

文章编号: 2095-4980(2023)09-1156-07

油气井套管电磁数据分段动态自适应降噪方法

徐 菲^{1,2}, 刘晓敏¹, 黄 华¹, 侯迪波³, 黄平捷^{3*}

(1. 中国石化 中原油田分公司, 河南 濮阳 457001; 2. 长江大学 地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉 430100;
3. 浙江大学 控制科学与工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 针对脉冲涡流技术在油气井套管检测过程中易受到环境影响而产生的噪声干扰问题, 提出一种油气井套管电磁检测数据分段动态自适应降噪方法。通过对比分析仿真信号、实验井检测信号与实测井检测信号的差异, 结合实际检测过程中的噪声来源分析, 建立了基于偏心-抖动-温度影响因素的检测信号补偿模型。基于该补偿模型训练得到油气井套管电磁检测数据分段动态自适应降噪模型。测井数据消噪实验结果表明, 所研究方法与常用的降噪方法相比能更好地抑制实际检测过程中偏心、抖动及温度因素带来的噪声影响, 具有应用和借鉴价值。

关键词: 无损检测; 油田套管; 电涡流; 降噪

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021086

Segmented dynamic adaptive noise reduction method for eddy current detection data of oil and gas well casing

XU Fei^{1,2}, LIU Xiaomin¹, HUANG Hua¹, HOU Dibo³, HUANG Pingjie^{3*}

(1. Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang Henan 457001, China;
2. College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan Hubei 430100, China;
3. College of Control Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: In view of the problem of noise interference caused by environmental influence in the process of oil and gas well casing detection, a phased dynamic adaptive noise cancellation method of electromagnetic data of oil and gas well casing is proposed. By comparing the differences among the simulation signal, the detection signal of experimental well and the detection signal of actual well, and combining with the analysis of the noise source in the actual detection process, a detected signal compensation model based on the influence factors of eccentricity jitter temperature is established. Based on the compensation model, a segmented dynamic adaptive noise reduction model of casing electromagnetic testing data is trained. The experimental results show that the method can better reduce the noise information in the logging, which has certain application value.

Keywords: non-destructive testing; oil field casing; eddy current; noise reduction

在高含硫气田开发过程中, 易受气田高酸高压、地质构造复杂等因素的影响, 套管结构普遍存在变形缺陷。以气井所穿过的盐膏岩层为例, 盐膏岩层塑性强、易流动、致密。在盐膏岩的蠕动、积压下, 气井生产套管持续变形, 部分气井甚至出现套管挤压油管现象。准确监测井下套管结构状态, 评价井筒完整性, 对于保证气井安全受控、高产稳产具有重大意义^[1]。无损检测方法已成为产品质量监测, 设备运行安全排查的重要技术手段, 在油气井套管缺陷检测中也得到了广泛应用。目前, 国内外油气井套管缺陷检测技术主要有: 机械井径检测、超声波检测、电涡流检测等^[2]。电涡流检测是基于法拉第电磁感应定律的一种无损探伤技术, 其中脉冲涡流检测则是由激励线圈产生具有一定占空比方波的脉冲信号作为激励源, 由于其包含不同频率的谐波, 对不同深度的缺陷有着较强的检测能力^[3]。

脉冲涡流检测方法具有无需饱和磁化, 检测过程简易便捷, 适用范围广的优势, 目前得到了越来越广泛的

收稿日期: 2021-03-02; 修回日期: 2021-07-24

基金项目: 中国石化“十条龙”科技攻关资助项目(320093-001)

