

泥浆脉冲信号传输技术及去噪方法研究现状

冯小军, 王家骏, 张秋实*, 任星兆, 田 洛

辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2024年10月22日; 录用日期: 2024年12月3日; 发布日期: 2024年12月17日

摘 要

钻井液脉冲信号传输技术是一种在石油钻探领域广泛应用的信号传输方法, 其通过脉冲信号发生器产生压力脉冲向地面传递信息, 但当前该技术仍面临着传输速率低、噪声干扰强等挑战。本文基于泥浆脉冲信号的基本原理, 详细阐述了其传输编码与调制技术, 并深入分析了信号的传输特性及衰减因素。针对当前随钻测量中泥浆脉冲信号去噪效果不理想的问题, 本文对国内外的泥浆脉冲信号滤波去噪方法进行了广泛的调研, 并对研究现状进行了全面的总结分析, 以期降低勘探和钻井的成本及风险提供有价值的技术参考。

关键词

泥浆脉冲信号, 衰减特性, 泵噪声, 编解码技术

Research Status of Mud Pulse Signal Transmission Technology and Denoising Method

Xiaojun Feng, Jiajun Wang, Qiushi Zhang*, Xingzhao Ren, Luo Tian

College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: Oct. 22nd, 2024; accepted: Dec. 3rd, 2024; published: Dec. 17th, 2024

Abstract

Drilling fluid pulse signal transmission technology is a widely used signal transmission method in the field of oil drilling, which transmits information to the ground through pressure pulses generated by pulse signal generators, but the current technology still faces challenges such as low transmission rate and strong noise interference. Based on the basic principle of mud pulse signal,

*通讯作者。

文章引用: 冯小军, 王家骏, 张秋实, 任星兆, 田洛. 泥浆脉冲信号传输技术及去噪方法研究现状[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(4): 413-425. DOI: 10.12677/jogt.2024.464050

this paper expounds the transmission coding and modulation technology in detail, and analyzes the transmission characteristics and attenuation factors of the signal in depth. In view of the unsatisfactory denoising effect of mud pulse signal in the current measurement while drilling, this paper conducts extensive research on the mud pulse signal filtering and denoising methods at home and abroad, and comprehensively summarizes and analyzes the research status, in order to provide valuable technical reference for reducing the cost and risk of exploration and drilling.

Keywords

Mud Pulse Signal, Attenuation Characteristics, Pump Noise, Codec Technology

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随钻测量(MWD)技术主要用于钻井过程中对井斜角、方位角、工具面等工程参数进行实时测量,确定井下状态、判断井下风险。当前,多数无线随钻测量系统采用泥浆脉冲作为信息传输的手段,泥浆脉冲传输技术可分为正脉冲、负脉冲以及连续脉冲三种形式。正脉冲信号发生器结构设计相对简单且信号传输稳定,尽管传输速率相对较低,但仍是目前广泛采用的一种信号传输方式;负脉冲传输速率低,能量损耗大;连续波传输速率高,但是在传输过程中易受噪声干扰,且结构复杂,国外连续波脉冲发生器发展较早,斯伦贝谢、贝克休斯等外国公司已具备成熟的连续波脉冲发生器技术[1]。

泥浆脉冲信号传输技术利用钻井液为媒介,在井下钻铤的泥浆通道内安装能够改变泥浆流通面积的脉冲发生器,通过调节其运动规律,产生泥浆压力波传输至地面并通过解码得到井下数据。由于国内起步较晚、国外公司技术上的封锁,国内科研院所和油服公司在钻井液脉冲信号传输上的发展较为缓慢,因此,展开对泥浆脉冲传输的研究具有重要现实意义。

2. 泥浆脉冲信号传输技术概述

2.1. 泥浆脉冲信号传输原理

自上世纪 30 年代 Arps JJ 发明了泥浆脉冲的传输方法以来,随钻测量技术取得了突破性的进展。当前,大部分无线随钻测量系统均采用泥浆脉冲传输方式,其原理为:当泥浆泵启动后,泥浆开始循环并带动井下泥浆发电机为井下设备供电,井下传感器所采集的数据经过编码处理,随后通过泥浆脉冲器的驱动控制电路激发针阀、旋转阀或转子等组件动作,形成节流效果,进而产生泥浆压力脉冲。这些脉冲信号通过钻杆内流动的泥浆传递至地表,地面立管上的压力传感器捕捉到脉冲信号,经过降噪处理和波形辨识后,由地面的解码装置进行信息还原,最终获取到井下传输的数据[2]。

2.2. 泥浆脉冲信号编解码技术

泥浆脉冲信号传输方式是通过一串预先编码的命令和受时间控制的泥浆脉冲信号对井下仪器参数进行传输,现广泛使用的编码方式有曼切斯特码、脉冲时间间隔调制编码和脉冲位置调制编码(PPM)等[3]。曼切斯特码是一种同步时钟编码技术,其使用电平跳变来表示“0”和“1”,在解编码中,井下测量参数分别以 5~13 个位数的格式组成字符串,当字符串通过奇偶校正后信号被识别,然后通过解码得到井下数

据：脉冲时间间隔调制编码是将数据信息调制在每个脉冲上，把该脉冲出现的时间长短作为数据信息进行传输的方法，通常一个脉冲代表一个十六进制数(0~F)，其具体数值取决于它与上一个脉冲之间的间隔时间长短；PPM 是基于脉冲位置调制的一种编码形式，将测量数据调制于脉冲信号之间，以时间帧的方式进行传送，无线随钻测量系统控制脉冲发生器在指定的时间内不同位置产生不同数量的脉冲，位置与数量信息用可直接存储的二进制数据来描述，在实时传输时将一段确定的时间 T 分为 M 等份的时间帧，并在其中分布 K 段脉冲信号，其每两个脉冲信号之间的时间间隔是不同的，脉冲信号之间时间间隔的变化代表所测量参数数值的变化[4]-[6]。

