



## 基于优化变分模态分解和互相关的钻井液脉冲信号处理方法

亢武臣 杨书博 赵琪琪 黄豪彩 丁士东

### A Pulse Signal Processing Method for Drilling Fluid Based on Optimal Variational Mode Decomposition and Cross-Correlation

KANG Wuchen, YANG Shubo, ZHAO Qiqi, HUANG Haocai, DING Shidong

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023068>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于可信度分析的钻井液脉冲信号识别方法

A New Drilling Fluid Pulse Signal Identification Method Based on Credibility Analysis

石油钻探技术. 2018, 46(3): 120–126 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018047>

#### 有保护时隙的高效PPM钻井液脉冲信号编码

New PPM Coding with Protection Time Slots for Optimizing the Drilling Fluid Pulse Signal for High Energy Efficiency

石油钻探技术. 2018, 46(6): 118–122 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018145>

#### 快速产生钻井液连续波信号的往复阀阀口设计

Design for a Valve Port of a Reciprocating Valve that Rapidly Generates Continuous Wave Signals in Drilling Fluid

石油钻探技术. 2017, 45(1): 62–67 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201701011>

#### 钻井液连续波信号发生器控制方法

Research on the Control Methods of a Drilling Fluid Continuous Wave Signal Generator

石油钻探技术. 2018, 46(5): 121–126 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018117>

#### BH-VDT垂直钻井工具异常脉冲信号分析研究

Cause Analysis on Abnormal Pulse Signals of BH-VDT Vertical Drilling Tool

石油钻探技术. 2018, 46(3): 59–64 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018044>

#### 叶轮式井底盘阀脉冲射流钻井工具性能分析与优化

Performance Analysis and Optimization of a Pulse Jet Drilling Tool with an Impeller-Type Bottom Hole Disc Valve

石油钻探技术. 2017, 45(2): 68–75 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702011>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2023068

引用格式: 亢武臣, 杨书博, 赵琪琪, 等. 基于优化变分模态分解和互相关的钻井液脉冲信号处理方法 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 144-151.

KANG Wuchen, YANG Shubo, ZHAO Qiqi, et al. A pulse signal processing method for drilling fluid based on optimal variational mode decomposition and cross-correlation [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 144-151.

## 基于优化变分模态分解和互相关的 钻井液脉冲信号处理方法

亢武臣<sup>1,2</sup>, 杨书博<sup>2</sup>, 赵琪琪<sup>3</sup>, 黄豪彩<sup>1</sup>, 丁士东<sup>2</sup>

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江舟山 316021; 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 3. 中国石油大学(北京)地球物理学院, 北京 102249)

**摘要:** 随着油气勘探开发不断深入, 钻井技术逐渐向深井、超深井和小井眼方向发展, 对钻井液脉冲信号处理提出了更高的要求。通过分析脉冲位置调制编码的基本原理, 提出了一种基于优化变分模态分解和互相关的钻井液脉冲信号处理方法, 并利用在苏北地区某页岩油井采集的钻井液脉冲信号验证了该方法的可行性。基于优化变分模态分解算法, 实现了在低信噪比条件下有用信号的有效提取; 基于同步头相关器对去噪后的信号进行互相关处理, 实现了数据帧起始位置的可靠计算; 基于数据块相关器对数据块内波形进行互相关处理, 实现了码值的准确获取。与传统的钻井液脉冲信号处理方法相比, 上述方法具有可靠性高和误码率低的特点, 能够很好地满足复杂井眼环境下钻井液脉冲信号处理的需求。

**关键词:** 钻井液脉冲; 优化变分模态分解; 互相关; 信号处理

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)03-0144-08

## A Pulse Signal Processing Method for Drilling Fluid Based on Optimal Variational Mode Decomposition and Cross-Correlation

KANG Wuchen<sup>1,2</sup>, YANG Shubo<sup>2</sup>, ZHAO Qiqi<sup>3</sup>, HUANG Haocai<sup>1</sup>, DING Shidong<sup>2</sup>

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang, 316021, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co. Ltd., Beijing, 102206, China; 3. College of Geophysics, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

**Abstract:** With oil & gas exploration and development going ever deeper, drilling technologies are gradually advancing towards deep and ultra-deep wells and slim holes, which puts forward high requirements for the processing of pulse signals of drilling fluid. By analyzing the principle of pulse position modulation coding, a pulse signal processing method was proposed for drilling fluid based on optimal variational mode decomposition (VMD) and cross-correlation. And the feasibility of the method was later verified by using pulse signals of drilling fluid collected from a shale oil well in the northern Jiangsu region. Through the optimal VMD algorithm, the useful signals were effectively extracted under low signal-to-noise ratio conditions; based on the synchronization correlator, the de-noised signals were cross-correlated to reliably calculate the starting position of the data frame; according to the data block correlator, the waveforms in the data block were cross-correlated to accurately acquire the code values. Compared with the traditional pulse signal processing methods for drilling fluid, the proposed method exhibits characteristics of high reliability and low bit error rate, and it can well satisfy the needs of pulse signal processing for drilling fluid in complex wellbore environments.