*通信作者: 黄平捷 email: huangpingjie@zju.edu.cn

检测应用。然而，通常能够体现被测物体结构属性的脉冲涡流响应信号能量级别较低，在实际的检测过程中，检测系统易受到来自自身和环境的各类噪声干扰，从而给基于脉冲涡流响应信号分析的缺陷检测方法带来一定难度。为此，诸多学者从信号分析的角度对如何抑制干扰、去除噪声展开研究。例如：Tian 等人提出了一种基于信号差分的提离抑制方法，在对时域信号归一化处理后，采用与无缺陷状态的检测信号作差得到的差分信号进行分析，可以有效抑制提离干扰的影响^[4]。王等人提出采用自适应相干积累方法来提高瞬变电磁探测系统接收信号的信噪比^[5]。Huang 等人在多层金属搭接结构的缺陷检测研究中采用基于小波变换的信号去噪方法抑制检测过程中的系统固有噪声，提升信号信噪比^[6]；杨等人在油气金属管柱的缺陷检测过程中，基于分段最小二乘的消噪方法抑制检测过程中的基线漂移问题，并通过实验验证了该消噪方法的有效性^[7]。

目前研究中，基于脉冲涡流响应信号的消噪方法研究取得了一定进展，然而，对于气井套管的脉冲涡流检测信号，由于其检测环境苛刻，噪声来源复杂，常规的消噪方法难以有效提升信号信噪比。在研究工作中，某气田的气井采用脉冲涡流检测方法获取了大量检测数据，为套管结构的状态检测打下了较好基础。其采集的脉冲涡流信号中包含大量噪声信息，如不进行有效去噪，将难以解析套管结构信息，为后续基于脉冲涡流的信号分析研究带来一定困难。因此，本文提出一种油气井套管电磁数据的分段动态自适应降噪方法，该方法以正演仿真的电磁响应信号作为参考信号，与实验井无缺陷套管的测试数据进行比较并建模分析二者信号差异。通过采集实测井无缺陷段数据，并对比实验井检测信号差异，分析其噪声来源，对每一种来源的噪声采用相应模型进行降噪处理。

1 探测原理

1.1 检测原理介绍

脉冲涡流检测是基于麦克斯韦电磁场理论的一种非接触式无损检测方法(如图 1 所示)，适用于各类导电结构的缺陷检测问题。脉冲涡流检测通过激发恒定周期、幅值、占空比的方波信号使得激励线圈中产生瞬变电流，进而在空间中激发出一个变化的磁场 B_1 (称为一次场)，受到一次场的影响，被测物体感应出瞬变的漩涡状电流(称为涡流)，这种现象被称为涡流效应^[8]。涡流本身也会在被测物体中产生一个瞬变的感应磁场 B_2 (称为二次场)。在空间中，一次场与二次场会相互叠加，根据法拉第电磁感应定律，若被测物体为铁磁材料，则产生的二次场与一次场方向相同，磁场强度加强；若被测物体为非铁磁材料，二次场与一次场方向相反，磁场强度减弱。

当被测物体存在结构缺陷时，空间磁场的分布与强度变化使得检测信号发生改变。因此，在套管的脉冲涡流检测问题中，通过提取脉冲涡流检测信号的变化特征可以获取套管结构的结构状态信息，进而实现缺陷的定性定量判别^[7]。

1.2 检测工具介绍

某气田具有超深、高压、高含硫等特点，因此施工中使用的设备必须满足测井作业各项技术参数和防硫化氢安全要求。本文的检测仪器为电磁探伤测井仪，该探测仪器探头结构如图 2 所示，主要由脉冲涡流探头、辅助结构、扶正器及相关电子采集模块等组成。实际套管结构如图 3 所示。

