

非侵入式流量检测中流致振动信号滤波方法*

梁 磊, 瞿 博, 童晓玲, 戴 澍, 曹田明轩

(武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心 武汉, 430070)

摘要 针对非侵入式井下流量检测中,分布式光纤声波传感系统(distributed acoustic sensor,简称DAS)采集流致振动(flow-induced vibration,简称FIV)信号时易受噪声及干扰信号影响,导致流量检测精度较低的问题,提出一种基于小波阈值的FIV信号滤波方法。首先,通过分析各层小波系数的标准差(standard deviation,简称STD),确定小波分解层数;其次,利用平均流量与信号STD之间的二次关系,剔除各层小波系数中的干扰分量对FIV信号的影响;最后,引入功率谱熵对各层小波阈值变换函数进行修正,实现改进的小波阈值降噪。采用拟合系数 R^2 及流量检测平均误差作为滤波效果的评价指标。实验结果表明,与传统小波阈值降噪方法相比,所提出方法使滤波后FIV信号的 R^2 提升了3.19%,流量平均检测误差减小了4.86%。该方法能有效地从DAS信号中提取FIV信号,其有效性在井下流量检测中得到了进一步验证。

关键词 流致振动;小波阈值降噪;噪声方差估计;非侵入式流量检测;自适应滤波

中图分类号 TP274;TH74

0 引言

石油井下环境复杂,传统流量计多为侵入式单点测量,其精度和可靠性易受到局部流体扰动影响,在长期检测中存在可靠性低、耐高温高压性差及维护成本高等问题^[1-2]。光纤分布式声波传感技术作为一种新兴的非侵入式流量检测技术,不仅能够实现分布式测量,还可避免对管道的损坏,同时具备抗电磁干扰、高可靠性、低成本、长距离及实时测量等优势^[3-4]。Pittard等^[5]对管内流致振动效应与流量关系进行研究,发现管道平均流量与管壁振动标准差呈二次关系。基于FIV的非侵入管道流量测量与DAS结合方案的可行性日益受到关注。

目前,流体变化引起的微小振动信号易被噪声与干扰淹没,降低了DAS反演流量的准确性^[6],特别在低流量情况下,DAS测量的相位波动幅度与噪声差别较小,低流量特征容易被噪声淹没。刘小会等^[6]研究发现,流量与标准差的二次拟合误差较大点都集中在低流量区域,因此需要对FIV信号进行滤波。DAS信号的常见处理方法包括频谱滤波与小波去噪^[7-8],但对FIV信号,噪声及干扰信号在时频域上与有用信号相互混叠,单一维度难以有效区分,导致有用信号在处理过程中丢失。不同环境与

管道材料下,由于同一流量信号的频率会出现偏移,难以分析FIV信号各频率与流量之间的关系,因此单一时频域滤波方法并不适用。小波阈值降噪能够结合时频域特征,可以在不同时间和频率上进行处理,但仍存在以下不足:①FIV信号复杂,传统小波降噪对信号分层不准确,重要的信号特征可能分散在多个信号分量中;②阈值函数未考虑各层分量的复杂特性,采用同一阈值函数降噪,会降低整体降噪性能;③无法有效去除FIV信号中干扰信号的影响。

笔者提出一种基于小波阈值的FIV信号滤波方法。该方法利用FIV信号标准差与平均流量的二次关系,去除叠加在FIV信号上的各层干扰分量;引入频带小波系数标准差与功率谱熵,修正阈值变换函数实现信号降噪;重构近似分量与滤波后分量,对滤波后的FIV信号进行流量检测并计算平均检测误差。实验结果与现场应用均验证了该方法的滤波性能。

1 基于小波阈值的FIV信号滤波

1.1 FIV效应的管道流量测量原理

由于管壁的限制,管道内部流体只能沿轴向流动,与管壁相互作用产生流固耦合振动,通过光纤获

* 三亚崖州湾科技城科研资助项目(SKJC-2020-01-016);中国石化重点资助项目(P21052)