2.3. 泥浆脉冲信号发生器研究现状

国外公司在 MWD 测量技术领域起步较早，目前，耐高温 150℃、传输速率为 10 b/s 的泥浆脉冲随钻测量仪器占据了较大市场份额，性能得到升级的 200℃/207 MPa 高温高压脉冲随钻测量仪、传输速率 36 b/s 连续波脉冲高速传输测量仪、双信道随钻传输测量仪及数据压缩平台等产品垄断了 90% 以上的国际市场。此外，正脉冲随钻测量技术已形成成熟的耐温 175℃ 的钻井液脉冲随钻测量仪器，并进行了现场应用，主要产品有斯伦贝谢的 Slimpulse 随钻测量仪器、哈里伯顿的 Solar 175 系列随钻测量仪器、威德福的 HeatWave 系列随钻测量仪器以及贝克休斯的 NaviTrak 系列随钻测量仪器。连续波泥浆脉冲信号的传输速率最大可达到每秒几十位，并且其传输深度不受地层电阻率限制，是目前解决深井、超深井数据高速传输问题的必要技术手段。目前仅有斯伦贝谢、贝克休斯和哈里伯顿公司掌握该技术和拥有相关产品，斯伦贝谢的 Power Pulse 随钻测量仪最高数据传输速率可达到 16 b/s；贝克休斯的 aXcelerate 随钻测量系统其信号传输速率为 20 b/s，最高可达到 40 b/s；哈里伯顿 QuickPulse 随钻测量系统工具面数据的更新时间为 3 s，数据帧整体的更新时间为 24 s [7] [8]。

国内 MWD 技术水平在近几年得到了大幅度的提升，受广泛应用的泥浆正脉冲信号传输技术稳定在 5 bps，最高传输速率达到 20 bps 的连续波传输已经试验成功，并开始初步应用[9]。CNPC 发展机构和中国石油技术服务公司合作开发了一种新型正脉冲 MWD 系统并在大港油田进行试验，实验结果良好且设备性能稳定；胜利企业和 SPERRY 企业共同研究开发的 DWD 系统，采用正脉冲信号传输信息来完成数据测量，该系统使用井下涡轮发电机供电，可以在温度高达 150℃ 的井下环境稳定工作[10]。

3. 泥浆脉冲信号传输特性

3.1. 脉冲信号传播速度及影响因素

在泥浆脉冲传输系统中，信号传输速度是一个关键参数，钻井液内含黏土、岩屑、重晶石粉等固体成分，以及游离的气体，这些因素共同增加了信号速度问题的复杂性。由于 Desbrandes 给出的传统计算公式仅适用于纯液流和薄壁管，在此基础上，刘修善[11]给出新的钻井液脉冲的传输速度计算公式(式 1)，该计算公式不仅在钻井液的密度和压缩性上考虑了气相和固相，而且对钻柱体积弹性模量的计算方法也有很大改进。

$$a = 1 / \sqrt{\rho \left[1/K_p + 1/K_l + \beta_g (1/K_g - 1/K_l) + \beta_s (1/K_s - 1/K_l) \right]} \quad (1)$$

式中， a 为钻井液传输速度，m/s； ρ 为钻井液密度，kg/m³； K_p 为钻柱的体积弹性模量，MPa； K_l 为钻井液的液相体积模量，MPa； K_g 为气相体积模量，MPa； K_s 为固相体积模量，MPa； β_g 为体积含气率，%； β_s 为固相体积浓度，%。

影响泥浆脉冲传输速度的因素主要包括泥浆的组分及性质、钻柱的尺寸及材料特性，以及环境参数等，其中泥浆的物理性质是影响泥浆脉冲信号的重要因素。研究发现，钻井液中各组分的含量与密度对

其整体密度和可压缩性具有直接影响, 具体而言, 随着钻井液密度和可压缩性的增加, 脉冲信号的传输速度会相应减慢, 值得注意的是, 钻井液脉冲信号的传输速度对含气量极为敏感, 当含气量增加时, 传输速度会显著且迅速地降低[12]。实际上, 如图 1 所示, 由于井深的变化, 不同井深的泥浆密度都有一定的变化, 井下压力越高, 含气量对泥浆脉冲速度的影响就越大。此外, 泥浆中含气量受井筒环境温度的影响较大, 温度在升高的过程中降低了泥浆中的气体含量, 使得泥浆脉冲信号的传输速度增加(如图 2 所示) [13]。

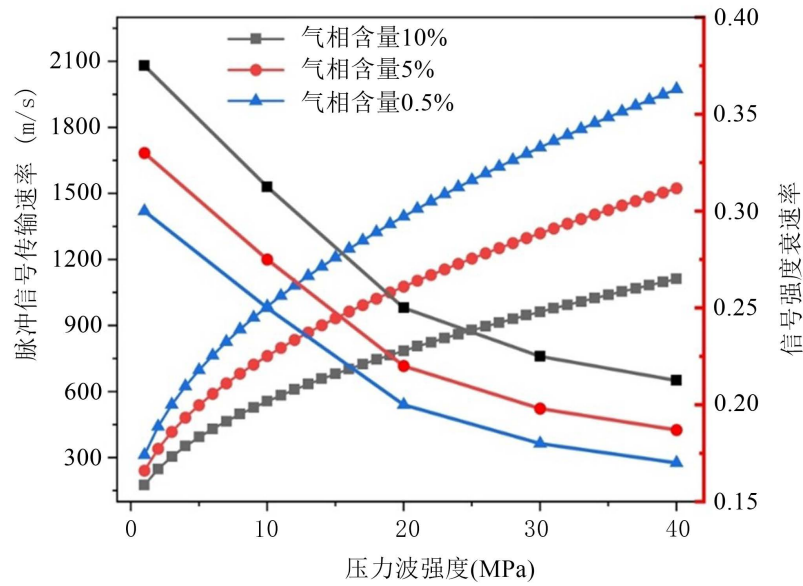


Figure 1. Influence of pressure and gas content on transmission speed [13]
图 1. 压力和气体含量对传输速度的影响[13]