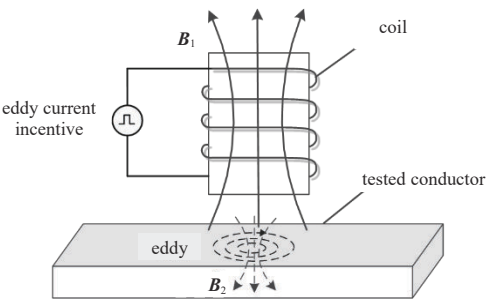


Fig.1 Principle of pulsed eddy current detection
图 1 脉冲涡流检测原理示意图

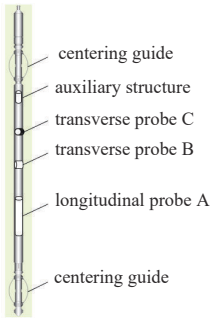


Fig.2 Structure of oilfield underground detection instrument
图 2 测井仪器结构示意图



Fig.3 Actual structure of oil casing
图 3 实际套管结构示意图

1.3 噪声来源分析及降噪补偿模型

为了消除检测过程中可能出现的多种来源的系统噪声,本文拟采用分段建模方式构建降噪补偿模型,具体过程如下:首先在Comsol仿真软件中建立无缺陷油+套管模型,基于数值仿真信号构建基准信号;对比仿真信号与无缺陷实验井检测数据以及无缺陷实测井检测数据,依照实际探测过程中可能出现的偏心、抖动和温度等噪声影响,建立补偿模型消除噪声。

1.3.1 仿真信号和无缺陷实验井检测数据分析

以无缺陷油+套管柱模型的电磁响应信号作为基准参考信号,同时提取实验井无缺陷段的检测数据进行比较,探究二者差异。为方便比较,首先对两者信号进行预处理,再基于数据驱动的方法对两者的差异性进行建模分析。

将正向仿真数据与无缺陷实验井信号进行对比,结果如图4所示。仿真信号包含300个时间采样点(0~0.2 ms),实验井检测信号为11个样本采样点(0.015~0.090 ms),未经去增益后的正向仿真信号与实验井信号相差较大,去增益后的检测信号在半对数轴中呈现出相同的变化趋势,在数值上也较为接近。

由图4可知,正向仿真信号与实验井检测信号存在一定的线性偏差。计算正向仿真信号和每个深度的无缺陷实验井测量信号的Pearson线性相关系数,其平均值为0.71,因此构建线性模型拟合正向仿真信号与无缺陷实验井测量信号的信号差异,定义输入数据 $\mathbf{x}$ 为无缺陷实验井测量信号,目标数据 $\mathbf{y}$ 为正向仿真信号,模型定义如公式(1)所示:

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}^T \mathbf{x} + \mathbf{b} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{W}$ 为权重矩阵; $\mathbf{b}$ 为偏置向量。

1.3.2 无缺陷实验井和无缺陷实测井数据分析

获取实测井无缺陷段检测数据,从中随机选取实测井数据。实验井信号与实测井信号的相对偏差汇总图如图5所示。

1.3.3 噪声来源分析

考虑到实验井信号与实测井信号间油管偏心影响,导致其存在着线性偏差,因此首先提出使用线性模型进行噪声信号分析,同时考虑到设备采集过程中会受到随机白噪声的影响,因此在线性模型中添加服从正态分布的白噪声项 $N(0, \sqrt{s})$,得到线性-噪声模型,在模型中定义输入数据 $\mathbf{x}$ 为响应时间,目标数据 $\mathbf{y}$ 为噪声信号,模型定义如式(2)所示:

$$\mathbf{y} = (\mathbf{W}^T \mathbf{x} + \mathbf{b}) + N(0, \sqrt{s}) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{W}$ 为权重矩阵; s 为服从正态分布的白噪声的方差参数。在数据集中训练116个周期后得到验证集的均方根误差为0.0367。使用模型随机预测不同深度的噪声信号并绘制图像如图6所示。

为近似机械抖动噪声,提出用 $A \sin x + b$ 正弦曲线近似机械振动噪声,从而得到振动-线性-噪声模型:

$$\mathbf{y} = (\mathbf{W}^T \mathbf{x} + \mathbf{b}_1) + N(0, \sqrt{s}) + (A \sin x + \mathbf{b}_2) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{b}_1$ 、 $\mathbf{b}_2$ 为偏置向量; A 为振动尺度。在数据集中

