise is added to the purified water pressure wave signal, including random noise, fixed-frequency noise consisting of frequency close to the purified water pressure wave signal and frequency greatly different from the purified water pressure wave signal. The characteristics of the mixed signal after adding various noise is analyzed. After that, the superposition average filtering method, the finite impulse response (FIR) low-pass filtering method, adaptive filtering method and adaptive noise cancellation method are used to filter out the noise. The mechanism of these filtering methods and the effect of these filtering methods on SNR are studied. The SNR gain and the cepstrum effect are selected to evaluate the effectiveness of these filtering methods. In this paper, through theoretical analysis and simulation verification, the superposition average method can filter the random noise. Besides, with an increase of stacking times, the degree of increase in SNR will gradually slow down. The adaptive noise cancellation method is the best method for fixed frequency noise filtering in this study. The adaptive noise cancellation method has the largest SNR gain and the best cepstrum recognition effect. This study can provide some technical guidance for signal filtering in a fracturing operation.

**Keywords** cepstrum analysis; superposition average filtering method; FIR low-pass filtering method; adaptive filtering method; adaptive noise cancellation filtering method

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.007

## 0 前言

非常规油气储层渗透率低,地层连通性差<sup>[1]</sup>,水力压裂是开发非常规油气资源如页岩气、致密油气等的重要手段。水力压裂通过地面泵压,将携带有支撑剂的流体泵入地层中,地层在高压作用下产生裂缝,泵入的支撑剂可以用于支撑裂缝以提供油气运移的通道。水力压裂通过改善井下油气流动通道从而提高油气采收率。压裂裂缝位置分析评估是水力压裂诊断的重大需求。由于水力压裂施工是在井下千米内进行,井底地质条件复杂,在压裂施工后裂缝在何处起裂、设计的多条裂缝是不是均能起裂。这些问题都不够清楚将导致压裂优化与评价缺乏决策依据,导致压裂改造效果欠佳,如不均匀进液,不均匀进支撑剂等。压裂裂缝位置诊断用于分析压裂井底裂缝位置,确定进液位置,从而评估裂缝在何处起裂、设计的多条裂缝是不是均能起裂,为压裂设计和优化提供依据。

基于水击压力波信号的压裂诊断技术是2016年开始兴起的一种压裂诊断技术,具有成本低、操作简便、实时性强的优点<sup>[2-7]</sup>。该技术通过在井口安装高频压力信号采集装置(频率 $\geq 200$  Hz),采集停泵时水击压力信号,捕捉停泵时水击压力波信号的波动特征,通过分析水击信号频谱特性判断裂缝/井底事件位置。水击压力波信号的压裂诊断技术实施流程如下:首先,当停泵时,当井口压力迅速降为0的时候,井筒内流体由于压缩震荡形成水击压力波。其次,根据水击压力波速计算模型,计算水击压力波波速。再次,当井筒中存在裂缝/泄漏点时,井筒中的流体会流入裂缝/泄

漏点中,造成裂缝/泄漏点处井筒压力的波动,波动信号会随着水击压力波信号传递回井口,利用水击压力波信号进行频谱分析,可以得到裂缝/泄漏点位置的应力波波动传播到井口的时间,即响应时间。响应时间乘以压力波波速,即可求得裂缝/泄漏点所在位置。

在压裂停泵过程中,由于管线震动、裂缝开启等各种井底波动事件,实际采集的水击压力波信号会包含大量的随机噪声、固定频率噪声,大量噪声的存在会对压裂停泵频谱分析、确定响应时间产生强烈的干扰,影响分析的准确度。如何通过合理的滤波方式去掉停泵过程中存在的各种随机噪声、固定频率噪声,提高信噪比,是水击压力波诊断技术亟需解决的关键问题。

滤波技术指的是将信号中特定波段频率分离,是抑制和防止干扰的一项重要措施<sup>[8]</sup>。当前滤波技术按信号处理方式可以分为模拟滤波和数字滤波。模拟滤波器分为无源和有源两类<sup>[9]</sup>。数字滤波技术分为经典滤波和现代滤波<sup>[10]</sup>,经典滤波运用傅立叶变化将信号和噪声进行分离处理,直接对噪声所在信道进行去除,现代滤波则以信号随机性本质为基础,通过对特性进行统计,从而估计出信号本身。因此现代滤波技术逐渐将经典滤波技术代替<sup>[11]</sup>。当前滤波技术研究主要的方法还是现代滤波,也会将多种滤波技术结合进一步提高效果,主要方法有卡尔曼滤波,自适应滤波,粒子滤波等等。

滤波方法在石油行业中主要是应用于地震勘探、无线随钻测量与油气生产预测中。在石油非常规地震勘探工作中,刘彭<sup>[12]</sup>指出利用优化中值滤波方法能够非常有效地压制强声波、面波及异常能量等干扰。彭

海龙等<sup>[13]</sup>为了更好地保持边缘信息,采用基于多窗口自适应双边滤波方法对地震信号中的复杂断块区域噪声进行压制,具有较强的实用性。郭志伟等<sup>[14]</sup>提出了时空变自适应反Q滤波,该方法对资料的适应性较好,且取得了较好的补偿效果。无线随钻测量系统中,Kou J.K等<sup>[15-16]</sup>将小波变换应用到信号去噪中,应用了小波阈值降噪策略,给出了选取合理分解层数以及最佳小波基的有效方案。梁耀等<sup>[17]</sup>针对泥浆脉冲信号特征,对泥浆脉冲信号采用小波变换去噪。乔宗超等<sup>[18]</sup>在分析泥浆脉冲信号噪声干扰及自适应滤波算法的基础上,提出一种新的滤波算法,用自适应陷波器来降低主通道信号与参考信号的相关性,保护有用信号不被抵消。在生产预测中,谷建伟等<sup>[19]</sup>应用时间序列分析方法,结合卡尔曼滤波器,建立考虑因素动态关系的产量ARIMA—Kalman滤波器时间序列模型,排除了常规产量预测方法中非同步性以及滞后性的影响。刘巍等<sup>[20]</sup>基于注采井的生产动态数据,分别利用卡尔曼滤波算法和非线性扩散滤波器对注采数据进行预处理,减少注采数据对机器学习模型的干扰。在滤波方法方面,现有水击压力波信号研究中,尚未见专门针对滤波方法研究的文献报道。在石油行业中,针对滤波方法的研究主要集中于地震勘探、无线随钻测量与油气生产预测中,前人在石油行业中的滤波研究可为水击压力波信号滤波提供支撑。但是压裂停泵水击压力波信号的滤波与地震勘探、无线随钻测量信号的滤波也有很大不同,压裂停泵水击压力波信号在滤除各种噪声、保留震荡特征的基础上,需要最大程度的保留裂缝的响应时间信息,这也是压裂停泵水击压力波信号滤波的重点与难点。

本文通过对模拟信号的频谱分析,研究了适应于水击压力波信号的滤波方法。首先,基于现场采集水击压力波信号的特征,构造了含有多条裂缝的模拟水击信号,并分别添加随机噪声以及固定频率噪声。其次,采用叠加滤波,FIR低通滤波以及自适应滤波方法,分析研究了含随机噪声、含相近频率固定频率噪声、含非相近频率固定频率噪声情况下的滤波特征和滤波效果。对比了不同情景下利用不同滤波方法滤波后的信噪比增强效果及信号倒谱上的特征。本研究可为水击压力波信号滤波与应用提供支撑。

## 1 方法与模型

在实际压裂过程中,存在随机噪声和固定频率的噪声。随机噪声主要指的是频率和传播方向没有固定

规律的噪声<sup>[21]</sup>,在压裂过程中,随机噪声的存在是不可避免的。固定频率的噪声指的是频率特定不随时间改变的噪声,在压裂过程中会产生固定频率的噪声。因此,为了模拟实际压裂场景,本文首先构造了纯净的模拟压裂停泵水击压力波信号,并进一步在纯净水击信号上分别添加随机噪声信号和固定频率噪声信号,从而构造带噪混合信号来模拟实际压裂停泵过程的水击信号。