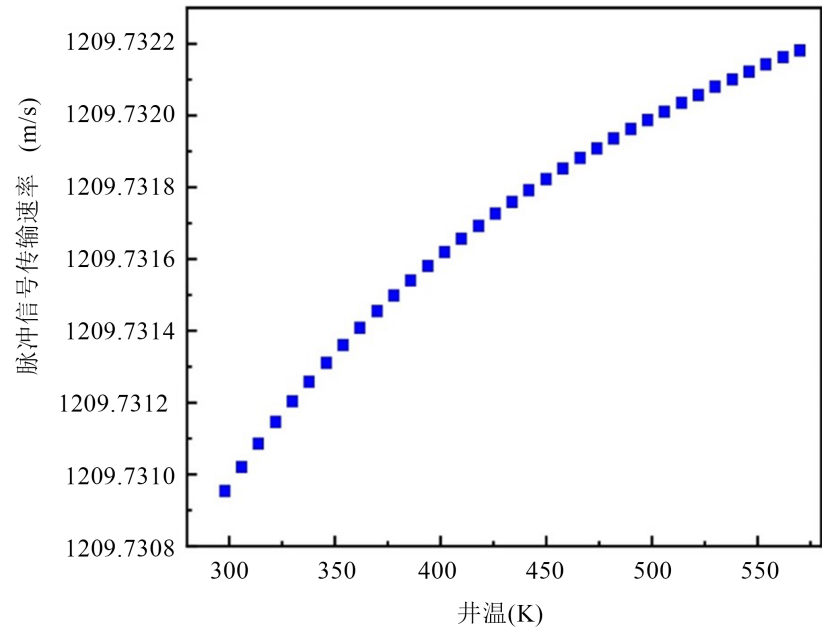


Figure 2. Influence of well temperature on mud pulse transmission speed
图 2. 井温对泥浆脉冲传输速度的影响

3.2. 泥浆脉冲信号强度衰减分析

钻井液脉冲以压力波的形式传输信号,其传播过程是一种动能和势能之间能量转换的过程,由于钻柱的弹性、泥浆压缩性、管壁对泥浆运动质点的摩擦以及泥浆质点之间的摩擦,泥浆信号能量在传输过程中会产生很大的损失[14]。当无线随钻 MWD 测量系统正常工作时,井下脉冲会产生一系列钻井液压力脉冲信号并在井眼内传输,由于钻井液的黏性阻力和管路系统弹性变形的影响,脉冲信号在传输中其压力波形状和强度幅值将不断失真、衰减。一般来说,钻井液压力脉冲信号传输距离越远,能量损失会越多,脉冲信号失真、衰减越严重。1987 年国外测井专家 R. Desbrandes 等人[15]研究了 MWD 系统中钻井液压力脉冲信号衰减的问题,研究发现:压力脉冲信号沿着钻柱传输时其幅值衰减大部分源于管壁上的摩擦损耗,其信号强度衰减与其他物理介质传输现象类似,符合指数衰减规律,其数学表达式为[16]:

$$p = p_0 \exp(-x/L) \quad (2)$$

其中:

$$L = \frac{D}{2} \sqrt{K_1 / \pi f \mu \left[1 + \mu \frac{K_1 D}{Ee} + \beta_g \left(\frac{K_1}{K_g} - 1 \right) + \beta_s \left(\frac{K_1}{K_s} - 1 \right) \right]}$$

式中, p_0 为信源信号强度, Pa; x 为信号传输距离, m; p 为传输 x 距离后的信号强度, Pa; μ 为钻井液粘度, MPa/s; f 为信号频率, Hz; 其他符号物理意义同前。

从公式(2)可以看出,脉冲信号的衰减程度主要受钻柱的尺寸、材料特性、脉冲频率,以及钻井液的类型、成分、粘度和压缩性等因素的影响。在常规的钻井作业中,钻柱的材料和尺寸往往是固定的,而钻井液体系的选择则主要依赖于地质条件、油藏工程的特性和钻井工艺的具体要求。研究表明,信号频率与钻井液粘度对信号衰减的影响极大,且信号频率的影响比钻井液粘度的影响更为显著,在脉冲频率较高且钻井液粘度较大的情况下,信号衰减更为迅速。这表明,在提升钻井液脉冲信号的传输速率与增加传输深度之间存在着矛盾,这也是随钻测量技术当前面临的重要挑战。周博涛[17]等人基于二维轴对称瞬态流动理论,采用小信号分析方法建立了高频钻井液压力波衰减模型,准确描述了泥浆脉冲压力波衰减特性。

图 3 为泥浆密度对脉冲信号衰减的影响规律。泥浆密度对井筒压力和温度的变化非常敏感,图 4 为泥浆密度随井深变化曲线。出于考虑到钻井过程中井筒传热效应,不同时间的温度分布图如图 5 所示。图 6 为沿井筒的压力剖面。从上述图中可以看出,钻井液的衰减系数随着井深的增加而发生明显的变化。受泥浆密度的影响,泥浆脉冲信号在井筒上部的衰减更为严重,此外,图 3 还显示出不同循环时间下的速度与衰减系数分布差异。从图 5 中看出,随着钻井液循环流动,泥浆脉冲传播速度比较低,在井筒下部的衰减愈发严重。由于冷却效应,井筒与底层间的热传递速率随着循环流动而减小。因此,钻柱内温度随循环而下降,最终引起速度和衰减系数的变化[18]。

赵常青[19]等人研究了不同工况下钻井液流量和定、转子轴向间隙对脉冲信号强度的影响规律,并利用 CFD 对脉冲信号进行仿真分析,图 7 所示为不同定、转子轴向间隙下压力波信号的比较,观察结果显示,当钻井液流量为 35 L/s 且轴向间隙为 0.03 in 时,压力信号的幅值达到 3.62 MPa,随着轴向间隙的扩大,钻井液的压力信号呈现下降趋势,具体来说,当定子和转子的轴向间隙分别增大至 0.045 in 和 0.06 in 时,压力信号的幅值相应降低至 2.93 MPa 和 2.27 MPa,这一现象的原因在于,轴向间隙的变化会影响转阀的流通面积:轴向间隙增大时,流通面积也随之扩大,导致该区域的流速场发生较大变化,进而引起压力波信号幅值的减小,最终削弱了脉冲信号的强度。

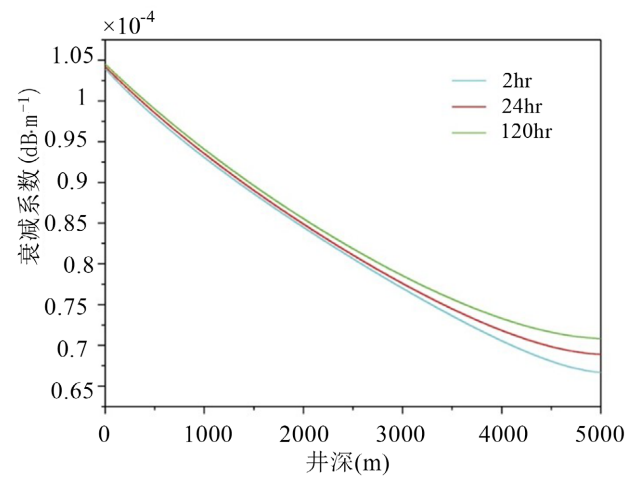


Figure 3. Attenuation coefficient curves at different cycle times [18]