**Key words:** drilling fluid pulse; optimal variational mode decomposition; cross-correlation; signal processing

收稿日期: 2022-04-01; 改回日期: 2023-05-08。

作者简介: 亢武臣(1980—), 男, 山东德州人, 2003年毕业于大庆石油学院自动化专业, 2012年获中国石油大学(华东)计算机技术专业工程硕士学位, 高级工程师, 主要从事随钻测控、海洋工程等方面的研究工作。E-mail: kangwc.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“海相深层高温高压钻井井工程基础理论及控制方法”(编号: U19B6003-05)、国家重点研发计划项目“复杂油气智能钻井理论与方法”(编号: 2019YFA0708300)联合资助。

水平井、大位移井和分支井等复杂结构井钻井过程中,井场人员需要实时了解各种井下参数,如井斜角、方位角和工具面等<sup>[1-3]</sup>。钻井液脉冲传输是钻井过程中应用最为广泛的数据传输方式,其基本原理是控制井下脉冲发生器按照一定编码规则工作,不断改变钻杆里钻井液的压力,以压力波脉冲的形式将测量数据传送至地面<sup>[4-8]</sup>。然而,经过编码后的脉冲信号在钻井液中传播时不可避免地会受到井场电压、地面钻井泵、钻井液中气泡以及运动钻具等各种噪声源的干扰,必须经过去噪和识别处理才能得到井下真实的测量数据。针对脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)码钻井液脉冲信号,李艳军<sup>[9]</sup>提出了一种基于低通滤波和方波相关的信号去噪方法,段友祥等人<sup>[10]</sup>提出了一种基于可信度分析的信号识别方法,胡永健等人<sup>[11]</sup>提出了一种基于小波变换和自动阈值调节的信号处理方法,这些方法均取得了一定效果。然而,在深井、超深井和小井眼等复杂井眼环境下,编码脉冲信号的路径损耗和码间干扰明显增强,对钻井液脉冲信号处理提出了更高的要求<sup>[12-15]</sup>。为了满足微弱 PPM 码钻井液脉冲信号处理要求,笔者提出了一种基于优化变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)和互相关的钻井液脉冲信号处理方法,并利用现场资料与传统方法进行对比,验证了该方法在压制杂波、保留编码脉冲特征和抗异常干扰等方面的有效性。

## 1 传统信号处理方法及其不足

PPM 编码是一种常见的钻井液脉冲信号编码方式,其本质是以时间间隔为数据流传输信息<sup>[4,9]</sup>。PPM 码钻井液脉冲信号传统的处理方法主要包括带通滤波、阈值设定和峰值检测等<sup>[2,9,11]</sup>。带通滤波算法可以用来对原始信号进行去噪,阈值设定算法可以用来去除杂波,峰值检测算法可以用来识别去噪后的信号。具体步骤是:1)对原始钻井液脉冲信号进行带通滤波处理,得到去噪后的信号;2)对去噪后的信号进行阈值设定,去除杂波;3)对去除杂波的信号进行峰值检测,得到各有效脉冲的位置;4)根据同步头中各脉冲的位置关系得到数据帧的起始位置;5)划分数据块,数据块中有效脉冲的位置所对应的十六进制数即为该数据块内波形所代表的码值;6)根据各测量参数的位数,将各数据块对应的码值进行组合,最终根据各测量参数的量程,将

组合后的十六进制数转换成井下真实的测量结果。

钻井液脉冲信号是一种非平稳信号,传统的带通滤波、阈值设定等方法的参数设置依赖于人工选择,在复杂井眼环境下存在去噪效果较差和适应性不强等问题。

## 2 改进的信号处理方法

变分模态分解是一种自适应、完全非递归的信号分解估计方法,通过迭代搜寻变分模型最优解来确定每个分量的频率中心和带宽,能够自适应地实现信号的频域剖分及各分量的有效分离。此外,由于钻井液脉冲信号中噪声信号与有效脉冲之间相的关性较弱,应用互相关法可以有效抑制干扰噪声。互相关法不考虑信号的频率,对未知频率的信号也可以进行处理,适合有效脉冲的检测。

基于上述思路,提出了一种基于优化变分模态分解和互相关的钻井液脉冲信号处理方法。该方法主要包括粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)、VMD 算法和互相关算法:PSO 算法用来对 VMD 算法中的惩罚因子  $\alpha$  和分解个数  $K$  进行寻优<sup>[3,16-17]</sup>;VMD 算法用来分解原始信号,去除干扰噪声<sup>[16-18]</sup>;互相关算法用来识别去噪后的信号<sup>[9,19-20]</sup>。具体处理步骤为:

1)初始化 PSO 各项参数,构造适度函数,设置惩罚因子  $\alpha$  和分解个数  $K$  的寻优范围。通常,适度函数可以设置为原始信号和重构信号的均方根误差与原始信号和重构信号的互相关系数之比。评估每个粒子的适度函数值,判断各粒子是否满足种群进化停止条件,若不满足则继续寻优,直到满足最大种群进化预设值<sup>[3,16-17]</sup>。

2)用获得的最优参数对钻井液脉冲原始信号进行 VMD 分解,得到本征模态分量。即:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K u_k(t) \quad (1)$$

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\varphi_k(t)) \quad (2)$$

式中: $x(t)$  为原始信号; $u_k(t)$  为第  $k$  个模态的信号; $A_k(t)$  和  $\varphi_k(t)$  为该模态的瞬时幅度和相位<sup>[16-18]</sup>。