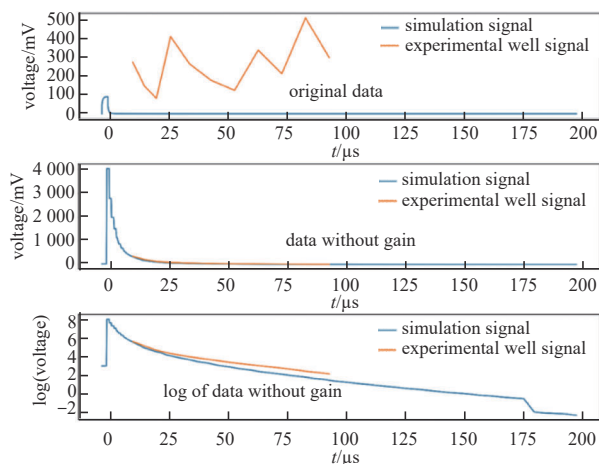


Fig.4 Comparison of simulation signal and experimental well signal
图4 仿真信号和实验井信号对比图

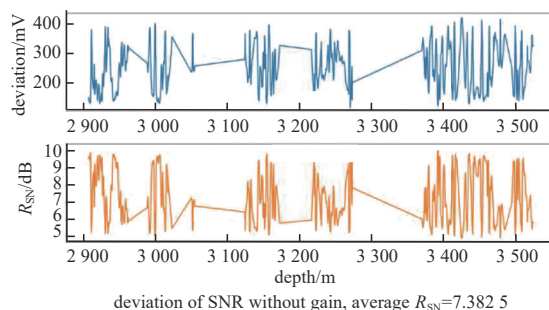


Fig.5 Comparison of detection signals between experimental wells and measured wells
图5 实验井和实测井检测信号对比图

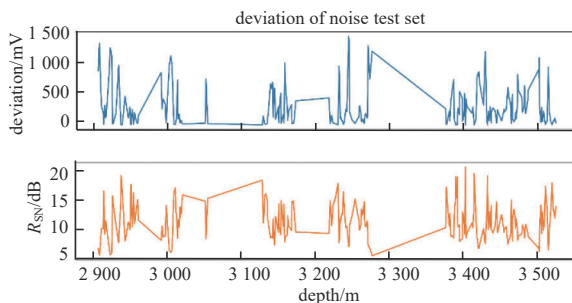


Fig.6 Effect of compensation model fitting based on eccentricity
图6 基于偏心的补偿模型拟合效果图

训练90个周期后,测试集上均方根误差达到了0.0206。使用模型随机预测不同深度的噪声信号可知,此基于正态分布的线性偏差补偿模型噪声拟合效果优于之前模型,其预测噪声与原始噪声误差汇总如图7所示,去噪后平均信噪比显著提高,拟合效果较好,平均信噪比达到11.38。

在实际数据集中发现电磁涡流信号的信号总会受到油管所处深度的影响,且呈现出总体上线性偏移的趋势,考虑是温度所带来的线性加权偏移影响,因此提出采用softmax函数计算温度所带来的线性偏移加权系数,并结合之前的振动噪声公式、线性噪声公式,定义输入数据 x 为响应时间,目标数据 y 为噪声信号,定义新的深度-振动-线性-噪声模型为:

$$y = \text{softmax}(W_1^T \text{dept} + b_1) \times \begin{bmatrix} W_2^T x + b_2 \\ A \sin x + b_3 \\ N(0, \sqrt{s}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: W_i 、 b_i 为权重矩阵与偏差向量; dept 为所处的深度。训练112个周期后得到在测试集上的均方根误差为0.0113。去噪后信噪比显著提高,拟合效果如图8所示。从数据集中随机选取深度的电压检测拟合效果如图9所示。

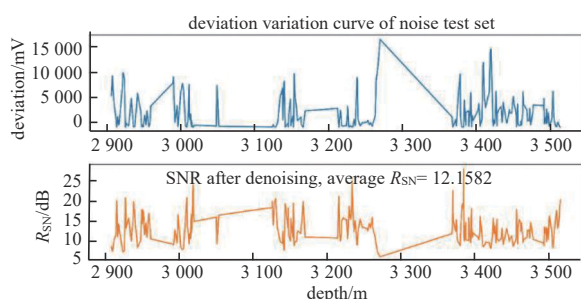


Fig.8 Effect of compensation model fitting based on eccentricity, jitter and temperature
图8 基于偏心-抖动-温度的补偿模型拟合效果图