图 3. $\omega = 1 \text{ Hz}$ 时不同循环时间的衰减系数曲线[18]

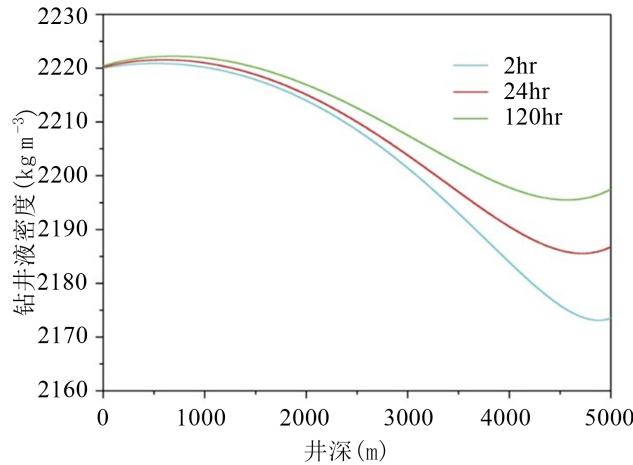


Figure 4. Mud density at different circulating times [18]

图 4. $\omega = 1 \text{ Hz}$ 时不同循环时间的泥浆密度[18]

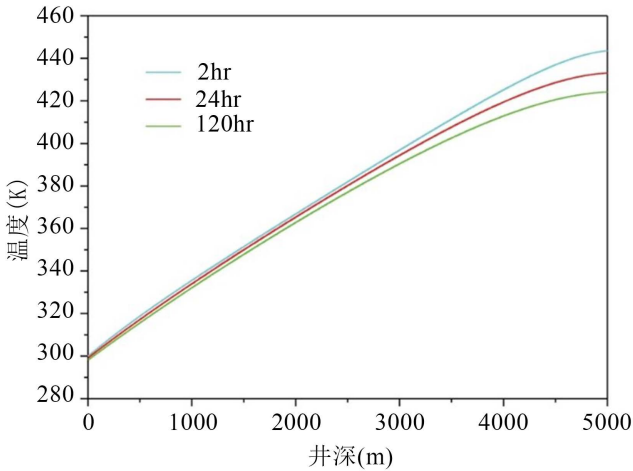


Figure 5. Temperature curves of different cycle times [18]

图 5. $\omega = 1 \text{ Hz}$ 时不同循环时间的温度曲线[18]

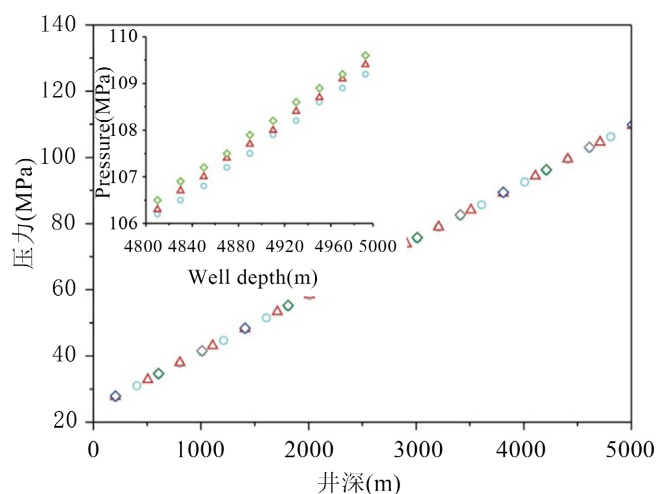


Figure 6. Drill string pressure curves at different circulation times [18]

图 6. $\omega = 1$ Hz 不同循环时间的钻柱压力曲线[18]

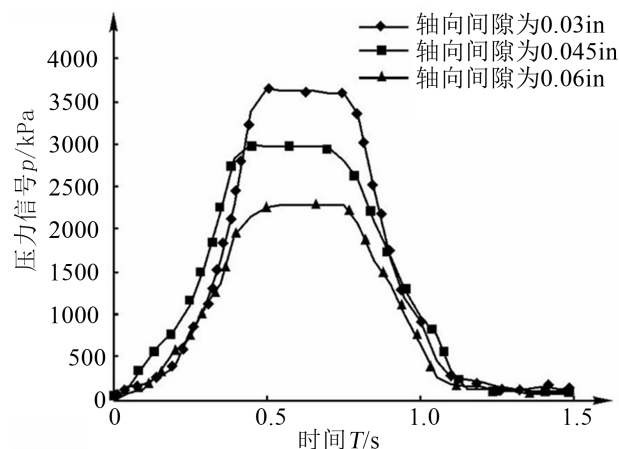


Figure 7. Pressure wave signals under different axial clearances [19]

图 7. 不同轴向间隙下的压力波信号[19]

4. 泥浆脉冲信号去噪方法研究现状

4.1. 脉冲信号影响因素分析

井底泥浆脉冲信号在上传到地面的过程中会受到不同种类、不同程度的噪声干扰,导致地面系统采集到的信号中除了有用的泥浆压力波信号外,还有混杂的其他大量噪声,这些噪声频率多样并且幅度较大,严重影响了后续泥浆脉冲信号处理,在强噪声背景下提取到有用的泥浆脉冲信号是一个亟待解决的技术难题。

钻头钻进过程中需要各个机械装置的协同作用,因此,信号在传输过程中会受到诸如钻探泵噪声、机械噪声以及气泡等影响,这些干扰信号可能随机地组合在一起成为一种更加复杂的干扰信号,这种不确定性的干扰信号会严重影响信号的识别。

泥浆信道中存在的干扰性最强的噪声是由于钻井过程中泥浆泵作用于泥浆而产生的泵噪声,理想情况下,泵噪声是周期性的正弦波。根据实际应用要求,可以选择不同作用数的泥浆泵,目前常用的是三缸单作用泵,由于各装置之间的相互影响,每缸的排量并不是理想情况下规则的正弦波,三缸也并不能