### 1.1 信号构造与分析

本文模拟的压裂停泵水击压力波信号构造方法如下:首先构造振幅衰减的正弦信号表征压裂停泵后压力波信号的正常衰减;接着在13.33 s、13.36 s、13.40 s处开始分别加入不同的振幅衰减正弦信号,这样通过在规定时间加入不同的压力扰动来表征地下三条裂缝位置停泵后的压力波波动响应时间;最后信号经过叠加构造和一定幅值处理后,得到可以表征停泵后的水击压力波特征的模拟信号。构造的模拟水击信号整体看是一个衰减信号(图1),粗箭头位置表示当10 s时停泵后,压力开始下降。虚线箭头所指的放大位置表示水击信号经过多个裂缝位置所形成的压力骤降,对应横坐标时间分别在13.33 s、13.36 s、13.40 s,是需要研究的多裂缝波动响应时间信息。该模拟信号的震荡频率主要集中在2 Hz以内,具有较长的拖尾。

选择水击压力波频谱分析用于确定响应时间,进而用于裂缝位置计算。在水击信号频谱响应方面,现有研究以常规倒谱分析为手段,求取压力波经过裂缝到传回井口所需的时间。不同学者利用水击波信号进行倒谱分析,分析了落球、暂堵效果,以及套管泄漏

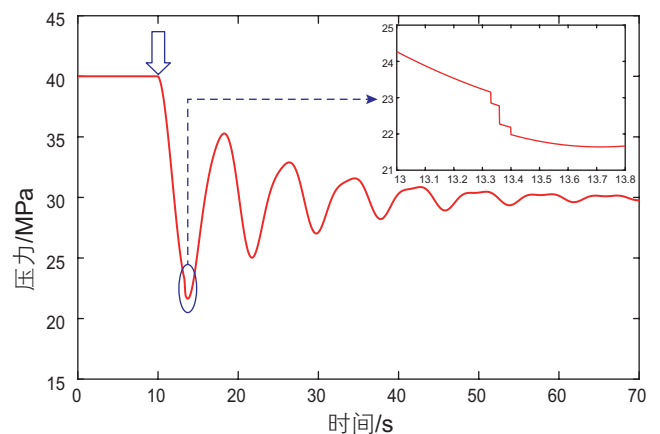


图1 模拟的压裂停泵水击压力波信号

Fig. 1 The water hammer signal of the fracturing-pump-stopping

位置等压裂事件。倒谱分析最早用于混有回声的信号处理<sup>[22-23]</sup>。到目前为止,倒谱分析广泛应用于机械故障诊断、语言信号分析、传播路径或系统识别等方面<sup>[24-25]</sup>。所以通过对压力信号进行倒谱分析,可以用于确定裂缝位置。倒谱分析是适应于水击压力波信号分析的主要手段之一。

倒谱是信号的傅里叶变换谱经过对数运算后再进行傅里叶反变换得到的。倒谱分析是信号处理和信号检测中的经典方法,能把相关的特性提取出来。该方法能够将褶积模型的信号在倒谱域变为加信号,倒谱系数对信号的振幅时间延迟和相位参数的变化很灵敏,能够较好的辨识出信号异常的位置和特征<sup>[26]</sup>。本文充分利用这一特性,通过倒谱域来反映压裂停泵井筒水击信号,可以直观的分析停泵水击信号与压裂过程产生多缝所形成的反射信号,利用倒谱的非线性处理方法找出峰值位。针对本文构造的纯净水击压力波信号,进行倒谱分析,结果如图2所示。倒谱分析求得的响应时间分别为:13.33 s、13.36 s、13.40 s,与上文构造信号时设置的多裂缝波动响应时间一致,表明倒谱分析方法能够很好的识别多裂缝响应时间。

在纯净的模拟信号中添加不同的随机信号,以添

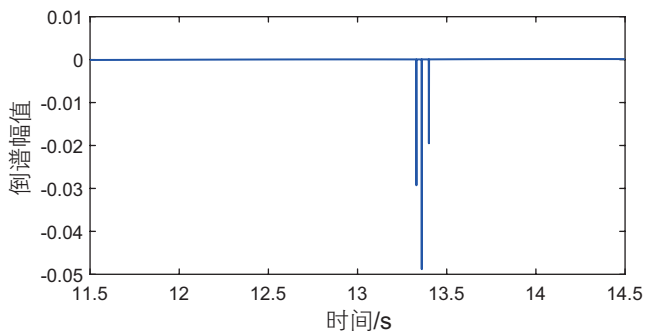


图2 模拟压裂停泵井筒水击信号的倒谱

Fig. 2 The cepstrum of the water hammer signal of the fracturing-pump-stopping

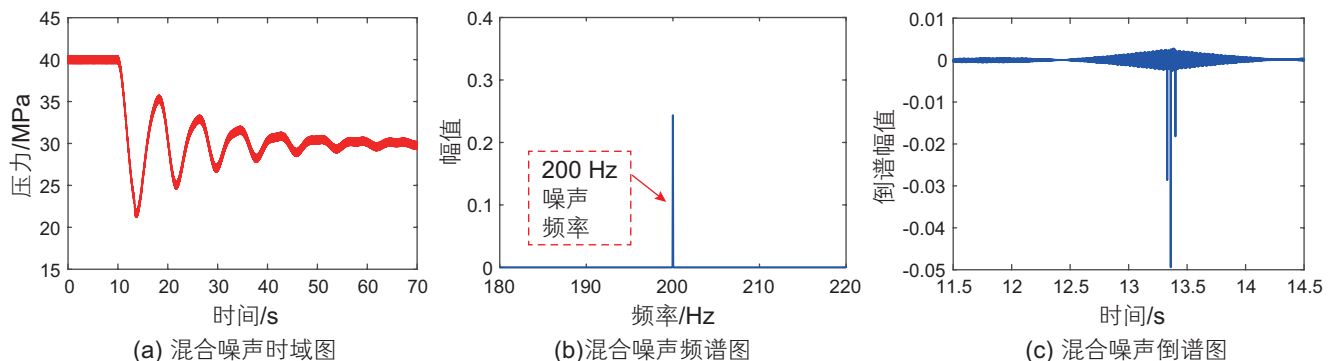


图5 含有非相近固定频率噪声的混合信号

Fig. 5 The mixed signal by adding high-frequency noises to the pure low-frequency signal

加均值为0,方差为 $0.04^2$ 的高斯噪声为例,加入随机噪声后的混合信号(图3)有明显的干扰,对应的倒谱(图4)受噪声影响杂乱无章,无法识别多裂缝波动响应时间的信息。

在纯净的模拟信号中添加不同的固定频率噪声时,考虑到在压裂过程中,可能存在与水击压力信号频率相差较大的噪声信号,也可能存在与水击压力信号频率相近的噪声信号,所以需要分别来讨论。

加入与模拟的有用信号频率不接近的固定频率噪声,本小节选择以200 Hz的正弦信号作为噪声为例来

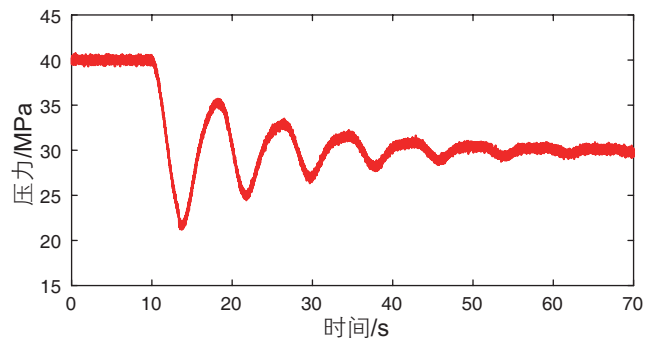


图3 加入随机噪声后的混合信号

Fig. 3 A mixed signal containing random noise

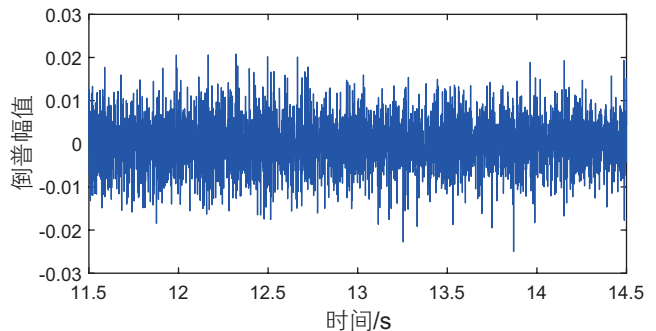


图4 加入随机噪声后信号的倒谱

Fig. 4 The cepstrum of a mixed signal containing random noise

进行研究，加入噪声后的信号图 5(a)有明显干扰，其频谱图 5(b)在 200 Hz 处有明显的频率峰值，其倒谱图 5(c)有一定影响，但峰值处多裂缝波动响应时间还是能观察到。