通过构建深度-振动-线性-噪声模型,将偏心噪声、抖动噪声和温度噪声很好地表示出来。在此基础上可以针对性地采取相应的方法进行消噪处理。

2 降噪方法

前文通过分析仪器探测过程中噪声来源,建立了基于偏心-抖动-温度的补偿模型。根据此模型可以建立分段动态自适应降噪模型;将此模型与常见的降噪方法进行对比,验证该模型的效果。

2.1 滑动平均方法

滑动平均去噪就是对带有噪声的信号作平滑和滤波处理。其最大的特点是简单、易于实现,计算量小,采用递推方式处理数据,节省内存,便于实时处理非平稳数据。设采样总长度为 N ,得到的非平稳数据为序列 $\{y_k\}$,滑动平均滤波输出序列为 $\{f_k\}$,其一般计算公式为:

$$f_k = y_k = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} y_{k+i} \quad (5)$$

2.2 小波方法

小波阈值去噪的主要理论依据:在小波域内,信号的能量集中在一些较大的小波系数中,而噪声的能量却分布于整个小波域。因此,信号的小波系数幅值要大于噪声的小波系数幅值,可以采用一定的阈值将信号系数保留而将噪声系数置零或萎缩。

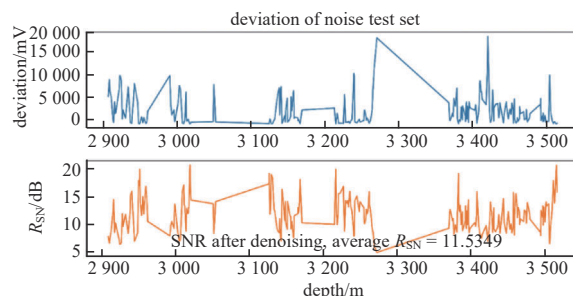


Fig.7 Effect of compensation model fitting based on eccentricity and jitter

图7 基于偏心-抖动的补偿模型拟合效果图

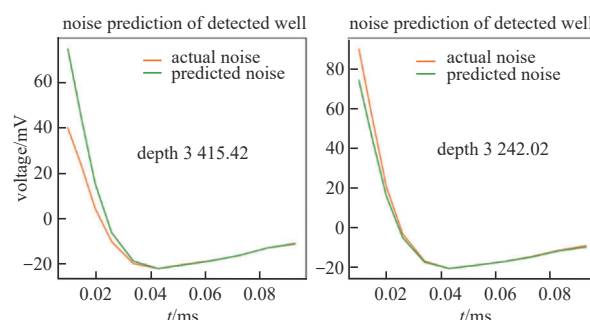


Fig.9 Effect of random depth fitting on test data
图9 随机深度的检测数据拟合效果图

小波阈值去噪的基本思路是：1) 选择一个特定的小波基，然后对含噪信号 $f(k)$ 进行小波分解计算小波变换，得到一组小波系数 $W_{j,k}$ ；2) 通过对 $W_{j,k}$ 进行阈值处理，对第 1 层到第 N 层的每一层高频系数，选择一个阈值与阈值量化处理方式进行阈值过滤，得到估计小波系数 $\hat{W}_{j,k}$ ，使得 $\|\hat{W}_{j,k} - u_{j,k}\|$ 尽可能小(其中 $u_{j,k}$ 为实际信号小波系数)；3) 利用 $\hat{W}_{j,k}$ 进行小波重构，得到估计信号 $\hat{f}(k)$ ，即为去噪之后的信号。

2.3 滑动中值方法

滑动中值降噪模型是一种常用的非线性平滑滤波方法，它是一种邻域运算，类似于卷积的加权求和计算，把邻域中的信号按值进行排序，然后选择该组的中间值作为输出值。其定义为：

$$S(n) = \text{Med}[f(m), \dots, f(m+w)]_{m=0}^{m=N} \quad (6)$$

式中： $S(n)$ 为滤波后信号； Med 为求中间值； N 为信号总长度； w 为窗长度，为了计算中位值，其窗长度必须为奇数。

2.4 分段动态自适应方法

本文提出的分段动态自适应降噪模型，对实测井双管数据进行去噪处理，输入实测井双管电压数据至模型中，模型输出噪声信号，将原始实测井双管电压信号减去模型所输出的噪声信号，从而达到去噪的效果。