做到完全对称，这就造成了泵噪声频率是多频的，且幅度较大，因此很难去除[20]。

图 8(a)显示了车间实验中正脉冲发生器产生的压力信号，包括帧同步脉冲和指令脉冲，电信号为方波，采样频率为 256 S/s。由于主阀头运动和信道衰减，信号上升时间延长但含高频成分，主要受 1~20 Hz 泥浆泵噪声影响，图 8(b)和图 8(c)分别展示了施工现场井口测试和正常施工时的信号，现场信号信噪比降低，高频有效成分减少[21]。

除了泥浆泵产生的周期性泵噪声外，还存在其他多种噪声源。这些包括钻盘旋转、钻头与地层界面的摩擦、钻柱振动以及立管晃动等机械作用所引发的压力波动。此外，传感器自身以及信号传输过程中也可能产生电磁噪声。这些噪声的产生机制复杂，相较于泵噪声，它们展现出更大的随机性，通常具有较小的幅值和较宽的频带，因此可以近似视为白噪声。

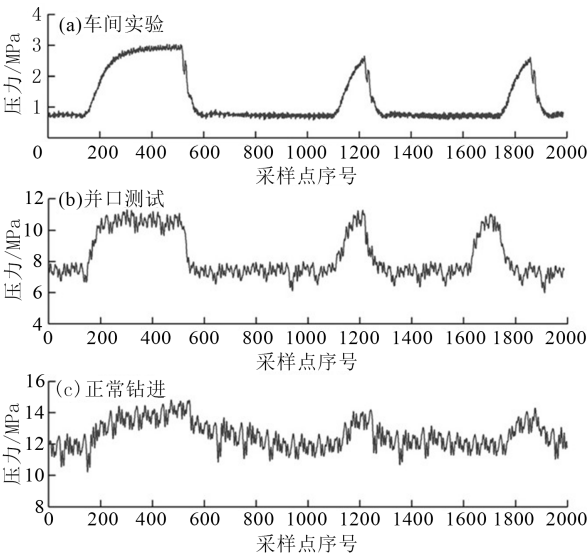


Figure 8. Characteristics of mud pulse signal [21]
图 8. 泥浆脉冲信号特征[21]

4.2. 泥浆脉冲信号去噪方法研究进展

在立管上的泥浆脉冲压力传感器采集到井下的原始脉冲信号后，传统的处理方法是将采集到的信号进行傅里叶变换，但是这种处理方法没有很好地同时分析信号时域和频域信息。原始信号中不仅包含高频干扰，还叠加了与信号频率相近的低频噪声，由于这些噪声的频率与信号频率相近，并且受到频谱位移幅值的影响，导致噪声频谱与信号频谱发生重叠，因此，单纯通过调整低通滤波器的通阻带频率、滤波阶数等参数，难以有效地将信号从噪声中分离出来。表 1 为泥浆脉冲信号常用去噪方法对比。

Table 1. Comparison of advantages and disadvantages of mud pulse signal denoising methods
表 1. 泥浆脉冲信号去噪方法优缺点比较

泥浆脉冲信号去噪方法	优点	缺点
泵噪声特征消噪法	数学模型简单	获得的有用信号误差较大
小波变换消噪法	在时域、频域分析时，能够实现实时性的动态跟踪分析	小波基的选择缺乏理论依据
经验模态分解消噪法	滤波消噪效果好，自适应性较强	分解层数选择缺乏理论依据，不利于信噪比提升
自适应滤波消噪法	具有实时跟踪性，无需研究泵噪声特性	算法的稳定性和收敛性存在矛盾

4.2.1. 小波变换

傅立叶变换在整个时间范围内能反映信号的频率分量,其适合于处理平稳过程信号。然而,在处理非平稳过程时,它只能捕获信号段的整体频率分量,而不能提供关于每个时刻的频率特性的信息。在频率随时间变化的非平稳泥浆脉冲信号的情况下,小波变换的多分辨率特性更适合去噪[22]。小波变换将傅立叶变换中的无限长三角基函数替换为有限长和衰减的小波基函数,从而提供更精细的信号表示,连续小波变换表达式如下所示[23]:

$$\text{CWT}(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{|\alpha|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{\alpha} \right) dt \quad (3)$$

其中小波基数学表达式为:

$$\psi_{\alpha, \tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{|\alpha|}} \psi \left(\frac{t-b}{\alpha} \right) \quad (4)$$

式中,尺度因子 α 控制小波函数的拉伸,平移因子 b 控制其移位。

小波基、尺度参数和消失矩的选择都会影响其去噪性能,由于小波基函数并不唯一,因此在处理现场原始信号时应根据实际信号的特点选择不同的小波基函数。例如,Harr小波具有良好的时域定位特性、LP小波具有良好的频域局部化特性、Meyr小波在时域和频域具有快速收敛性、db小波具有良好的平滑信号重构规律性。较小的尺度因子为小波提供了较窄的有效宽度,适用于高频信号处理的较高时域分辨率,相反,更大的尺度因子为小波提供了更宽的有效宽度,从而产生更高的频域分辨率,适用于低频信号处理[24]。消失矩表示小波变换后的能量集中,消失矩越高,高频带中的小波系数就越小,相应的滤波器就越平坦,但是它需要更多的计算、处理时间。Namuq [25]等人采用连续 Morlet 小波变换随着频率的变化调整窗口大小,实现了空间频率的局部细化分析,仿真结果表明,该方法成功地区分信号的频率分量和相应的时间间隔,有效地消除了随机噪声。Liang [26]等人通过比较原始信号和去噪信号之间的相关度、重构能力和信噪比,确定了不同分解级别的最优小波基。并通过现场实验验证了该方法的可行性。Chen [27]等人提出了一种基于新的功率阈值函数的小波阈值去噪方法,仿真结果表明,将标准卡尔曼滤波方法与功率小波去噪算法相结合,实现了线性时不变泵浦噪声模型的最佳整体性能。