加入与模拟的有用信号频率相近的固定频率噪声，本小节选择以 0.5 Hz 的正弦信号作为噪声为例来进行研究，加入噪声后的信号图 6(a)对整体信号波形有明显干扰，其频谱图 6(b)在 0.5 Hz 处有对应的频率峰值，其倒谱图 6(c)对峰值处的多裂缝波动响应时间的信息影响不大。

### 1.2 滤波方法与模型

本文主要涉及到对叠加平均滤波、FIR 低通滤波、自适应滤波及自适应噪声抵消方法的研究，其主要原理如下。

#### (1) 叠加平均滤波法

本文添加的随机噪声主要是高斯噪声，而叠加平均法对高斯噪声的滤除效果比较明显<sup>[27]</sup>。噪声和有用的信号频谱情况分为 2 种：一是当二者的频谱不重叠时，用数字滤波器就可以轻松分开它们的频谱；二是当二者的频谱有重叠时，在一定的条件下，可以采用叠加平均滤波法滤除噪声，从而提高信噪比。要使用叠加平均法，需要具备的条件是：噪声应该有随机的特性，有用信号则应该具有重复的特性，并且噪声和信号是互不相关的。叠加平均法的原理是将  $N$  个周期的带随机噪声的信号进行对齐，然后再进行相加之后取均值。在叠加的过程中，随机噪声会相互抵消，而有用的信号通过叠加平均后，其幅度基本保持不变。

叠加平均法提高信噪比的统计学原理：如果一个输入信号由有用信号和随机噪声组成，即：

$$F(t) = X(t) + N(t) \quad (1)$$

其中， $F(t)$  表示输入信号， $X(t)$  表示有用信号， $N(t)$  表

示噪声信号。

假设有用信号在每次采样中都能够重复发生。第  $i$  次采样可以记作：

$$F_i(t) = X_i(t) + N_i(t) \quad (i=1,2,3,\dots,N) \quad (2)$$

其中， $F_i(t)$  表示第  $i$  次采样的输入信号， $X_i(t)$  表示第  $i$  次采样的有用信号， $N_i(t)$  表示第  $i$  次采样的噪声信号。

进行  $N$  次采样后，叠加平均后可以得到：

$$\hat{F}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N N_i(t) \quad (3)$$

如果把噪声的方差  $E[N^2(t)]$  用  $\rho^2$  表示，则平均的方差为：

$$\begin{aligned} (SE)^2 &= E \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{F}_i(t) - X_i(t))^2 \right] \\ &= E \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N N_i^2(t) \right] \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N E[N_i^2(t)] \\ &= \frac{\rho^2}{N} \end{aligned} \quad (4)$$

即， $SE = \frac{\rho}{\sqrt{N}}$ 。其中， $\rho$  表示噪声的标准差。

综上所述可知，噪声的均方根值在经过  $N$  次重复后减小了  $\sqrt{N}$  倍，因为信号在经过叠加平均后幅度基本保持不变，所以信噪比改善了  $\sqrt{N}$  倍。

#### (2) FIR 低通滤波

低通滤波是一种噪声常用的滤波方式，通过设置截止频率，使低频的信号能通过而超过设定临界值的高频信号则被阻隔无法通过。FIR 低通滤波器的频率响应包括了 3 个部分的频带：通带、阻带和过渡带，滤波器的频率响应在通带内逼近于 1，而在阻带内则逼近于 0。频率响应在过渡带内应该平滑地从通带下降到阻带，这样才能更好的逼近于理想滤波器<sup>[28]</sup>。

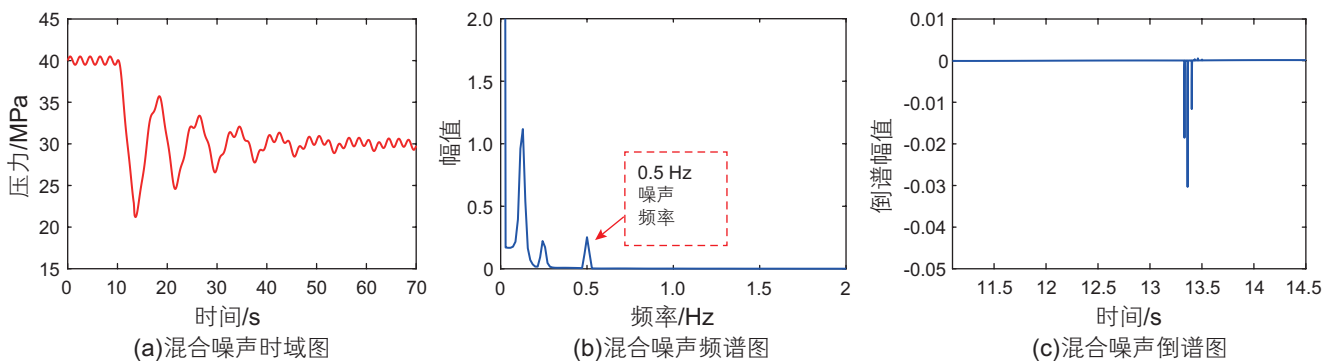


图 6 含有相近固定频率噪声的混合信号

Fig. 6 The mixed signal by adding low-frequency similar noises to the pure low-frequency signal

FIR 滤波器具有很好的线性相位特性，因此在数字信号处理领域得到了广泛的应用<sup>[29]</sup>。假设 FIR 低通滤波器的输入信号为  $x(n)$  与  $h(n)$  的卷积，其中，单位抽样的响应  $h(n)$  是  $M+1$  点有限长序列，因此输出为：

$$y(n) = \sum_{k=0}^M x(k)h(n-k) = x(n)h \quad (5)$$

其中， $y(n)$  为经过滤波器的输出； $x(n)$  为输入信号； $h(n)$  为单位抽样的响应。

该滤波器的递函数  $H(z)$  可以表示为：

$$H(z) = \sum_{n=0}^M h(n)z^{-n} = h(0) + h(n)z^{-1} + \dots + h(M)z^{-M} \quad (6)$$

(3) 自适应滤波

自适应滤波被认为是近年来最好的滤波方法之一，该方法有更好的滤波效果，也有更好的适应性，能自动适应输入信号的变化，在微电子、自动控制、信号处理等方面有广泛的应用<sup>[30]</sup>。自适应滤波器属于现代滤波器的范畴<sup>[31]</sup>，自适应滤波器原理(图 7)，有输入信号端和参考信号端，其中的  $x(n)$  是输入信号， $d(n)$  即为输入的期望信号或参考信号， $y(n)$  是输出信号， $e(n) = d(n) - y(n)$  为误差信号。根据自适应算法和误差信号  $e(n)$  可以调整滤波器系数，即权值。

在自适应滤波器算法研究中，最小均方误差算法(LMS)是比较常用的一种算法<sup>[33-34]</sup>，LMS 算法的基本

原理：沿着权值梯度估值的负方向进行搜索直到权值得到最优，即是基于最速下降法进行的，使误差的均方值  $E[e^2(n)]$  达到最小。一般情况下，LMS 算法的基本步骤<sup>[35]</sup>为：

(1) 滤波输出

$$y(n) = W^T(n)X(n) \quad (7)$$

(2) 误差信号

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - W^T(n)X(n) \quad (8)$$

(3) 权系数更新：

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x(n) \quad (9)$$

直到得到足够小的  $e(n)$  值为止。其中  $\mu$  为自适应步长，用来控制稳定性与收敛率，对步长因子的研究是十分关键的。为了确保系数收敛，最陡下降法的收敛因子满足  $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$ ， $\lambda_{\max}$  为矩阵  $R$  的最大特征值。