在较小的时间范围内, $u_k(t)$  可以看作谐波信号,能量主要集中在频率  $f_k$  处。VMD 同时计算所有模式波形及其中心频率,该过程可以看作寻找一组使变分约束问题最小化的  $u_k(t)$  和  $f_k$ 。通过引入惩罚因子  $\alpha$  和拉格朗日乘子  $\lambda$ ,可使相应的变分约束问

题转化为非约束变分问题,其增广拉格朗日函数定义为<sup>[16-18]</sup>:

$$L(u_k(t), f_k, \lambda(t)) = a \sum_{k=1}^K \left\| \frac{d}{dt} \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j2\pi f_k t} \right\|_2^2 + \left\| x(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), x(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\rangle \quad (3)$$

式中: \*代表卷积;假定2个函数分别为  $p(t)$  和  $q(t)$ , 则  $\langle p(t), q(t) \rangle$  表示内积,  $\|p(t)\|_2^2$  表示2-范数。

对增广拉格朗日函数进行时频域转换后可以求取对应的极值解,从而得到模态分量和中心频率的表达式<sup>[16-18]</sup>。对于第  $n+1$  次迭代,满足:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{x}_k^{n+1}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (4)$$

$$\text{其中 } \omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (5)$$

式中,包含“^”上标的变量为不包含“^”上标变量的傅里叶变换。

通过不断迭代即可得到  $x(t)$  的  $K$  个模态分量。

3) 根据各本征模态分量的频谱特征,将其依次分为随机噪声、泵冲信号、基线信号和有用信号,将有用信号模态分量叠加可以得到去噪后的信号。

4) 构造同步头相关器,将去噪后的信号与同步头相关器进行互相关处理,相关后波形最大值所对应的位置即为数据帧的起始位置。基于同步头相关器进行起始位置确定时的互相关函数满足:

$$r_{xy}(\tau) = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} x(t)y(t-\tau) \quad (6)$$

式中:  $r_{xy}$  为相关值;  $x(t)$  为待相关信号;  $y(t)$  为同步头相关器。

需要注意的是,相关器中各点的平均值应为零,否则输出将随基线压力而变化。常用的相关器包括矩形相关器、三角形相关器和礼帽相关器等<sup>[9,19-20]</sup>。

5) 分别构造代表十六进制数  $0x0 \sim 0xF$  的数据块相关器,将去噪后的信号与各数据块相关器进行互相关处理,最大相关值所对应的十六进制数即为该数据块内波形所代表的码值。基于数据块相关器进行码值确定时的互相关函数满足:

$$r_{xy}(i) = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} x(t)y_i(t) \quad (7)$$

6) 根据各测量参数的位数,将各数据块对应的码值进行组合。最终根据各测量参数的量程,将组合后的十六进制数转换成井下真实的测量结果。

### 3 传统方法与改进方法的对比分析

苏北地区某小井眼页岩油井现场采集的一段钻井液脉冲原始信号如图1所示。分析可知,由于受各种噪声的干扰,原始信号十分复杂,无法直接从中准确地分辨出编码脉冲,需要对钻井液脉冲原始信号进行去噪和识别处理,才能够得到真实的井下测量数据。分别采用传统和改进的信号处理方法对图1中的钻井液脉冲原始信号进行处理,以对比分析上述2种方法在去噪、同步头识别和码值判别等方面的应用效果。

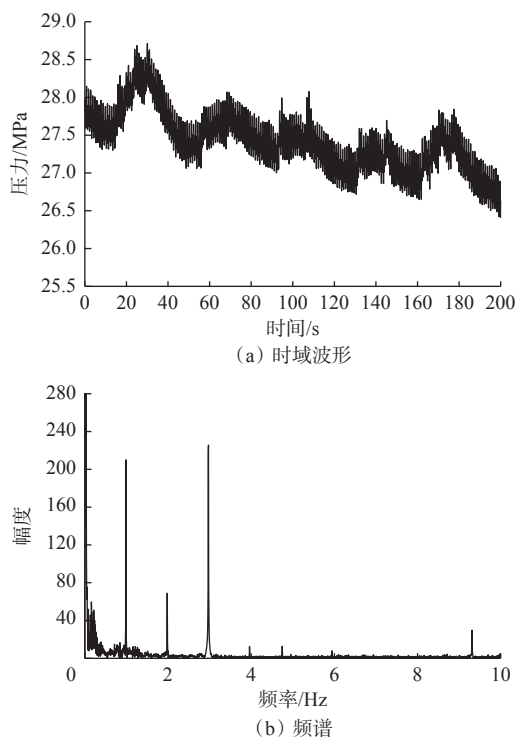


图1 钻井液脉冲原始信号

Fig.1 Original pulse signal of drilling fluid

#### 3.1 去噪效果

去噪是钻井液脉冲信号处理的关键步骤之一,直接决定信号识别的准确性。分别利用带通滤波算法和优化VMD算法处理钻井液脉冲原始信号,结果如图2和图3所示。对于优化VMD算法,为了加快计算速度,设置  $K$  的取值范围为  $[2,10]$ ,  $\alpha$  的取值范围为  $[100,5000]$ ,  $K$  的更新步长为1,  $\alpha$  的更新步长为100。