结合之前的补偿模型，定义输入数据 x 为时间，目标数据 y 为噪声信号，其公式如下：

$$y = \text{softmax}(W_1^T \text{dept} + b_1) \times \begin{bmatrix} W_1^T x + b_2 \\ A \sin x + b_3 \\ N(0, \sqrt{s}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： W_i, b_i 为权重矩阵与偏差值。在建立模型的过程中，将实测井信号的深度以及采样时间作为输入样本 x_k ，将该深度下实测井信号减去纯净信号的噪声作为标签 y_k ，以模型的输出 $\hat{y}_k$ 与标签 y_k 的均方误差作为损失：

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\hat{y}_k - y_k)^2 \quad (8)$$

利用所得到的误差，根据梯度下降 (gradient descent) 策略对模型中的参数进行优化，其具体流程如图 10 所示。

最终得到最优模型后，使用模型将实测井信号深度以及采样点时间输入模型，输出噪声信号，将实测井信号与模型输出噪声信号相减获得去噪后信号。

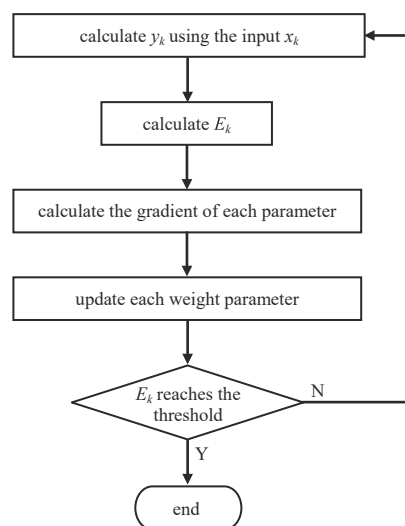


Fig.10 Flow of noise reduction training model
图 10 降噪模型训练流程图

3 实验结果分析

将以上去噪算法在实测井双管数据运行中的最优结果汇总，如表 1 所示。

表 1 降噪模型效果汇总

Table 1 Effects summary of noise reduction model

model name	key parameters	average SNR after denoising
sliding average denoising model	window size: 3	4.209 3
sliding median denoising model	window size: 3	5.223 9
	wavelet type: sym11	
wavelet denoising model	threshold method: minimaxi	7.517 0
	threshold function: greater	
piecewise dynamic adaptive denoising model	learning rate 0.0001, cycle 50	12.160 0

由表 1 的降噪结果可知：滑动平均降噪模型去噪后的平均信噪比最低为 4.209 3；滑动中值降噪模型去噪后的平均信噪比为 5.223 9；小波降噪去噪后的平均信噪比为 7.517 0；而本文提出的分段动态自适应降噪模型去噪后的信噪比最高为 12.16。