(4) 自适应噪声对消原理

自适应滤波器有 4 种基本应用类型：系统辨识、逆模型、预测、干扰消除，其应用范围非常的广泛。自适应噪声对消结构(图 8)：自适应噪声对消系统是自适应滤波器的一种特殊应用，也有原始输入端和参考输入端，原始输入端为： $d_j = s_j + n_0$ ，其中， $n_0$  是与  $s$  不相关的要进行抵消的噪声；参考输入端： $x_j = n_1$ ，其中， $n_1$  是与  $n_0$  相关、与  $s$  不相关的噪声，系统的输出为： $z_j = d_j - y_j$ 。

滤波器的传输函数可以根据系统的输出信号自动调整。这里，如果  $s$ 、 $n_0$ 、 $n_1$  是零均值的平稳随机信号，则系统输出可表示为：

$$z_j = d_j - y_j = s_j + n_0 - y_j \quad (10)$$

输出信号的均方值：

$$\begin{aligned} E[z_j^2] &= E[(d_j - y_j)^2] = E[(s_j + n_0 - y_j)^2] \\ &= E[s_j^2] = E[(n_0 - y_j)^2] + 2E[s_j(n_0 - y_j)] \end{aligned} \quad (11)$$

由于  $s$  与  $n_0$ 、 $n_1$  不相关，因此  $s$  与  $y_j$  也不相关，因此可

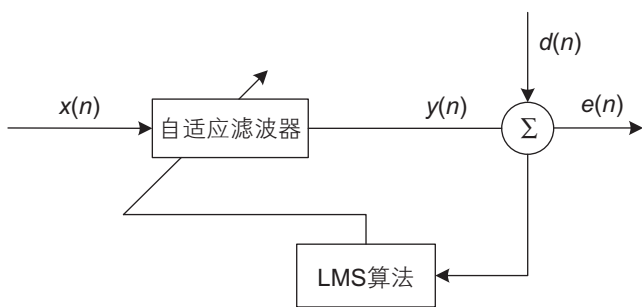


图 7 自适应滤波原理<sup>[32]</sup>

Fig. 7 The schematic diagram of adaptive filtering method<sup>[32]</sup>

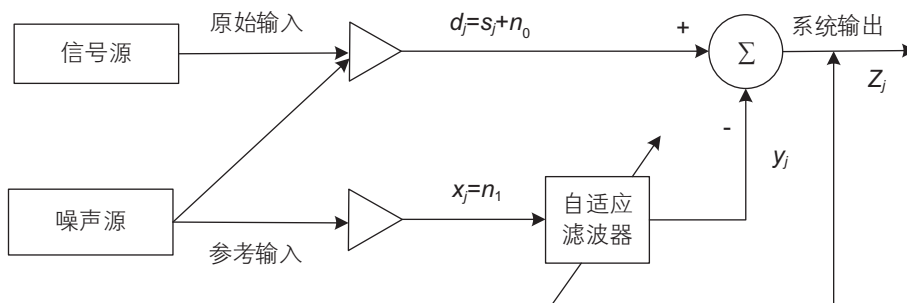


图 8 自适应噪声对消原理图<sup>[36]</sup>

Fig. 8 The schematic diagram of the adaptive noise cancellation filtering method<sup>[36]</sup>

以推出：

$$E[z_j^2] = E[s_j^2] + E[(n_0 - y_j)^2] \quad (12)$$

其中  $E[s_j^2]$  表示信号的功率。从表达式可知：要使输出信号的均方值最小，也就是要求输出信号只包含有用信号，这种情况也就是要使  $E[(n_0 - y_j)^2]$  取得最小值，由式(10)可以推出也就是要求  $E[(z_j - s_j)^2]$  取得最小值，即要求输出信号与有用信号的误差的均方值为最小，这时系统的误差输出  $z$  就是有用信号  $s$  的最佳逼近。

## 2 分析与讨论

### 2.1 随机噪声滤波分析

本小节主要探究加入随机噪声的滤波方法与特征。随机噪声选择用叠加平均法进行滤除，并分析不同信噪比的信号和叠加次数对滤波效果的影响。

首先以加入随机噪声为均值为 0，方差为  $0.04^2$  的高斯噪声为例，构造 20 组带随机噪声的信号，进行 20 次的叠加后信号整体有一定程度的改善(图 9)，虚线箭头所指的压力骤降信息较为完整。其倒谱(图 10)仍存在一定程度的干扰，幅值为 0 处存在大量毛刺，但峰值处的多裂缝波动响应时间信息基本可以识别。

加入均值为 0，方差为  $0.04^2$  的高斯噪声后的信号的信噪比为 40 dB。为了探究随机噪声在该信噪比下叠加次数对滤波效果的影响，进行了多次不同的叠加试验。叠加次数从 5 次开始，依次增加 5 次进行信噪比分析，一直到叠加次数为 45 次，得到了信噪比效果曲线(图 11)，可以看出随着叠加次数的增大，叠加

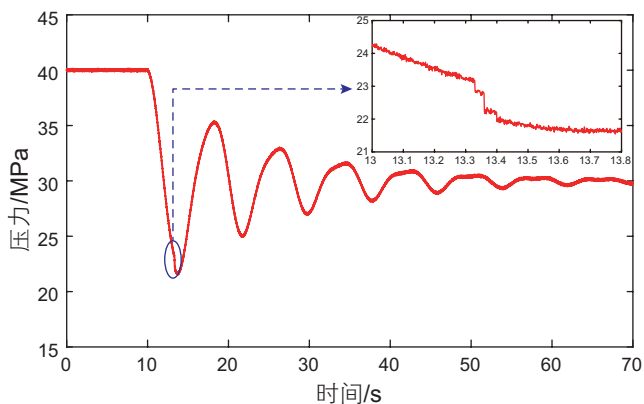


图 9 叠加平均滤波后信号

Fig. 9 The signal filtered by superposition average filtering method

后信号的信噪比提高。叠加次数开始较少时，信噪比增加幅度会比较大，并且随着叠加次数的增加，信噪比的提高程度会逐渐变缓。叠加 45 次后的信噪比为 57.7 dB, 叠加平均法滤波信噪比增益为 17.7 dB。

继续添加不同信噪比的随机噪声来试验，这里的分别添加为均值为 0，方差为  $0.1^2$  的随机噪声和均值为 0，方差为  $0.2^2$  的随机噪声，加入随机噪声后的信号的信噪比分别为 32 dB 和 26 dB。同上述 40 dB 信号处理方式一样，对两个信噪比信号进行了不同的叠加次数试验，得到了叠加次数对叠加后信噪比的影响效果曲线(图 12，图 13)。可以看出曲线的整体增长趋势同 40 dB 基本一致，即随着叠加次数的增大，叠加后信号的信噪比提高且提高程度会逐渐变缓。信噪比为 32 dB 的信号叠加 45 次后的信噪比为 48.9 dB, 叠加平均法滤波前后信噪比增益为 16.9 dB。信噪比为 26 dB 的信号叠加 45 次后的信噪比为 43 dB, 叠加平均法滤波

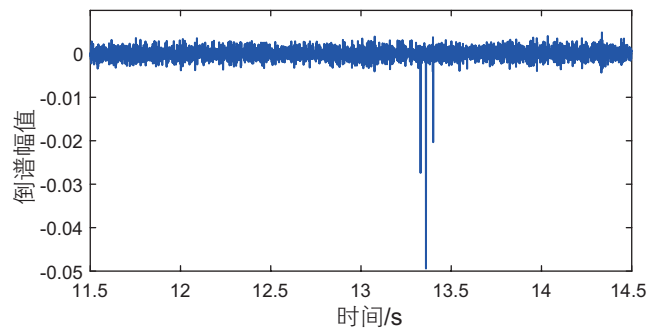


图 10 叠加平均滤波后信号的倒谱

Fig. 10 The cepstrum of the signal filtered by superposition average filtering method