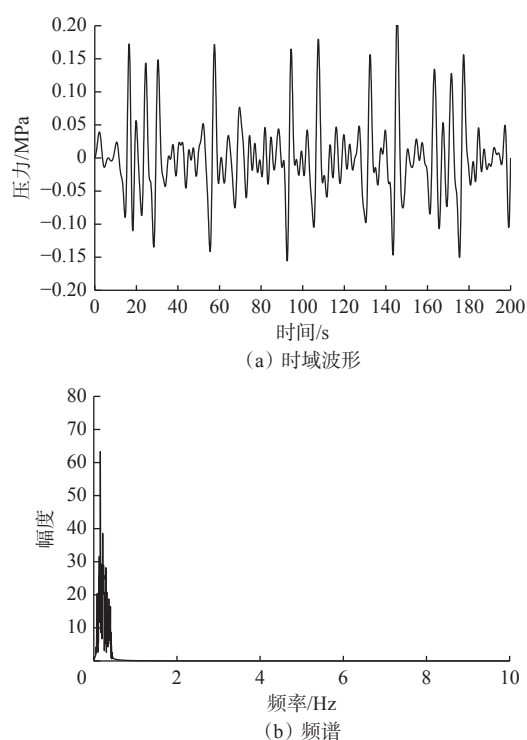
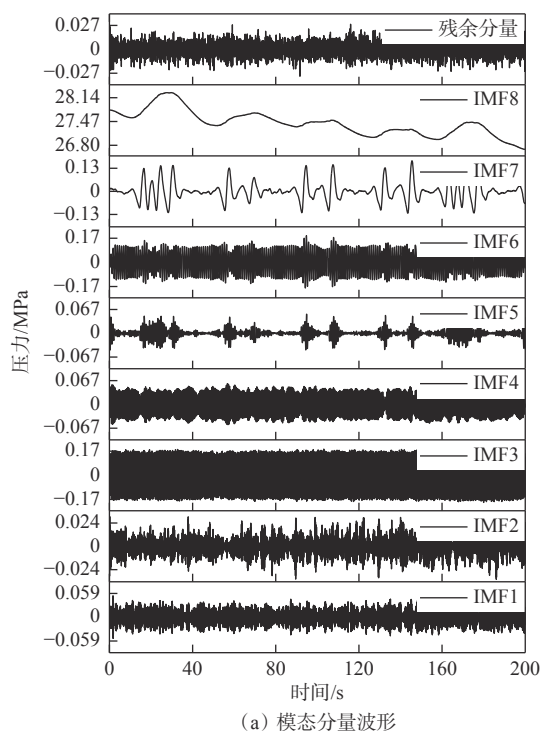
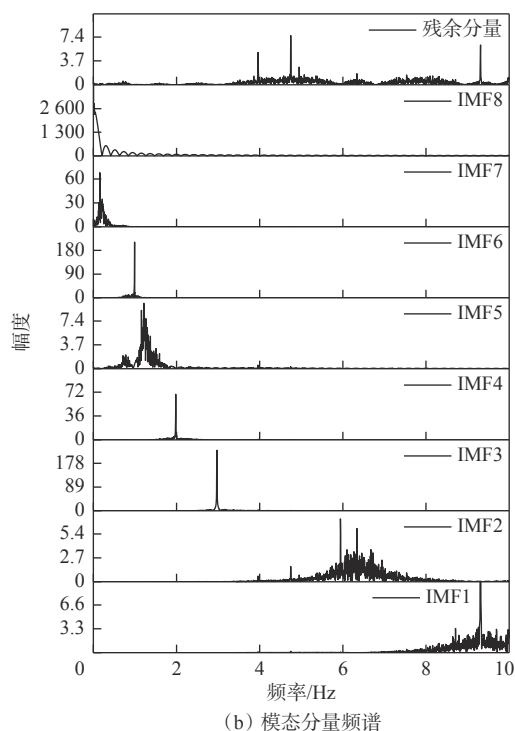


图 2 经过带通滤波处理的钻井液脉冲信号 (带通滤波器的通带频率  $0.1 \sim 0.4$  Hz)

Fig.2 Pulse signal of drilling fluid after bandpass filtering (the passband frequency of the bandpass filter is  $0.1 \sim 0.4$  Hz)



(a) 模态分量波形



(b) 模态分量频谱

图 3 钻井液脉冲原始信号的变分模态分解结果 ( $K=8$ ,  $\alpha=1\ 000$ )

Fig.3 VMD results of original pulse signal of drilling fluid ( $K=8$ ,  $\alpha=1\ 000$ )

由图 2 可知, 经过带通滤波处理后, 钻井液脉冲原始信号中的噪声被明显压制, 编码脉冲的形态得以展现出来。由图 3 可知, 经过优化 VMD 算法处理后, 钻井液脉冲原始信号中各种模态分离较为彻底。由于泵冲信号的频谱特征是在泵冲基频的整数倍处有明显的能量极大值, 故可判断 IMF6 为泵冲基波, 频率约为  $0.99$  Hz; IMF4 和 IMF3 分别为泵冲二次和三次谐波, 频率分别约为  $1.98$  和  $2.97$  Hz; IMF5、IMF2 和 IMF1 为部分泵冲谐波和部分高频噪声的叠加; 由于基线信号的频谱特征是能量主要集中在  $0.10$  Hz 以下的低频处且能量很强, 故可判断 IMF8 为基线信号; 由于随机噪声的频谱特征为全频率分布, 故可判断残余分量为部分随机噪声和部分泵冲谐波的叠加; 由于有用信号的能量主要集中在脉冲周期的倒数附近, 故可判断 IMF7 为有用信号。