4.2.2. 自适应滤波

自适应滤波器是一种时变数字滤波器,它可以根据之前获得的滤波器参数自动调整当前时间的滤波器系数,以在输入信号或外部噪声发生变化时实现最佳滤波。图9为自适应滤波器的示意图,图中, $x(n)$ 是包含噪声的输入信号、 $y(n)$ 是输出信号、 $d(n)$ 是期望的信号、 $e(n)$ 是误差信号。自适应滤波器工作时通过某种自适应算法,如LMS或RLS,根据误差信号值连续自适应地调整当前滤波器系数,使输出信号 $y(n)$ 无限接近所需信号 $d(n)$ [28]。

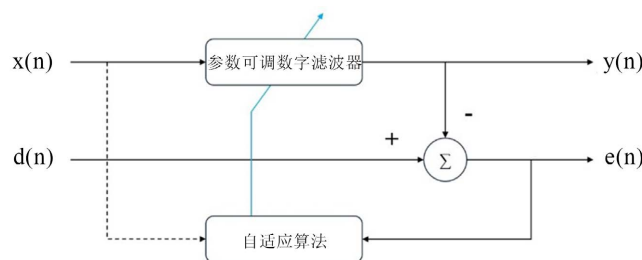


Figure 9. Schematic diagram of adaptive filter

图9. 自适应滤波器示意图

自适应算法一直是信号处理领域的研究热点,广泛应用于噪声去除和信道均衡。Shen 等人[29]研究了在自适应滤波器中使用 LMS 算法动态去除压力 PSK 调制泥浆压力波信号中的噪声的理论方法,结果表明,选择合适的步长因子可以提高重构信号的信噪比,减少信号失真,此外,步长因子相同时,QPSK 信号具有更强的抗干扰能力。Liu [30]提出了一种自适应最小均方(LMS)迭代算法,通过实验表明,LMS 算法收敛速度快,稳态误差小,均方误差小,适用于 EM-MWD 和 MPT 系统的噪声去除。Yan [31]等人提出了一种基于改变步长 LMS 算法的自适应泥浆脉冲噪声消除系统,用以克服谐波频率与信号接近时泵噪声的干扰,通过比较相关算法发现:改进的 LMS 算法具有更快的收敛速度和更好的滤波性能,提高了系统在噪声频率不断变化时的抗干扰能力。

4.2.3. 经验模态分解

经验模态分解(EMD)是一种可以将输入信号分解为多个本征模函数(IMF)的方法,这些 IMF 按频率的降序排列,包含不同频率范围的有用信号和噪声[32]。EMD 本质上是一个对信号进行平滑的过程,使其在分析非平稳和非线性信号时具有优势。Zheng [33]等人提出了一种改进的集成经验模式分解(EEMD)算法,通过对 10 种不同 IMF 构造的低通滤波算法的测试,得到了最佳的算法组合,表明该方法适用于钻井泥浆脉冲信号分解和噪声去除。Zhong [34]等人使用粒子群优化(PSO)算法选择时变滤波经验模式分解(TVFEMD)最优参数组合,提高了其性能和鲁棒性,在 IMF 组件重建过程中使用排列熵作为评估标准,使结果更符合工程实际。Qu [35]等人使用 EMD 将泵噪声分解为一系列 IMF 和残差信号,通过 PSO 算法选择最优权重来重构泵噪声,获得去噪效果明显的信号,通过现场实验验证了该算法的可行性。

与 EMD 相比,变分模态分解(VMD)在处理末端效应和模式混合问题方面具有优势。Jiang [36]等人提出了一种恒定中心频率算法(CVMD),该方法基于有用信号的基频和泵噪声的谐波频率,将传统 VMD 的中心频率设置为常值,使其自适应地分解复杂的时变信号,对现场数据处理分析后表明,CVMD 算法表现出优异的去噪性能,具有较强的工程应用价值。

4.2.4. 双传感器差分噪声消除算法

基于双压力传感器的噪声消除方法在消除复杂时变泵噪声方面表现出优异的性能,已成为连续波信号泵噪声消除的主流发展方向。如图 10 所示,传感器 1 位于井口附近,传感器 2 位于泥浆泵附近,上行压力波信号从传感器 1 传输到传感器 2,同时,泵噪声从传感器 2 传播到传感器 1。因此,泥浆脉冲信号和泵噪声具有不同的传播方向,导致传感器检测到的信号中的相位传输延迟,通过应用相移和相消技术来求解延迟微分方程,可以提取有效信号[37]。图中使用脉动阻尼器可以减少和分散泥浆泵中每个活塞的冲击能量,从而减少冲击引起的振动噪声,使压力波信号平滑[38]。

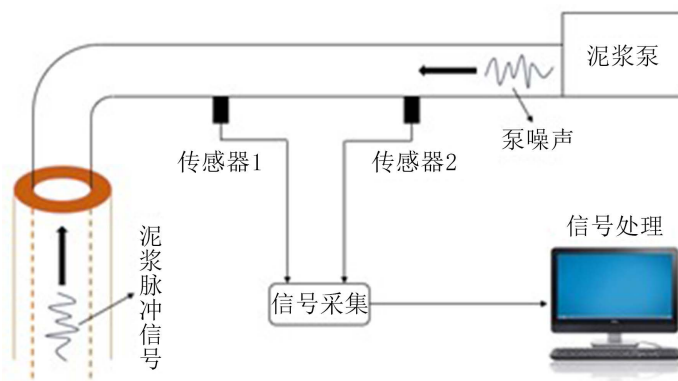


Figure 10. Schematic diagram of mud pulse signal transmission system with dual sensors
图 10. 双传感器泥浆脉冲信号传输系统示意图

基于双传感器的泵噪声消除方法受到了研究人员的极大关注,但两个传感器之间的时间延迟与它们的距离密切相关,因此如何选择双传感器的最佳安装位置和间隔对信号提取有重要影响[1]。Shen [39]等人研究发现,可以通过分析脉冲信号的最高频率和最小频率来确定两个压力传感器之间的距离。Yan [40]等人通过仿真实验,分析了延迟微分算法在不同泵噪声条件下的去噪效果,并给出了理想的安装间隔。在重构信号的过程中,响应特性会随着外部条件的变化而变化,并且传感器之间的信道传递函数的能力会影响提取信号的质量。Qu [41]等人基于 RLS 算法的自适应滤波器,实时跟踪双传感器之间的信道响应特性,并优化传递函数,使用 12~24 Hz 载波 BFSK 调制方法进行了 3000 m 实井测试,结果表明泵噪声的主要成分降低了 49~92%,进一步证实了使用双压力传感器抑制泵噪声的优异性能。