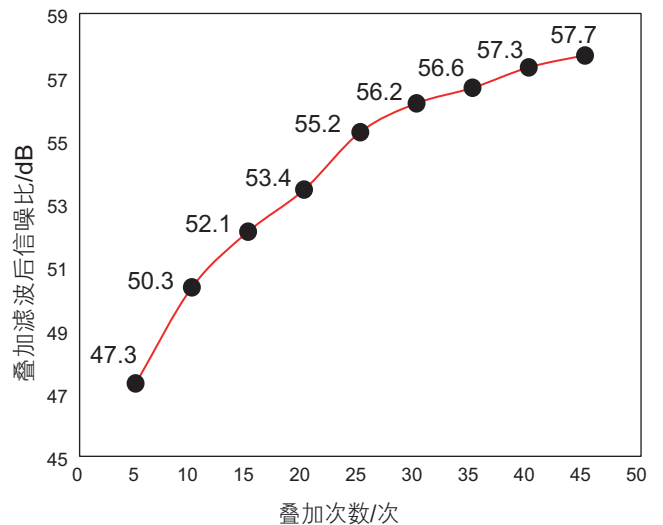


图 11 信噪比 40 dB 的信号叠加次数的影响

Fig. 11 The effect of signal stack times at 40 dB SNR

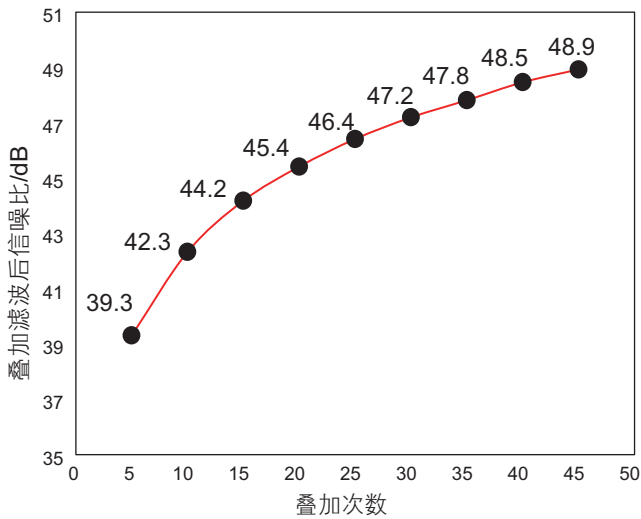


图 12 信噪比 32 dB 的信号叠加次数的影响

Fig. 12 The effect of signal stack times at 32 dB SNR

前后信噪比增益为 17 dB。

叠加平均法可以提高带有随机噪声信号的信噪比。并且随着叠加次数的增大，叠加后信号的信噪比提高；随着叠加次数的增加，信噪比的提高程度会逐渐变缓。出现这种现象的原因：用叠加平均法滤除随机噪声其原理是压制了噪声，而加强有效信号能量，其利用的是噪声信号的相关性比较差，而一般信息信号的相关性很好，所以多个周期叠加，可以增强信噪比。由于随机噪声的每一时刻数据的随机特性，当叠加次数增加逐渐时，对于随机噪声的压制作用减少，所以信噪比提高程度变缓。所以叠加平均滤波法在实际压裂水击信号滤除随机噪声的运用中，当信号叠加到清晰可辨，符合计算机分析或人工测量要求后便可停止叠加。

## 2.2 非相近固定频率噪声滤波分析

本小节主要探究加入非相近固定频率噪声的滤波方法与特征。停泵水击压力波信号中的有用信号一般为低频信号，非相近固定频率噪声可以是指在频谱上可以明确与有用频率范围区分的较高频率信号，比如可以选择将 5 Hz(赫兹)以上定为非相近固定频率噪声，不过设置的方式不限于上述举例。首先以加入 200 Hz 的正弦信号作为噪声来进行滤波研究。加入噪声后的信噪比为 21 dB，分别用 FIR 低通滤波法、自适应滤波法、自适应噪声对消方法进行噪声信号的滤除。

FIR 低通滤波后的信号(图 14)滤除了大部分噪声信号，但由于该方法自身的滤波缺陷，虚线箭头所指的水击信号经过多个裂缝位置所形成的压力骤降有部分失真。对应其倒谱(图 15)在峰值处也产生大量毛

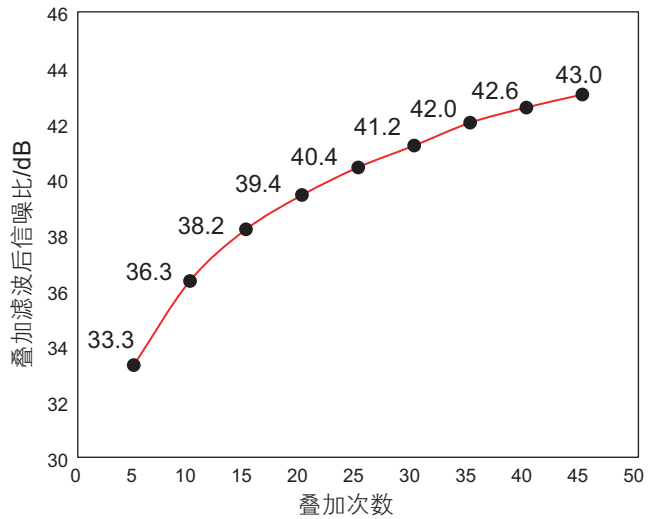


图 13 信噪比 26 dB 的信号叠加次数的影响

Fig. 13 The effect of signal stack times at 26 dB SNR

刺，但基本可以分辨出峰值的多裂缝波动响应时间信息。FIR 低通滤波后信噪比 36 dB，滤波前后信噪比增益为 15 dB。自适应滤波后信号(图 16)较好滤除了大

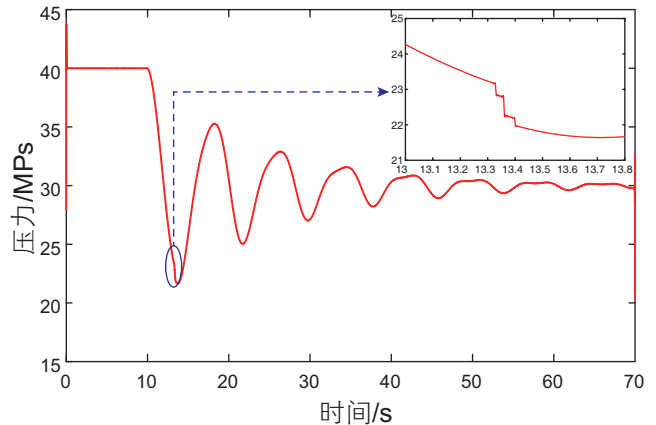


图 14 FIR 低通滤波后的信号

Fig. 14 The signal filtered by FIR low pass filtering method

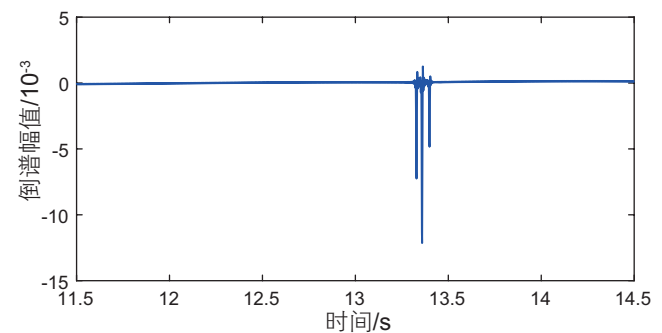


图 15 FIR 低通滤波后信号的倒谱

Fig. 15 The cepstrum of the signal filtered by FIR low pass filtering method



部分噪声信号，虚线箭头所指的压力骤降信息基本完整表示。其倒谱(图 17)峰值处多裂缝波动响应时间信息影响不大。自适应滤波后信噪比 63 dB，滤波前后信噪比增益为 42 dB。自适应噪声抵消方法(图 18)很好滤除了大部分噪声信号，虚线箭头所指的压力骤降信息完整无失真，其倒谱(图 19)峰值处多裂缝波动响应时间信息几乎没有影响。自适应噪声抵消后信噪比