将带通滤波和优化 VMD 去噪后的信号进行对比, 结果如图 4 所示。分析可知, 尽管有用信号幅度仅为原始信号幅度的  $0.5\%$  左右, 但 2 种去噪方法均能有效地压制噪声, 进而较为明显地从有用信号中分辨出编码脉冲。根据编码规则可以初步判断,  $15.3 \sim 26.3$  和  $162.3 \sim 173.2$  s 的 3 个连续脉冲可能为同步头信号,  $56.3 \sim 71.7$ ,  $93.4 \sim 109$  和  $131.3 \sim 146.9$  s 的 2 个幅度较高的脉冲可能为数据信号, 其他为杂

波。对比 35~53, 73~91 和 112~128 s 的杂波幅度可知, 与带通滤波算法相比, 优化 VMD 算法能够更好地压制杂波。

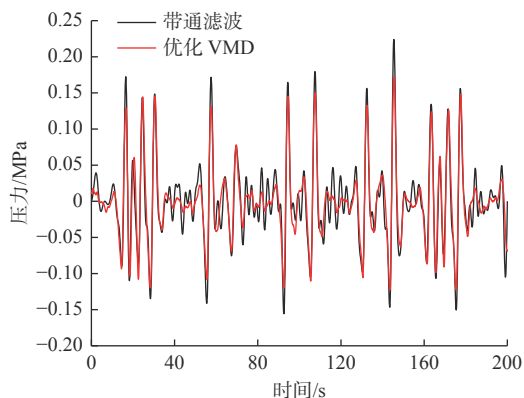


图 4 带通滤波和优化 VMD 去噪效果对比

Fig.4 Comparison of de-noising effects between bandpass filtering and optimal VMD

### 3.2 同步头识别效果

寻找同步头是信号识别的第一步。寻找同步头的传统方式是检测去噪后信号的峰值, 判断相邻波峰之间的时间间隔是否符合同步头特征。然而, 由于去噪算法并不能完全去除所有干扰, 去噪后的波形中必然存在诸多伪峰<sup>[9-11]</sup>。对于该情况, 通常通过设定阈值去伪, 但在低信噪比条件下编码脉冲和杂波幅度相差不大, 难以保证应用效果, 如图 5 所示。对于带通滤波去噪后的信号, 当阈值设定为 0.036 MPa 时, 幅度小于 0.036 MPa 的波形均被置为 0, 只有部分杂波被消除, 与编码脉冲幅度差异不大的伪峰未被消除(如 52.10 和 82.85 s 附近的杂波脉冲), 仍会对后续处理造成干扰。当阈值设定为 0.067 MPa 时, 幅度小于 0.067 MPa 的波形均被置为 0, 杂波均被消除, 波形中不再存在伪峰, 但 19.9 和 167.5 s 附近的同步头脉冲也被消除, 无法再确定同步头。对于优化 VMD 分解去噪后的信号, 当阈值设定为 0.036 MPa 时, 即可完全消除杂波, 并完整保留编码脉冲。

根据编码规则, 同步头信号中 3 个脉冲峰值之间的时间间隔均为 4 s。计算 15.3~26.3 s 范围内 3 个连续脉冲相邻波峰之间的时间间隔, 结果如图 6 所示。对于带通滤波去噪后的信号, 相邻波峰之间的时间间隔分别为 3.35 和 4.63 s, 与理论值差异较大, 难以判定为同步头信号。对于优化 VMD 分解去噪后的信号, 相邻波峰之间的时间间隔分别为 4.03 和 3.96 s, 与理论值差异很小, 可以判定为同步头信号。即, 优化 VMD 分解算法能够更好地保留编码脉冲的特征。

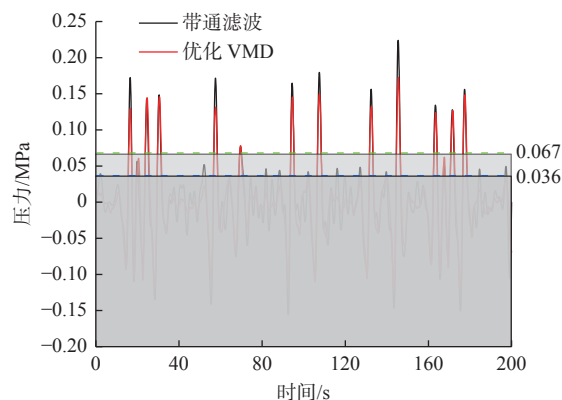


图 5 通过设定阈值去除杂波效果示意

Fig.5 Clutter removal effects through threshold setting

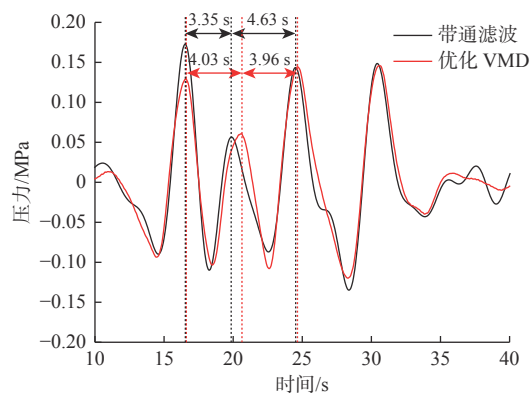


图 6 15.3~26.3 s 范围内 3 个连续脉冲相邻波峰之间的时间间隔

Fig.6 Time interval between adjacent wave peaks of three continuous pulses in the range of 15.3 ~ 26.3 s