收稿日期:2024-07-18;修回日期:2024-08-11

取该振动信号^[9],并由DAS解调得到相位信息。图1为基于FIV原理传感示意图。

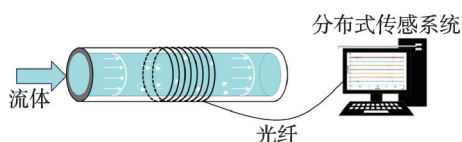


图1 基于FIV原理传感示意图

Fig.1 Sensor schematic based on FIV principle

随着流体分子撞击管壁,其一小部分动能转换为热能,大部分转换为以压力形式存在的势能,并以不规律的压力波形式释放。当液体在管道内流动发展成为湍流时,湍流漩涡的形成与脱落过程伴随流量和压力的波动,引发管壁微弱振动,即FIV现象^[10]。

当流体发展为稳定湍流后,随着FIV现象的发生,贴合在其管壁的微结构光纤会随之振动,使得其后向散射光中的相位发生改变,通过DAS对相位的恢复可以实现管内流量波动的感知。文献[5]研究了非侵入式流量计的可行性,分析在不同管道材料及不同截面面积下,流致振动信号与流量之间的关系。研究证明,在不同管道性质下,流致振动信号的标准差与流量呈现明显的二次关系,且管道性质会影响二次函数的系数。文献[11-12]分别验证了在油相和气-水双相等不同流体性质下,这种二次关系依然存在。因此,通过监测管壁振动信号,可以实现对管内平均流量的测量^[13]。

$$a_{\text{STD}} = k_1 \bar{u}^2 + k_2 \bar{u} + k_3 \quad (1)$$

$$\bar{Q} = S \bar{u} \quad (2)$$

其中: a_{STD} 为流量信号标准差; $\bar{u}$ 为平均流速; k_1 、 k_2 、 k_3 为受管道参数以及流体性质影响的系数,当管道及流体性质确定时, k_1 、 k_2 、 k_3 为常数; $\bar{Q}$ 为平均流量; S 为管道截面面积。

在实际流量检测中,信号标准差和平均流量之间的二次关系并不理想。由于DAS测得FIV信号成分复杂,除噪声外,还有叠加在FIV信号上的干扰信号,因此需要对原始信号进行处理。

1.2 改进小波阈值降噪算法

在实际应用中,DAS测得FIV信号中含有大量噪声和干扰信号,小波阈值去噪^[14]的目的就是最大限度地声音信号中的有用信号与噪声分离,保留有用信号。小波分解将信号分解为不同频率的小波基函数来分析信号的局部特征,分解的最后一层低频分量为近似分量,反映了信号的整体特征和主要成分,为有效信号;其他各层高频分量为细节分量,

反应信号的局部变化和细微波动,为含噪分量。可见,小波降噪具有较高的适应性,但FIV信号复杂,传统小波降噪效果不理想,对信号分层不准确,重要的信号特征可能分散在多个信号分量中;阈值函数设定没有考虑到各层分量复杂特性,使用同一阈值函数无法针对不同层的特性进行降噪^[15],从而降低整体降噪性能;无法有效去除FIV信号中干扰信号的影响。针对上述问题,笔者对小波阈值降噪算法进行改进。

1.2.1 分解层数选择

传统小波阈值降噪通常用交叉验证方法和经验确定分解层数,该方法人为影响较大,准确性不高且没有结合信号特性。DAS测得环境静态信号,其统计规律呈现高斯分布。理论上,高斯噪声功率谱密度为常数,高斯噪声频带越宽,则标准差越大。其关系式为

$$T = PB \quad (3)$$

其中: T 为各层细节分量标准差; P 为功率谱密度; B 为带宽。

细节分量中频带随着分解尺度的增加,依次按50%比例衰减。在实际信号中,噪声功率谱密度不是常数,细节系数中标准差衰减规律不符合50%衰减。实验发现,实际噪声标准差变换满足逐层降低的规律。低层小波细节系数中噪声信号标准差会随着分解层数的增加变得越来越少,但随着细节系数中开始包含有效信号能量^[16],细节系数标准差会增大,标准差增大的层数点即为小波分解达到最佳尺度的标志点。