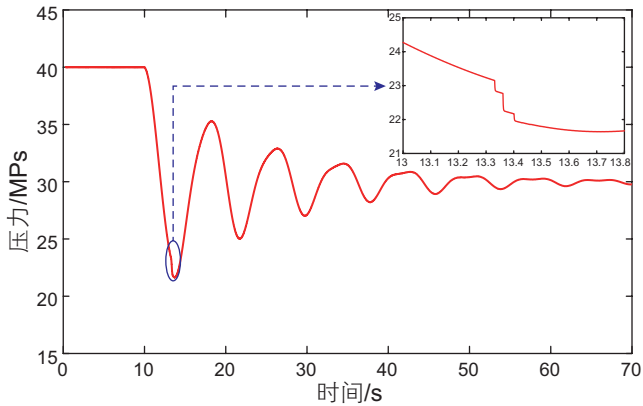


图 16 自适应滤波后的信号

Fig. 16 The signal filtered by adaptive filtering method

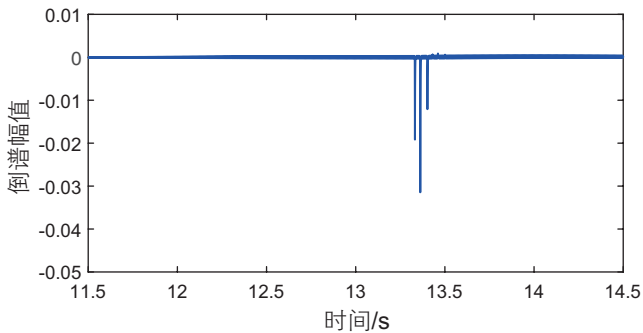


图 17 自适应滤波后信号的倒谱

Fig. 17 The cepstrum of the signal filtered by adaptive filtering method

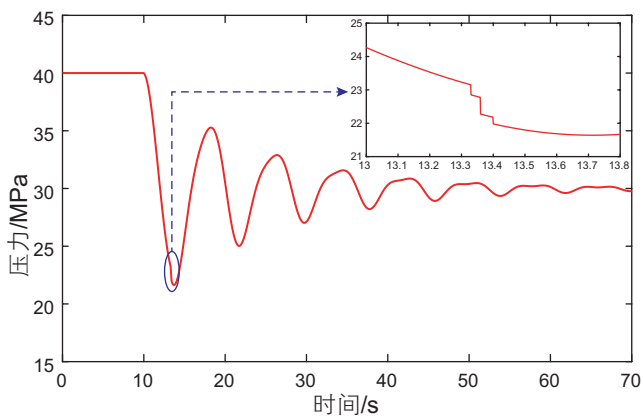


图 18 自适应噪声抵消后的信号

Fig. 18 The signal filtered by adaptive noise cancellation filtering method

88 dB，滤波前后信噪比增益为 67 dB。

继续添加与原始模拟信号频率相差较大的固定频率噪声来试验，本文分别添加 150 Hz 的噪声和 100 Hz 的噪声，加入噪声后的信号的信噪比均为 21 dB。依然分别采用 FIR 低通滤波法、自适应滤波法、自适应噪声抵消进行滤除，可以得到与上述 200 Hz 固定频率噪声相似的滤波效果和倒谱图。三种频率的噪声分别采用三种滤波方法后的信噪比对比如图 20 所示，可以看出：加入 150 Hz 的噪声信号用三种方法滤波后信噪比分别为 34 dB，63 dB，85 dB，滤波前后信噪比增益分别为 13 dB，42 dB，64 dB。而加入 100 Hz 的噪声信号滤波后信噪比为 32 dB，63 dB，82 dB，滤波前后信噪比增益分别为 11 dB，42 dB，61 dB。自适应噪声抵消具有良好的滤波效果。

### 2.3 相近固定频率噪声滤波分析

本小节主要探究加入相近的固定频率噪声的滤波

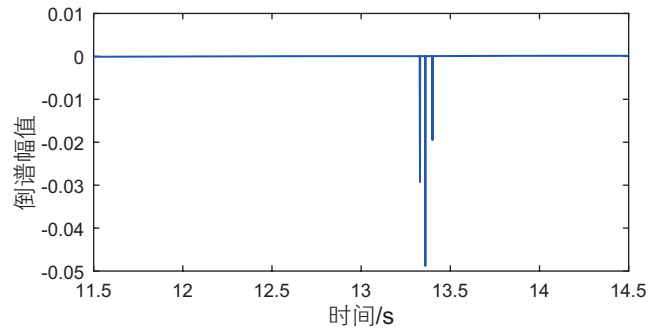


图 19 自适应噪声抵消后信号的倒谱

Fig. 19 The cepstrum of signal filtered by adaptive noise cancellation filtering method

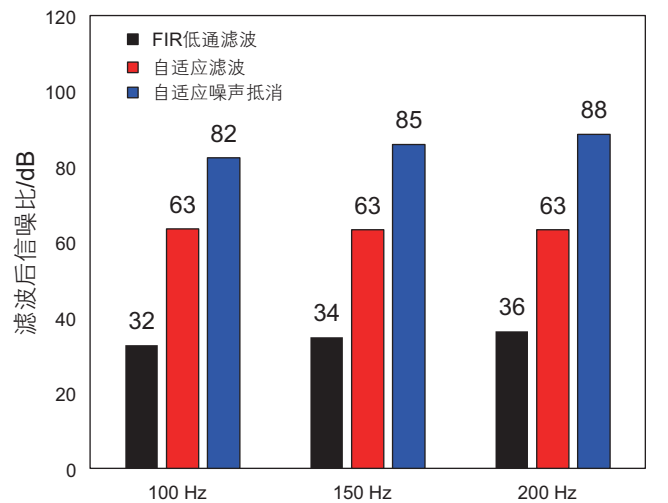


图 20 3 种频率的信号滤波方法对比图

Fig. 20 The comparison diagram of three filtering methods for signals adding high-frequency noises

方法与特征。首先以加入 0.5 Hz 的正弦信号作为噪声来进行滤波研究。加入噪声后的信噪比为 21 dB, 分别用自适应滤波法、自适应噪声抵消方法进行噪声信号的滤除。

自适应滤波后信号(图 21)较好滤除了大部分噪声信号, 虚线箭头所指的压力骤降信息基本完整表示。其倒谱(图 22)存在一些毛刺, 但峰值处多裂缝波动响应时间信息影响不大。自适应滤波后信噪比 63 dB, 滤波前后信噪比增益为 42 dB。自适应噪声抵消方法(图 23)很好滤除了大部分噪声信号, 虚线箭头所指的压力骤降信息基本完整, 其倒谱(图 24)峰值处比较清晰, 多裂缝波动响应时间信息几乎没有影响。自适应噪声抵消后信噪比 84 dB, 滤波前后信噪比增益为 63 dB。

继续添加与原始模拟信号频率相近的固定频率噪声来试验, 这里的分别添加 0.1 Hz 的噪声和 0.2 Hz 的噪声, 加入噪声后的信号的信噪比均为 21 dB。依然分别采用自适应滤波法、自适应噪声抵消进行滤除, 可以

得到与上述 0.5 Hz 固定频率噪声相似的滤波效果和倒谱图。3 种频率的噪声分别采用两种滤波方法后的信噪比对比如图 25 所示。可以看出: 加入 0.1 Hz 的噪声信号的