互相关是一种确定 2 个信号之间相似度的处理方法, 不需要准确地获取每个有效峰的位置, 其基本原理是对信号序列和相关器进行点积计算<sup>[9,19-20]</sup>。对于本文所分析的信号, 构造的理论同步头相关器如图 7 所示。将理论同步头相关器与去噪后的信号进行互相关处理可得相关后的波形, 如图 8 所示。分析可知, 无论是带通滤波去噪后的信号还是优化 VMD 去噪后的信号, 互相关处理后, 同步头附近的相关波形幅度均明显强于其他位置。对于带通滤波去噪后的信号, 第一帧数据相关波形最大值所对应的位置为 25.45 s (即第一帧数据的起始位置), 第二帧数据相关波形最大值所对应的位置为 172.50 s (即第二帧数据的起始位置)。对于优化 VMD 去噪后的信号, 第一帧数据的起始位置为 25.50 s, 第二帧数据的起始位置为 172.50 s, 与利用带通滤波去噪后信号获取的起始位置基本一致。这表明, 与传统基于峰值检测的同步头识别算法相比, 基于互相关的同步头识别算法具有更高的稳定性。

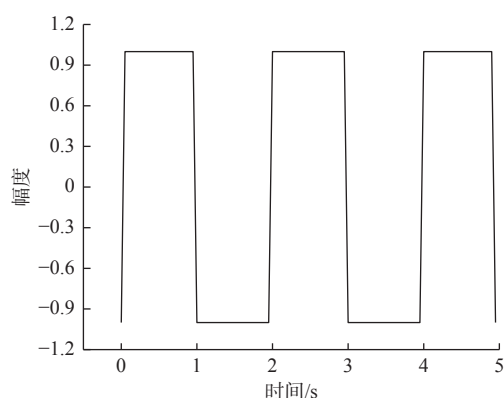


图 7 理论同步头相关器波形

Fig.7 Waveform of theoretical synchronization correlator

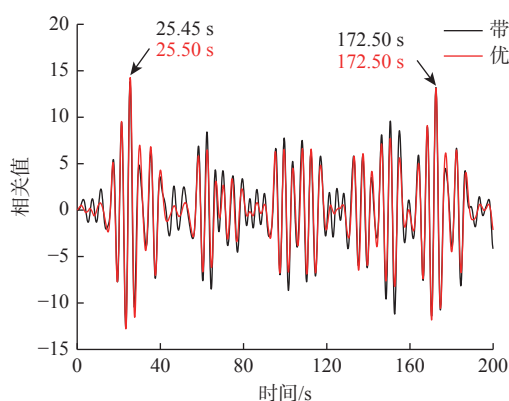


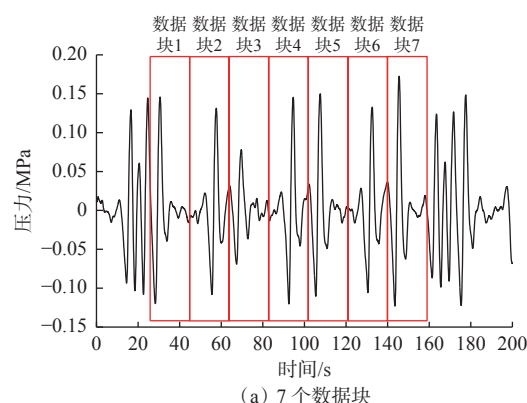
图 8 理论同步头相关器与去噪后信号通过互相关处理得到的波形

Fig.8 Waveforms obtained by cross-correlation between the theoretical synchronization correlator and the de-noised signals

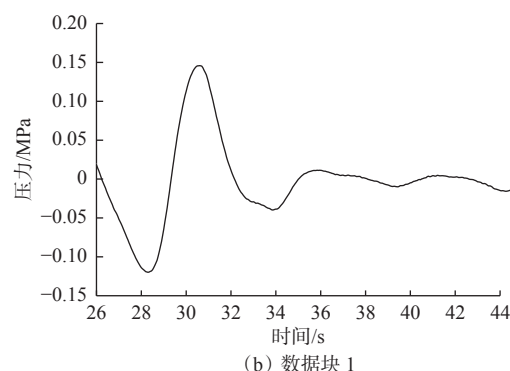
### 3.3 码值判别效果

起始位置确定后,即可根据数据块长度对去噪后的信号进行分块处理,每一个数据块内的波形代表着一个码值。传统的码值判别方式与传统的寻找同步头方式类似,即检测数据块内波形的峰值,计算波峰位置与数据块起始位置之间的时间间隔。这种方式同样也存在稳定性差的问题,在此不再赘述。基于图 8 中得到的同步头位置,对优化 VMD 去噪后的信号进行分块处理。对于第一帧数据,25.5~44.5 s 为第一个数据块,44.5~63.5 s 为第二个数据块,63.5~82.5 s 为第三个数据块,82.5~101.5 s 为第四个数据块,101.5~120.5 s 为第五个数据块,120.5~139.5 s 为第六个数据块,139.5~158.5 s 为第七个数据块,如图 9 所示。