1.2.2 自适应阈值函数

阈值函数变换是将小波系数与给定阈值进行比较。如果小波系数小于阈值,则系数置为0;如果小波系数大于该阈值,则应保留或修改。常用阈值函数包含软阈值函数和硬阈值函数。

软阈值函数为

$$\bar{W}_{J,K}^1 = \begin{cases} \text{sgn}(W_{J,K})(|W_{J,K}| - \lambda) & (|W_{J,K}| \geq \lambda) \\ 0 & (|W_{J,K}| \leq \lambda) \end{cases} \quad (4)$$

硬阈值函数为

$$\bar{W}_{J,K}^2 = \begin{cases} W_{J,K} & (|W_{J,K}| \geq \lambda) \\ 0 & (|W_{J,K}| \leq \lambda) \end{cases} \quad (5)$$

其中: $W_{J,K}$ 为原始信号的小波系数; $\bar{W}_{J,K}^1$ 、 $\bar{W}_{J,K}^2$ 为经过阈值函数变换的小波系数; λ 为设置的阈值; $\text{sgn}(\cdot)$ 为阶跃函数; J 为分解层数, $J=1,2,\dots,j$; j 为

最大分解层数; K 为小波系数的长度, $K=1, 2, \dots, n_j; n_j = N/2^{(j-1)}$; N 为信号长度。

实际小波系数和软阈值处理后小波系数始终存在恒定的偏差,这会降低重建信号的质量。硬阈值函数会将小于阈值的小波系数置为0,从而导致信号中小幅度信号被完全消除,在信号重建过程中出现振荡,进一步产生伪吉布斯现象。陆俊杰等^[17]引入调节因子来满足函数连续性和消除偏差,但未考虑实际小波阈值在降噪中,噪声系数会随着分解层数的变化而改变,这使得所有层使用同样的阈值函数会导致信号降噪效果并不理想。

为克服上述缺点,笔者提出一种随各层细节分量变化的新阈值函数,即

$$\bar{W}_{J,K}^3 = \begin{cases} uW_{J,K} + (1-u)\operatorname{sgn}(W_{J,K})(|W_{J,K}| - \lambda) & (|W_{J,K}| \geq \lambda) \\ 0 & (|W_{J,K}| \leq \lambda) \end{cases} \quad (6)$$

其中: $u = 1 - e^{-\frac{-(|W_{J,K}| - \lambda)^2}{\alpha}}$; α 表示调节函数向渐近线逼近程度,取值范围为 $[0, \infty]$ 。当 $\alpha=0$ 时,改进阈值函数为硬阈值函数;当 α 为 ∞ 时,改进阈值函数为软阈值函数。

同时,验证改进函数连续性及渐进性,对函数进行理论分析。

1) 连续性

当 $W_{J,K} \rightarrow \lambda^+$ 时,有

$$\begin{aligned} \lim_{W_{J,K} \rightarrow \lambda^+} \bar{W}_{J,K}^3 &= \lim_{W_{J,K} \rightarrow \lambda^+} [uW_{J,K} + (1-u)(W_{J,K} - \lambda)] = \\ \lim_{W_{J,K} \rightarrow \lambda^+} (W_{J,K} - \lambda + u\lambda) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

当 $W_{J,K} \rightarrow -\lambda^-$ 时,有

$$\begin{aligned} \lim_{W_{J,K} \rightarrow -\lambda^-} \bar{W}_{J,K}^3 &= \lim_{W_{J,K} \rightarrow -\lambda^-} [uW_{J,K} + (1-u)(-1)(-W_{J,K} - \lambda)] = \\ \lim_{W_{J,K} \rightarrow -\lambda^-} (W_{J,K} + \lambda - u\lambda) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