实验结果分析见图 11 到图 14。

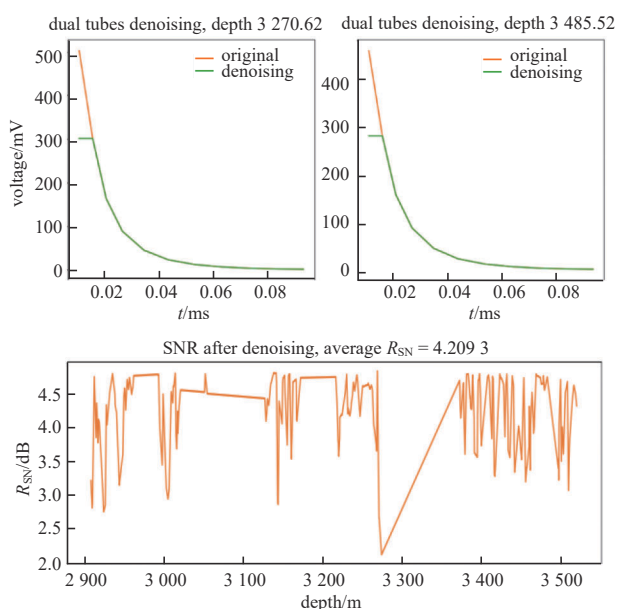


Fig.11 Best results of noise reduction using a sliding average denoising model

图 11 滑动平均去噪模型最优结果图

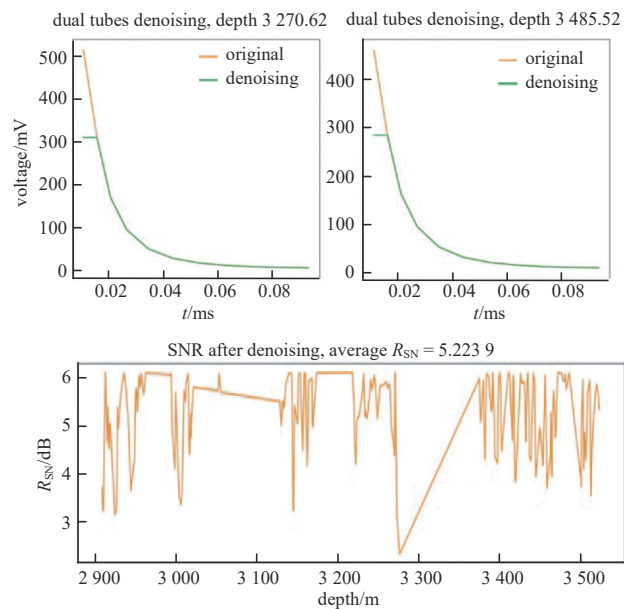


Fig.12 Best results of noise reduction using a sliding median denoising model

图 12 滑动中值去噪模型最优结果图

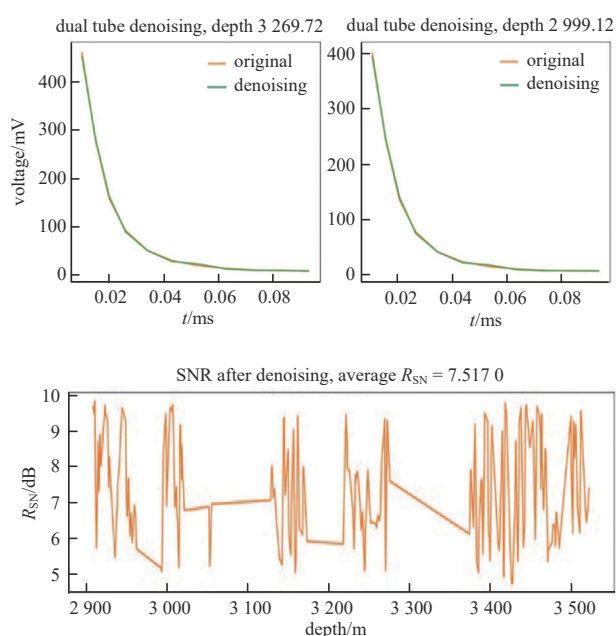


Fig.13 Best results of noise reduction using wavelet denoising model

图 13 小波去噪模型最优结果图

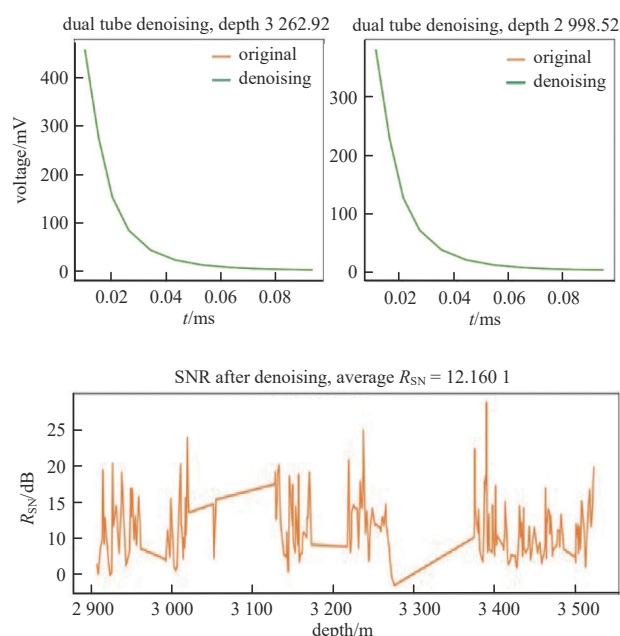


Fig.14 Best results of noise reduction using a piecewise dynamic adaptive denoising model

图 14 分段动态自适应去噪模型最优结果图

4 结论

本文提出一种油气井套管电磁数据的分段动态自适应降噪方法。首先,根据仿真信号拟合分析实验井检测信号;对比实验井信号和实测井信号并分析噪声来源。其次,依次分析油管偏心、抖动以及温度在电磁检测中产生的噪声,建立噪声数据拟合模型,并根据该拟合模型建立自适应降噪模型。最后通过实验对比了常用的降噪模型与本文的自适应模型在实测井涡流检测数据中的信号降噪效果。

实验结果表明滑动平均降噪、滑动中值降噪模型针对电磁检测瞬态信号的噪声去除能力较弱;小波降噪模型具有一定的降噪效果,但效果较不明显;本文提出的分段动态自适应降噪模型更有效应用于电磁检测瞬态信号的信号去噪,显著提高信噪比。

参考文献:

- [1] 周焯勇,刘半藤,徐菲,等. 基于AIC-RBF的油气管柱挤压形变估计方法[J]. 油气储运, 2021,40(1):44-50. (ZHOU Xuanyong, LIU Banteng, XU Fei, et al. A method for estimating extrusion deformation of oil and gas pipe string based on AIC-RBF[J]. Gas Storage and Transportation, 2021,40(1):44-50.)
- [2] 黄锟,张炎,刘爽,等. 浅议连续油管无损检测技术及其应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020,40(17):52-53. (HUANG Kun, ZHANG Yan, LIU Shuang, et al. A brief discussion on coiled tubing nondestructive testing technology and its application[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2020,40(17):52-53.)
- [3] 刘宝玲. 面向钢轨踏面及近踏面伤损检测的脉冲涡流检测方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016. (LIU Baoling. Research on pulse eddy current testing method for rail tread and near tread damage detection[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2016.)