根据编码规则构造理论数据块相关器,其波形如图 10 所示。对于每个数据块,将理论数据块相关器与数据块内去噪后的信号分别进行互相关处理,



(a) 7 个数据块



(b) 数据块 1

图 9 数据块划分结果

Fig.9 Partition results of data blocks

即可得到 16 个相关值,如图 11 所示。

分析可知,将理论数据块相关器与数据块 1 进行相关处理后,0x2 码值对应的的相关值最大,即数据

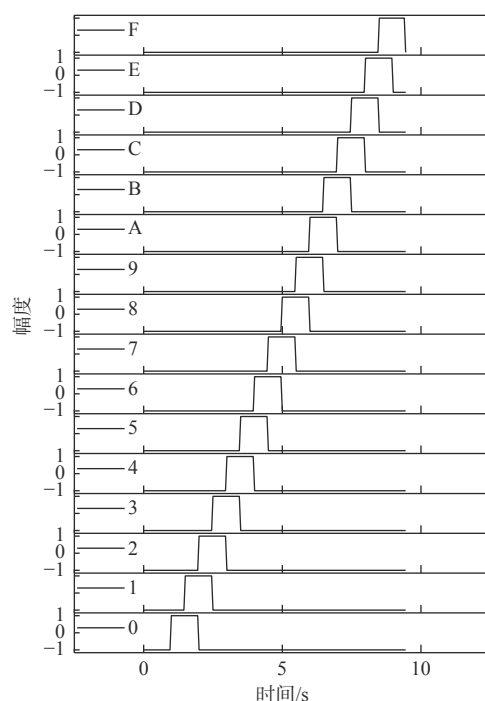


图 10 理论数据块相关器波形

Fig.10 Waveforms of theoretical data block correlators

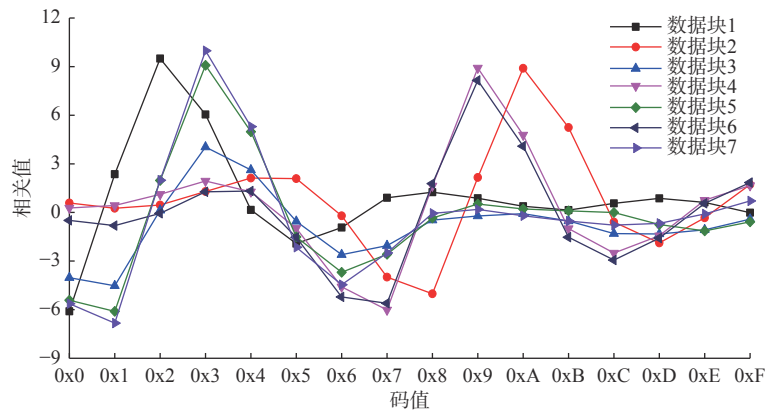


图 11 理论数据块相关器与各数据块内去噪后的信号通过互相关处理得到的曲线

Fig.11 Curves obtained by cross-correlation between theoretical data block correlators and the de-noised signals in data blocks

块 1 内波形所对应的码值为 0x2。同理可以得出, 数据块 2~7 内波形所对应的码值分别为 0xA、0x3、0x9、0x3、0x9 和 0x3。根据编码规则可知, 该数据帧为复合序列, 由 1 个同步头、1 个序列号和 3 个 GAMMA 测量值 3 部分组成(见表 1)。序列号占据 1 个数据块, 每个 GAMMA 测量值占据 2 个数据块。因此, 序列号的码值为 0x2, 3 个 GAMMA 测量值的码值依次为 0x3A、0x39 和 0x39。

表 1 数据序列编码  
Table 1 Coding of data sequence

序列号	参数名称	位数	量程/API	脉冲数	精度/API
1	GAMMA	8	0~500	2	±0.977
2	GAMMA	8	0~500	2	±0.977
3	GAMMA	8	0~500	2	±0.977

根据表 1 所示数据序列编码规则, 可以将组合后的十六进制数先转换成十进制数, 再转换成井下真实的测量结果。即:

$$V_m = \frac{V_{\text{bin}}(V_{\text{max}} - V_{\text{min}})}{2^D - 1} + V_{\text{min}} \quad (8)$$

式中:  $V_m$  为真实参数测量值, API;  $V_{\text{bin}}$  为十进制组合码值;  $V_{\text{max}}$  为最大测量值, API;  $V_{\text{min}}$  为最小测量值, API;  $D$  为测量值位数。

因此, 该帧钻井液脉冲信号最终解码结果为: 序列号为 2, 3 个 GAMMA 测量值依次为 113.726、111.765 和 111.765 API。

## 4 结论与建议

1) 为了满足复杂井眼环境下钻井液脉冲信号

处理的要求, 根据脉冲位置调制编码的基本原理, 提出了一种基于优化变分模态分解(VMD)和互相关的钻井液脉冲信号处理方法。利用该方法, 实现了低信噪比条件下有用信号的有效提取、数据帧起始位置的可靠计算以及码值的准确获取。

2) 与传统的带通滤波去噪算法相比, 优化 VMD 算法能够更好地压制杂波、保留编码脉冲的特征。与传统的阈值设定和峰值检测识别算法相比, 互相关算法不需要准确地获取每个有效峰的位置, 具有更高的稳定性。