函数在 $W_{J,K} = \pm\lambda$ 处连续,克服了硬阈值函数在阈值处不连续而易出现信号振荡的问题。

2) 渐近性

当 $W_{J,K} \rightarrow \infty$ 时,有

$$\begin{aligned} \lim_{W_{J,K} \rightarrow \infty} \frac{\bar{W}_{J,K}^3}{W_{J,K}} &= \lim_{W_{J,K} \rightarrow \infty} \frac{[uW_{J,K} + (1-u)(W_{J,K} - \lambda)]}{W_{J,K}} = \\ \lim_{W_{J,K} \rightarrow \infty} \frac{(W_{J,K} - \lambda + u\lambda)}{W_{J,K}} &= 1 \end{aligned} \quad (9)$$

当 $W_{J,K} \rightarrow -\infty$ 时,有

$$\begin{aligned} \lim_{W_{J,K} \rightarrow -\infty} \frac{\bar{W}_{J,K}^3}{W_{J,K}} &= \lim_{W_{J,K} \rightarrow -\infty} \frac{[uW_{J,K} + (1-u)(-1)(-W_{J,K} - \lambda)]}{W_{J,K}} = \\ \lim_{W_{J,K} \rightarrow -\infty} \frac{(W_{J,K} + \lambda - u\lambda)}{W_{J,K}} &= 1 \end{aligned} \quad (10)$$

阈值函数渐近线为 $\bar{W}_{J,K}^3 = W_{J,K}$, 表明随着 $\bar{W}_{J,K}^3$ 的增大,函数的偏差将会趋近于0。

由小波阈值去噪原理可知,当信号噪声较大时,硬阈值函数对信号进行处理时易出现对噪声信号滤除不彻底的问题;当信号噪声较小时,软阈值函数虽然对噪声去除彻底,但也会滤除大量有用信号,破坏原始信号的有效特征,导致去噪后重构信号失真。信号功率谱熵^[18]与信号混乱程度相关,信号混乱度大,功率谱熵值大;信号混乱度小,功率谱熵值小。因此,使用功率谱熵值确定 α , 计算式为

$$\alpha = \sum_{i=1}^m p_i \log p_i \quad (11)$$

其中: p_i 为每层细节分量下的小波系数统计概率; m 为细节分量长度。

α 为1时,改进函数和软硬阈值对比如图2所示。

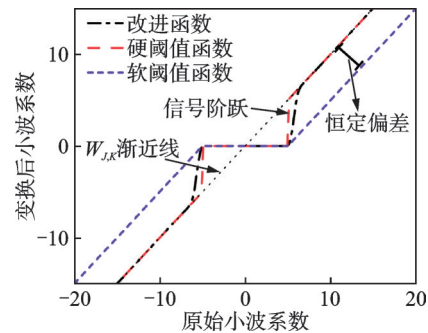


图2 改进函数和软硬阈值对比

Fig.2 Comparison among improved function hard-threshold and soft-threshold

改进阈值函数可以通过功率谱熵自适应调节 α , 更便捷地控制阈值函数。在去除噪声的情况下,消除阈值函数的不连续性,避免了伪吉布斯现象的发生,并减小由于小波分解重构对信号压缩带来的偏差。

1.2.3 阈值估计

阈值常用的选择方法主要包括固定阈值、无偏似然估计阈值、极大极小阈值和启发式阈值^[19]。上述方法中只有固定阈值方法依据噪声方差计算阈值,且常见固定阈值方法难以很好地适应不同尺度下的信号特点,可能无法有效处理不同频率的噪

声。考虑到信号小波域统计特性,文献[20]提出基于分解层数的阈值计算式,即

$$T=\sigma\sqrt{2\ln N}/J$$

(12)

其中: $\sigma=c/0.6745$,为每层细节系数估计标准差; c 为各层高频子带系数的中值。

可见,式(12)计算的阈值考虑到每层对其做出的贡献,能够更好地反应信号特征。

1.3 干扰信号处理

DAS 信号除包含 FIV 有效信号与环境噪声外,还存在多种干扰信号,会严重干扰有效信号的提取。笔者依据 FIV 信号与平均流量的二次函数关系,以拟合系数 R^2 作为量化评价指标,逐层计算细节分量的 R^2 并据此滤除干扰。可依据文献[21]中 R^2 的取值范围,判别变量间的拟合优劣。拟合系数与强度关系如表 1 所示。