- [4] TIAN G Y, SOPHIAN A. Reduction of lift-off effects for pulsed eddy current NDT[J]. NDT & E International, 2005, 38(4): 319-324.
- [5] 王宇. 瞬变电磁法多层管柱损伤自动识别技术研究[D]. 西安:西安石油大学, 2019. (WANG Yu. Research on automatic identification technology of multilayer pipe string damage by transient electromagnetic method[D]. Xi'an, China: Xi'an Shiyou University, 2019.)
- [6] HUANG P, DING T, LUO Q, et al. Defect localization and quantitative identification in multi-layer conductive structures based on projection pursuit algorithm[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2018,34(1):1-17.
- [7] 杨昭鹤. 面向多层管柱结构的脉冲涡流检测有限元分析和缺陷判别方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2019. (YANG Zhaohe. Research on finite element analysis and defect discrimination method of pulsed eddy current testing for multilayer tubular string structure[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2019.)
- [8] 张武波. 常规/远场复合式涡流检测方法 with 检测可靠性分析技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014. (ZHANG Wubo. Research on conventional/far-field combined eddy current testing method and testing reliability analysis technology[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2014.)

作者简介:

徐 菲(1987-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事生产测井技术研究工作 .email:zoreraul@126.com.

黄 华(1969-), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事生产测井技术研究工作.

黄平捷(1974-), 男, 博士, 教授, 主要从事自动化控制技术研究工作.

刘晓敏(1971-), 女, 学士, 教授级高工, 主要从事测井技术研究工作.

侯迪波(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事自动化控制技术研究工作.