3) 目前, VMD 算法具有较大的计算量, 建议下一步对算法进行并行化处理, 以提高解码效率。

## 参考文献

### References

- [1] 高文凯, 窦修荣, 闫国兴. 随钻声波传输的信道特性研究[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(4): 27-31.  
GAO Wenkai, DOU Xiurong, YAN Guoxing. Channel characteristics of acoustic telemetry while drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(4): 27-31.
- [2] YAN Zhidan, XU Wenyi, AI Chunwei, et al. Parametric study on pump noise processing method of continuous wave mud pulse signal based on dual-sensor[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 178: 987-998.
- [3] QU Fengzhong, JIANG Qin, JIN Guozheng, et al. Mud pulse signal demodulation based on support vector machines and particle swarm optimization[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 193: 107432.
- [4] 梁耀. 旋转导向系统信号传输与闭环控制关键技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.  
LIANG Yao. Research on the key technology of RSS's signal transmission and closed loop control[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [5] 梁耀, 李传伟, 李安宗, 等. 高速泥浆脉冲遥传系统研制及应



- 用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(6): 93–97.
- LIANG Yao, LI Chuanwei, LI Anzong, et al. Development and application of high-speed mud pulse signal transmission system[J]. Journal of Xi'an Shiyu University(Natural Science Edition), 2019, 34(6): 93–97.
- [6] 孙欢, 朱明明, 张勤, 等. 长庆油田致密气水平井超长水平段安全钻井完井技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 14–19.
- SUN Huan, ZHU Mingming, ZHANG Qin, et al. Safe drilling and completion technologies for ultra-long horizontal section of tight gas horizontal wells in Changqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 14–19.
- [7] 李金蔓, 孙金声, 霍宏博, 等. 物联网技术在海洋钻井中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(2): 233–240.
- LI Jinman, SUN Jinsheng, HUO Hongbo, et al. Applications of internet of things in offshore well drilling/completion[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(2): 233–240.
- [8] 张浩, 毕雪亮, 刘维凯, 等. EM-MWD 信号在钻柱中传输的影响因素研究[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 125–130.
- ZHANG Hao, BI Xuiliang, LIU Weikai, et al. Investigation of the factors that influence EM-MWD signal transmission in drill strings[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(6): 125–130.
- [9] 李艳军. 随钻测量系统泥浆脉冲解码及地面通信单元的设计与实现[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.
- LI Yanjun. Design and implementation of the mud pulse decoding and the ground communication unit on the MWD system[D]. Beijing: Beihang University, 2013.
- [10] 段友祥, 张洋弘, 李洪强, 等. 基于可信度分析的钻井液脉冲信号识别方法[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(3): 120–126.
- DUAN Youxiang, ZHANG Yanghong, LI Hongqiang, et al. A new drilling fluid pulse signal identification method based on credibility analysis[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(3): 120–126.
- [11] 胡永建, 黄衍福, 李显义. 钻井液脉冲信号自动去噪与识别算法[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 378–384.
- HU Yongjian, HUANG Yanfu, LI Xianyi. Automatic de-noising and recognition algorithm for drilling fluid pulse signal[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 378–384.
- [12] 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 Zongchao, TANG Luxin, LIU Hai. Adaptive filtering algorithm for cancelling the pump noise in the mud pulse signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1477–1484.
- [13] 贾梦之, 耿艳峰, 闫宏亮, 等. 高速泥浆脉冲数据传输技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 160–170.
- JIA Mengzhi, GENG Yanfeng, YAN Hongliang, et al. Review of high-speed mud pulse telemetry technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 160–170.
- [14] 张祝军. 摆动式连续波泥浆脉冲通信系统中的信道特性与消噪技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- ZHANG Zhujun. Signal processing and noise cancellation techniques for oscillatory continuous wave mud pulse telemetry[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [15] 郭光明. 随钻通信信道估计及信道质量评估方法研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- GUO Guangming. Research and implementation of channel estimation and channel quality assessment method for communication while drilling[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [16] 冉茂霞, 黄沁元, 刘鑫, 等. 基于优化变分模态分解的磁瓦内部缺陷检测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(12): 2158–2168.
- RAN Maoxia, HUANG Qinyuan, LIU Xin, et al. Internal defect detection of arc magnets based on optimized variational mode decomposition[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2020, 54(12): 2158–2168.
- [17] 邓红卫, 申一鹏. 基于变分模态分解和粒子群算法的微震信号降噪方法[J]. 矿冶工程, 2021, 41(1): 7–10.
- DENG Hongwei, SHEN Yipeng. Noise reduction method for micro-seismic signal based on variational mode decomposition and particle swarm algorithm[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(1): 7–10.
- [18] 施晶, 朱明, 沈华, 等. 基于VMD和小波阈值的水听器信号去噪方法[J]. 传感技术学报, 2020, 33(7): 1003–1012.
- SHI Jing, ZHU Ming, SHEN Hua, et al. Denoising method of hydrophone signal based on VMD and wavelet threshold[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(7): 1003–1012.
- [19] 李安宗, 李传伟, 梁耀, 等. 米勒码在随钻测井高速泥浆脉冲遥测系统中的应用[J]. 测井技术, 2015, 39(1): 78–82.
- LI Anzong, LI Chuanwei, LIANG Yao, et al. Study on Miller code technology for high data rate mud pulser system in LWD[J]. Well Logging Technology, 2015, 39(1): 78–82.
- [20] 彭轶旋. 连续波泥浆脉冲器信号的滤波与解码技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- PENG Yixuan. Research on the filtering and decoding technology of continuous wave mud pulser signal[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2018.

[编辑 令文学]