4.2.5. 基于机器学习算法的消噪方法

近年来,机器学习在计算机视觉、自动驾驶、语音识别等各个领域得到广泛应用。由于机器学习强大的学习能力,许多基于机器学习的去噪算法已应用于信号调制和解调、降噪以及信道检测等通讯技术。Zhang [42]等人建立了一种基于深度学习的叠加小波自动编译器识别泥浆脉冲信号的模型,该模型由小波神经网络和自动编译器组成,通过分析泥浆脉冲信号并测试了典型数据集的识别性能,结果表明,该模型在识别泥浆脉冲信号时有很强的提取样本特征能力和鲁棒性。Yang [43]等人提出了一种基于卷积神经网络(CNN)的信号去噪网络(MSDnNet),仿真实验表明,MSDnNet 可以提取不同噪声水平下的泥浆脉冲信号,显著提高信噪比,表明该网络对泥浆脉冲噪声具有良好的泛化能力。Li [44]等人提出了一种使用双向卷积长短期记忆神经网络(Bi-ConvLSTM)的新方法,通过向信号中添加泵噪声和高斯白噪声来创建预训练集从而获得更好的噪声去除性能,结果表明,该模型有效地抑制了验证集样本中的噪声,并显著提高了信号的信噪比和相关系数。Zhang [45]等人应用随机共振技术消除复杂噪声背景下泥浆脉冲信号中的低频噪声,为了解决随机共振模型中的参数选择问题,采用自适应遗传模拟退火算法来确定最优参数,现场实验证明,该方法可以提高泥浆脉冲信号的信噪比,实现低信噪比条件下的信号检测。

5. 结论

(1) 泥浆脉冲信号在传输时会受到多种因素的共同作用,其中井眼深度和空气包并非唯一的影响因素,更重要的是,钻柱的尺寸、材料特性、信号频率以及泥浆的性能都会对信号产生影响,特别是与泥浆性能相比,信号频率的变化对信号的影响更为显著,当信号频率增高时,信号在传输过程中的衰减也会加剧,此外,地层和井筒的条件也会影响到泥浆的粘度、固相含量以及气泡的形成,进而对信号的衰减产生显著影响。

(2) 机器学习去噪算法去除泥浆脉冲信号的噪声仍处于初步探索阶段,目前面临着两个亟待解决的问题:一是训练强大的神经网络模型需要大量的训练数据,这使得大多数研究人员很难从不同的井场获得实际样本;二是大多方法仅仅通过了实验室模拟进行验证,缺乏现场测试;由于实际作业现场噪声更复杂,并且具有时变特性,因此,对机器学习去噪算法模型的通用性和稳定性有着很严峻的考验。

参考文献

- [1] Emmerich, W., Akimov, O., Brahim, I.B. and Greten, A. (2015) Reliable High-Speed Mud Pulse Telemetry. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, London, 17-19 March 2015, Article No. SPE-173032-MS. <https://doi.org/10.2118/173032-ms>
- [2] Tu, B., Li, D.S., Lin, E.H. and Ji, M.M. (2012) Research on Mud Pulse Signal Data Processing in MWD. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, **2012**, 1-7. <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2012-182>
- [3] 车卫勤, 杜晶, 郭子枫, 等. 脉冲位置编解码方式映射模型及效率分析[J]. 油气田地面工程, 2024, 43(2): 78-84.
- [4] 涂兵, 李静怡, 王思成, 等. 基于曼彻斯特编码的钻井液脉冲信号提取算法[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 85-89.

- [5] Sun, D.K. and Dong, S.H. (2007) Analysis of Drilling Fluid Positive Pulse Downhole Signal Transmission System. *China Petroleum Machinery*, **35**, 49-51.
- [6] 林永强. 基于信号通道预测基准值的测井数据编码传输技术研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [7] 袁翔. 连续波泥浆脉冲发生器系统设计及传输特性研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2021.
- [8] 陈晓静. 国内外 MWD 仪器的发展和应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(14): 92-93.
- [9] 苏义脑, 窦修荣, 高文凯, 等. 油气井随钻测量技术发展思考与展望[J]. 石油科学通报, 2023, 8(5): 535-554.
- [10] 王延文, 叶海超. 随钻测控技术现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(1): 122-129.
- [11] 刘修善. 钻井液脉冲沿井筒传输的多相流模拟技术[J]. 石油学报, 2006(4): 115-118.
- [12] 何树山, 刘修善. 钻井液正脉冲信号的衰减分析[J]. 钻采工艺, 2001(6): 1-3+12.
- [13] Qu, J., Xue, Q. and Lu, J. (2023) Analysis on the Change Characteristics of Waveform during the Transmission of Continuous Wave Mud Pulse Signal. *Alexandria Engineering Journal*, **80**, 594-608. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.09.005>
- [14] 王永, 余敏, 张党生. MWD 泥浆正脉冲信号传输特性及现场应用分析[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2022, 36(2): 78-82.
- [15] Desbrandes, R., Bourgoyne, A.T. and Carter, J.A. (1987) MWD Transmission Data Rates Can be Optimized. *Petroleum Engineer International*, **59**, 46-52.
- [16] 石在虹, 刘修善. 井筒中钻井信息的传输动态分析[J]. 天然气工业, 2002(5): 68-71+75.
- [17] 周博涛, 苏义脑, 王家进. 高频钻井液压力波衰减模型及规律研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(9): 44-50.
- [18] Li, H., Meng, Y., Li, G., Wei, N., Liu, J., Ma, X., et al. (2013) Propagation of Measurement-While-Drilling Mud Pulse during High Temperature Deep Well Drilling Operations. *Mathematical Problems in Engineering*, **2013**, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2013/243670>
- [19] 赵常青, 刘凯, 赵桐, 等. 随钻正脉冲测井压力信号生成特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(1): 8-12.
- [20] 张艳艳. 随钻测量泥浆脉冲信号去噪方法研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2016.
- [21] 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.
- [22] Zhang, G.Y., Tu, B. and Zhan, T.X. (2014) Research on Mud Pulse Signal Starting Time Extracting Algorithm in MWD. *Applied Mechanics and Materials*, **525**, 685-690. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.525.685>
- [23] Tang, J., Zhou, J., Wan, D. and Bai, C. (2022) Research on Acoustic Logging Signal Processing Method Based on Wavelet Transform. 2022 4th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing, Hangzhou, 8-10 July 2022, 761-764. <https://doi.org/10.1109/icmsp55950.2022.9859171>
- [24] Chen, W., Fang, B. and Wang, Y. (2010) MWD Drilling Mud Signal De-Noising and Signal Extraction Research Based on the Pulse-Code Information. 2010 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Qingdao, 11-14 July 2010, 244-249. <https://doi.org/10.1109/icwapr.2010.5576341>
- [25] Namuq, M.A., Reich, M. and Bernstein, S. (2013) Continuous Wavelet Transformation: A Novel Approach for Better Detection of Mud Pulses. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **110**, 232-242. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.08.052>
- [26] Liang, Y., Ju, X., Li, A., Li, C., Dai, Z. and Ma, L. (2020) The Process of High-Data-Rate Mud Pulse Signal in Logging While Drilling System. *Mathematical Problems in Engineering*, **2020**, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2020/3207087>
- [27] 陈果. 组合码泥浆正脉冲信号处理方法研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2020.
- [28] Greten, A., Brahim, I.B., Emmerich, W. and Akimov, O. (2017) Reliable Mud-Pulse Telemetry System for High-Resolution Real-Time Logs. SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, The Hague, 14-16 March 2017, Article No. SPE-184666-MS. <https://doi.org/10.2118/184666-ms>
- [29] Shen, Y., Zhang, L., Zhang, H., Su, Y., Sheng, L. and Li, L. (2013) Eliminating Noise of Mud Pressure Phase Shift Keying Signals with a Self-Adaptive Filter. *Indonesian Journal of Electrical Engineering*, **11**, 3028-3035. <https://doi.org/10.11591/telkomnika.v11i6.2610>
- [30] Keman, L. (2016) Adaptive Noise Cancellation for Electromagnetic-While-Drilling System. 2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering, Beijing, 8-10 July 2016, 1253-1256. <https://doi.org/10.1109/icisce.2016.268>
- [31] Yan, X., Chen, L., Qing, M., Dou, X. and Liang, H. (2020) Adaptive Noise Cancellation Method for Continuous Wave Mud Channel of MWD. 2020 IEEE 16th International Conference on Control & Automation, Singapore, 9-11 October