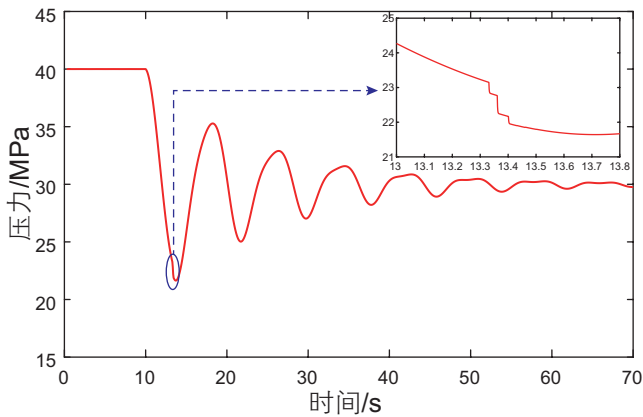


图 21 自适应滤波后的信号  
Fig. 21 The signal filtered by adaptive filtering method

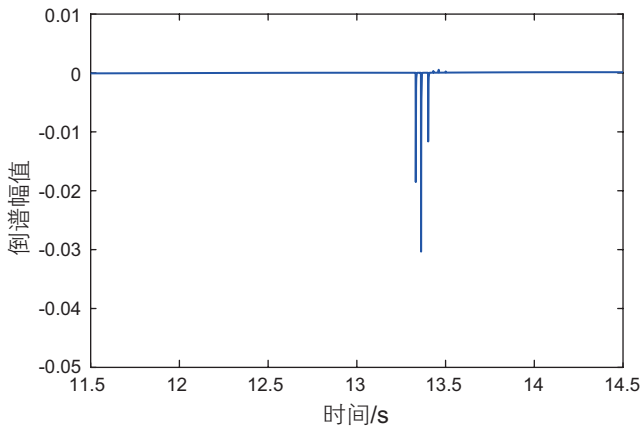


图 22 自适应滤波后信号的倒谱  
Fig. 22 The cepstrum of the signal filtered by adaptive filtering method

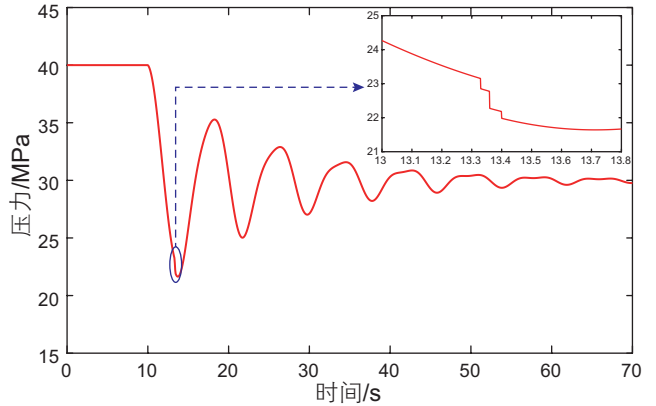


图 23 自适应噪声抵消后信号  
Fig. 23 The signal filtered by adaptive noise cancellation filtering method

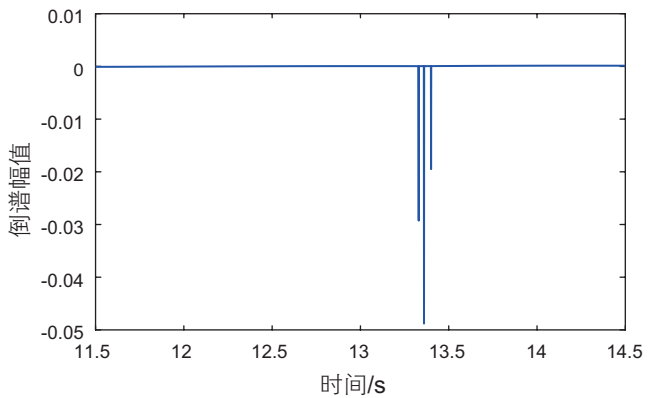


图 24 自适应噪声抵消后信号的倒谱  
Fig. 24 The cepstrum of the signal filtered by adaptive noise cancellation filtering method

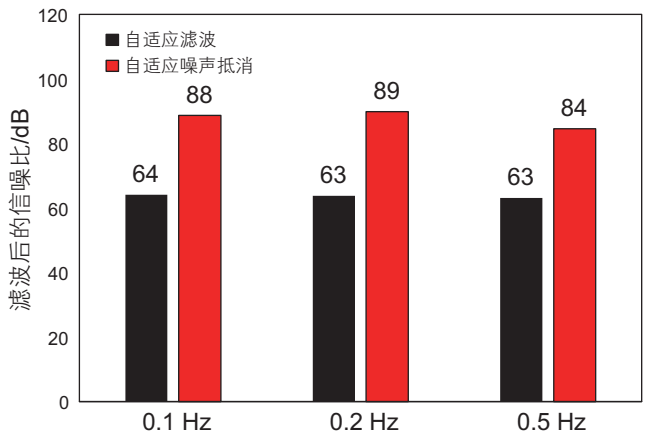


图 25 3 种相近频率的信号滤波方法对比图  
Fig. 25 The comparison diagram of three filtering methods for signals adding low-frequency similar noises

滤波后信噪比为 64 dB, 88 dB, 滤波前后信噪比增益分别为 43 dB, 67 dB; 而加入 0.2 Hz 的噪声信号滤波后信噪比为 63 dB, 89 dB, 滤波前后信噪比增益分别为 42 dB, 68 dB。自适应噪声对消具有良好的效果。

自适应噪声抵消技术是滤除噪声信号干扰的一种有效手段。本文通过试验, 分析了自适应噪声对消方法与其他滤波方法对固定频率噪声滤除效果, 自适应噪声对消具有很好的滤波效果。在实际压裂过程中, 若采用自适应噪声对消技术对压裂中水击压力波信号进行降噪, 可以通过一定的手段实时采集与系统噪声相关的噪声信号, 并输入到自适应滤波器中, 才能通过自适应噪声对消手段有效滤除信号中的噪声, 从而提高信号的信噪比。

### 3 结论

(1) 对于随机噪声, 由于其相关性比较差, 而一般有用信号的相关性很好, 所以利用叠加平均法对随机噪声的滤除可以提高信噪比。并且随着叠加次数的增大, 叠加后信号的信噪比提高且提高程度会逐渐变缓。叠加 45 次后的信噪比增益为 17 dB 左右。叠加平均法滤波后倒谱峰值处多裂缝波动响应时间信息可以较好

的分辨。

(2) 在本文的研究中, 对于与有用信号频率相差较大固定频率的噪声, 利用 FIR 低通滤波法、自适应滤波法、自适应噪声对消方法均可以滤除, 滤波后倒谱峰值处多裂缝波动响应时间信息均可以识别出来。其中 FIR 低通滤波法信噪比增益为 13 dB 左右, 自适应滤波法信噪比增益为 42 dB 左右, 自适应噪声对消方法信噪比增益为 64 dB 左右。本文条件下, 自适应对消方法滤波效果最好。

(3) 在本文的研究中, 对于与有用信号频率相近的固定频率噪声, 利用自适应滤波法和自适应噪声对消方法均可以滤除, 滤波后倒谱峰值处多裂缝波动响应时间信息也同样均可以识别。其中自适应滤波法信噪比增益为 43 dB 左右, 自适应噪声对消方法信噪比增益为 65 dB 左右。本文条件下, 自适应对消方法滤波效果最好。

(4) 本文构造带噪混合仿真信号, 是以单一因素的形式对于多种滤波方法的效果进行评价的, 所构造的信号与实际信号仍有一定差距。在今后的工作中, 需要通过开展室内实验, 研究混合非线性的信号的叠加与滤波; 同时后续还需考虑多种干扰因素作用时信号的处理方法。

### 参考文献

- [1] 姚军, 孙致学, 张凯, 曾青冬, 严侠, 张敏. 非常规油气藏开采中的工程科学问题及其发展趋势[J]. 石油科学通报, 2016, 1(01): 128-142. [YAO J, SUN Z X, ZHANG K, ZENG Q D, YAN X, ZHANG M. Scientific engineering problems and development trends in unconventional oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 01: 128-142.]
- [2] BOGDAN A V, KEILERS A, OUSSOLTSEV D. Real-time interpretation of leak isolation with degradable diverter using High frequency pressure monitoring[C]. In: SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Perth, Australia, 2016.
- [3] KLEM R A, RUTZINGER G, SHULMAN M, PEDAM S, KEILERS A, BOGDAN A, OUSSOLTSEV D. Sequenced Fracturing Technique Improves Production from an Underperforming Lateral: An Interpretation Based on High Frequency Pressure Monitoring[C]. In: SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, United States, 2017.
- [4] RUTZINGER G, WAGES D, SHRIDER J. Sequenced fracturing technique with high-frequency pressure monitoring improves horizontal injection well performance on the North Slope of Alaska[C]. In: SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California, United States, 2017.
- [5] KABANNIK A, PARKHONYUK S, KORKIN R, LITVINETS F, DUNAEVA A, NIKOLAEV M, USOLTSEV D. Can we trust the diversion pressure as a decision-making tool: Novel technique reveals the truth[C]. In: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018.
- [6] PARKHONYUK S, FEDOROV A, KABANNIK A. Measurements while fracturing: nonintrusive method of hydraulic fracturing monitoring[C]. In: SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 2018.
- [7] PARKHONYUK S, KORKIN R, KABANNIK A, FEDOROV A, NIKOLAEV M, LITVINETS F. Novel monitoring technology helps to make Informed decisions and maximize the efficiency of completion strategy[C]. In: Unconventional Resources Technology Conference, Houston, Texas, United States, 2018.
- [8] 陈炜杰. 基于特征函数的滤波方法研究[D]. 杭州电子科技大学, 2019. [CHEN W J. Research on filtering method based on characteristic function [D]. Hangzhou Dianzi University, 2019.]
- [9] 傅思勇, 符茂胜, 刘振. 常用模拟滤波电路研究与仿真[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2016, 18(06): 123-126. [FU S Y,