- 2020, 289-294. <https://doi.org/10.1109/icca51439.2020.9264449>
- [32] Lakhanpal, V. and Samuel, R. (2017) A New Approach to Harness Data for Measuring Invisible Lost Time in Drilling Operations. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, 9-11 October 2017, Article No. SPE-187270-MS. <https://doi.org/10.2118/187270-ms>
- [33] Zheng, Y., Sun, X., Chen, J. and Yue, J. (2012) Extracting Pulse Signals in Measurement While Drilling Using Optimum Denoising Methods Based on the Ensemble Empirical Mode Decomposition. *Petroleum Exploration and Development*, **39**, 798-801. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(12\)60107-4](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(12)60107-4)
- [34] Zhong, X., Cen, L., Zhao, Y., Huang, T. and Shi, J. (2020) Measurement While Drilling Mud Pulse Signal Denoising and Extraction Approach Based on Particle-Swarm-Optimized Time-Varying Filtering Empirical Mode Decomposition. *SPE Drilling & Completion*, **36**, 483-493. <https://doi.org/10.2118/204454-pa>
- [35] Qu, F., Jiang, Q., Jin, G., Wei, Y. and Wang, Z. (2021) Noise Cancellation for Continuous Wave Mud Pulse Telemetry Based on Empirical Mode Decomposition and Particle Swarm Optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **200**, Article 108308. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108308>
- [36] Jiang, S., Yan, Z., Sun, R., Wang, Z. and Sun, H. (2023) Study on Signal Decomposition-Based Pump Noise Cancellation Method for Continuous-Wave Mud Pulse Telemetry. *Geoenery Science and Engineering*, **228**, Article 211948. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211948>
- [37] Shao, J., Yan, Z., Han, S., Li, H., Gao, T., Hu, X., *et al.* (2017) Differential Signal Extraction for Continuous Wave Mud Pulse Telemetry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **148**, 127-130. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.09.047>
- [38] 张松炜, 王智明. 泥浆脉冲随钻高速率遥传系统设计与应用[J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(1): 9-12.
- [39] Shen, Y., Zhang, L., Cui, S., Sheng, L., Li, L. and Su, Y. (2013) Delay Pressure Detection Method to Eliminate Pump Pressure Interference on the Downhole Mud Pressure Signals. *Mathematical Problems in Engineering*, **2013**, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2013/797549>
- [40] Yan, Z., Xu, W., Ai, C. and Geng, Y. (2019) Parametric Study on Pump Noise Processing Method of Continuous Wave Mud Pulse Signal Based on Dual-Sensor. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **178**, 987-998. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.018>
- [41] Qu, F., Zhang, Z., Hu, J., Xu, J., Wang, S. and Wu, Y. (2018) Adaptive Dual-Sensor Noise Cancellation Method for Continuous Wave Mud Pulse Telemetry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **162**, 386-393. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.12.058>
- [42] Zhang, X., Zhang, H., Guo, J. and Zhu, L. (2018) Auto Measurement While Drilling Mud Pulse Signal Recognition Based on Deep Neural Network. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **167**, 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.04.004>
- [43] Yang, B., Chen, W., Wang, W. and Guo, G. (2022) Noise Modeling and Deep Learning Noise Suppression of Mud Signal. 2022 *IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications*, Chengdu, 16-19 December 2022, 1354-1359. <https://doi.org/10.1109/iciea54703.2022.10005920>
- [44] Li, J., Fang, J. and Sheng, L. (2022) Noise Cancellation for Continuous Wave Mud Pulse Signal Based on Bi-ConvLSTM. 2022 *41st Chinese Control Conference*, Hefei, 25-27 July 2022, 3032-3037. <https://doi.org/10.23919/ccc55666.2022.9902370>
- [45] Zhang, X., Zhang, H., Guo, J., Zhu, L. and Lv, S. (2017) Research on Mud Pulse Signal Detection Based on Adaptive Stochastic Resonance. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **157**, 643-650. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.07.063>