- FU M S, LIU Z. Research and simulation of commonly used analog filter circuits [J]. Journal of Chongqing University of Science and Techn, 2016, 18(06): 123–126.]
- [10] 李德伟. 数字滤波技术的现状与发展[J]. 电子技术与软件工程, 2017, (19): 85. [LI D W. Status and development of digital filtering technology [J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2017, (19): 85.]
- [11] 张一杨, 秦会斌. 数字滤波技术的现状与发展[J]. 物联网技术, 2017, 7(05): 37–40. [ZHANG Y Y, QIN H B. Current situation and development of digital filtering technology [J]. Internet of Things Technologies, 2017, 7(05): 37–40.]
- [12] 刘彭. 中值滤波在石油物探非常规地震资料处理中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014, (13): 123–124. [LIU P. Application of median filter in unconventional seismic data processing for petroleum geophysical exploration [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2014, (13): 123–124.]
- [13] 彭海龙, 邓勇, 赫建伟, 等. 基于多窗口自适应双边滤波去噪方法研究与应用[J]. 石油物探, 2019, 58(1): 63–70. [PENG H L, DENG Y, HE J W, et al. Post-stack seismic data denoising based on multi-window adaptive bilateral filtering and its application [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(1): 63–70.]
- [14] 郭志伟, 曹思远, 袁殿. 时空变自适应反Q滤波[J]. 石油科学通报, 2019, 4(02): 123–133. [GUO Z W, CAO S Y, YUAN D. Time-space variant adaptive inverse Q filtering [J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 02: 123–133.]
- [15] KOU J K, WEI L X. Improved threshold denoising functions based on wavelet analysis [J]. Science Technology & Engineering, 2011, 27: 050.
- [16] ALFAOURI M, DAQROUQ K. ECG signal denoising by wavelet transform thresholding [J]. American Journal of applied sciences, 2008, 5(3): 276.
- [17] 梁耀, 李安宗, 周静, 等. 一种随钻泥浆脉冲信号的处理方法[J]. 电子设计工程, 2013, 21(7): 72–75. [LIANG Y, LI A Z, ZHOU J, et al. A signal processing method for MWD mud-pulse signals [J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(7): 72–75.]
- [18] 乔宗超, 唐露新, 刘海. 自适应滤波算法消除泥浆脉冲信号中的泵冲噪声[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1477–1484. [QIAO Z C, TANG L X, LIU H. Adaptive filtering algorithm for cancelling the pump noise in the mud pulse signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1477–1484.]
- [19] 谷建伟, 隋顾磊, 李志涛, 等. 基于ARIMA-Kalman滤波器数据挖掘模型的油井产量预测[J]. 深圳大学学报(理工版), 2018, 35(6): 575–581. [GU J W, SUI G L, LI Z T, et al. Oil well production forecasting method based on ARIMA-Kalman filter data mining model [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2015, 35(6): 75–581.]
- [20] 刘巍, 刘威, 谷建伟, 等. 利用卡尔曼滤波和人工神经网络相结合的油藏井间连通性研究[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(2): 118–124. [LIU W, LIU W, GU J W, et al. Research on interwell connectivity of oil reservoirs based on Kalman filter and artificial neural network [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 118–124.]
- [21] 周百花. 地震资料处理中提高信噪比的处理技术[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(24): 247–248. [ZHOU B H. Processing technology for improving signal to noise ratio in seismic data processing [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(24): 247–248.]
- [22] OPPENHEIM A V, SCHAFER R W. From frequency to quefrequency: A history of the cepstrum [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21, 95–106.
- [23] CHILDERS D G, SKINNER D P R, KEMERAIT C. The cepstrum: A guide to processing [J]. Proceedings of the IEEE, 1977, 65, 1428–1443.
- [24] LIANG B, IWNNCKI S D, ZHAO Y. Application of power spectrum, cepstrum, higher order spectrum and neural network analyses for induction motor fault diagnosis, Mechanical Systems and Signal Processing [J]. 2013, 39, 342–360.
- [25] ROBERT B R. A history of cepstrum analysis and its application to mechanical problems [J], Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 97, 3–19.
- [26] 田仁飞, 曹俊兴. 倒谱法检测信号异常的灵敏度分析[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(04): 1298–1303. [TIAN R F, CAO J X. The sensitivity analysis of signal abnormality detection based on cepstrum [J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(04): 1298–1303.]
- [27] 祝安定, 施鹏汉, 肖宗莹. 基于阈值增强的均值滤波[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(07): 283–284. [ZHU A D, SHI P H, XIAO Z Y. Mean filtering based on threshold enhancement [J]. Computer Knowledge and Technology, 2020, 16(07): 283–284.]
- [28] 邵鹏, 吴志健, 彭虎, 等. 改进的粒子群优化算法设计FIR低通数字滤波器[J]. 计算机科学, 2017, 44(z1): 136–138, 156. [SHAO P, WU Z J, PENG H, et al. FIR low-pass digital filter design using improved PSO algorithms [J]. Computer Science, 2017, 44(z1): 136–138, 156.]
- [29] 黄胜券. 基于FPGA的FIR低通滤波器的设计与仿真实验[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(3): 97–98, 123. [HUANG S Q. Design and simulation experiment of FIR low-pass filter based on FPGA [J]. China Water Transport, 2019, 19(3): 97–98, 123.]
- [30] 胡宗福, 赵晓群. 现代信号处理基础及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012. [HU Z F, ZHAO X Q. Foundation and application of modern signal processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.]
- [31] 徐奔奔, 周芝峰, 杨恩星, 霍文明. 步长因子对最小均方误差自适应滤波效果影响的研究[J]. 上海电气技术, 2016, 9(03): 53–

56. [XU B B, ZHOU Z F, YANG E X, HUO W M. Research on the influence of step size factor on the least mean square error adaptive filtering effect [J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2016, 9(03): 53–56.]
- [32] 仝喜峰, 陈卫松, 钱隆彦, 肖梦迪. 一种非线性变步长LMS自适应滤波算法[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(04): 391–396. [TONG X F, CHEN W S, QIAN L Y, XIAO M D. A nonlinear variable step size LMS adaptive filtering algorithm [J]. Radio Communications Technology, 2019, 45(04): 391–396.]
- [33] KIM H W, PARK H S, LEE S K, et al. Modified-filtered-u LMS algorithm for active noise control and its application to a short acoustic Duct[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2011, 25(1): 475–484.
- [34] KIM S, PAEK Y, YOUN D H. A Variable step-size gradient adaptive lattice algorithm for multiple sinusoidal Interference cancelation[J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 2013(1): 106.
- [35] 徐翔, 汪坤, 康晓妮, 等. 改进的提升小波变步长LMS滤波算法及其应用[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(12): 131–136. [XU X, WANG K, KANG X N, et al. The Improved Lifting Wavelet Variable step size LMS filter algorithm and its application [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(12): 131–136.]
- [36] 马令坤, 程林波. 基于MATLAB的自适应噪声抵消器设计[J]. 电子世界, 2016, (6): 44–45. [MA L K, CHENG L B. Adaptive noise canceller design based on MATLAB [J]. Electronics World, 2016, (6): 44–45.]

(责任编辑 李世远 编辑 马桂霞)