表 1 拟合系数与强度关系

Tab.1 Relationship between coefficient and strength	
R^2 取值范围	相关强度
0.7~1.0	强
0.5~0.7	中等
0~0.5	弱

由于各层细节分量易受噪声干扰,笔者规定若某一层分量的 R^2 小于 0.25,则视作该分量不具备二次函数关联特征,直接将其剔除。

2 实验分析

2.1 实验平台搭建

笔者搭建管道回路实验系统对改进算法的滤波效果进行验证。实验管道回路总长为 18 m,测量管道长度为 7 m,管道采用 GB/T 19830 规定油管,管道内径为 62 mm,壁厚为 17.6 mm,DAS 空间分辨率为 1.25 m,信号采样频率为 20 kHz,电磁流量计误差为 1%。

实验操作流程如下:开启管路阀门,将传感光纤接入 DAS,液压泵初始运行频率为 10 Hz;将液体从液罐中抽出,待流动稳定后使用电磁流量计记录流量作为基准流量,并采用 DAS 连续采集 10 s 原始信号,液压泵频率以 1 Hz 为步长逐级上调,直至液压泵频率达到 30 Hz,完成采集流量从 64.7~191.2 L/min 范围内的 DAS 数据采集。图 3 为实验装置图。

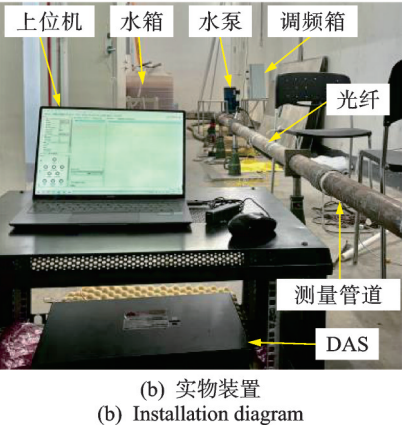
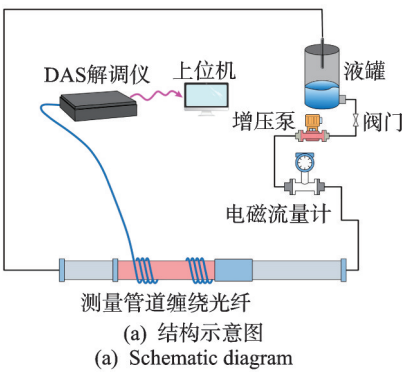


Fig.3 Figures of experiment installing

2.2 实验结果与分析

根据改进滤波方法对信号进行降噪处理与特征检测,步骤如下:①设定改进小波阈值降噪的相关参数;②基于 FIV 完成信号降噪,并剔除非理想小波细节分量;③基于处理后信号开展流量反演检测。图 4 为改进小波阈值滤波图。

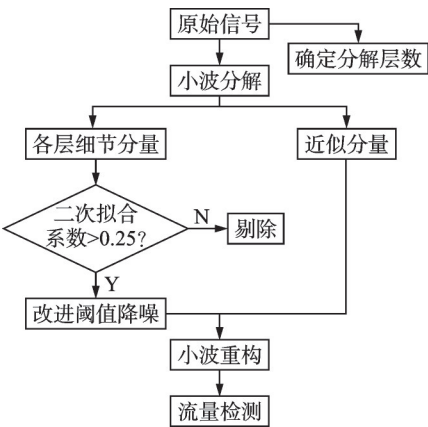


图 4 改进小波阈值滤波图
Fig.4 Improved wavelet threshold noise filtering diagram

2.2.1 选取小波阈值降噪相关参数

1) 确定分解层数
信号时域图与统计概率分布如图 5 所示。在管

路无流体、液压泵空载工况下,DAS采集信号的统计分布符合高斯分布规律。图5(a)为多通道DAS信号取均值后得到的单通道时域波形;图5(b)为该时域信号对应的统计概率分布。

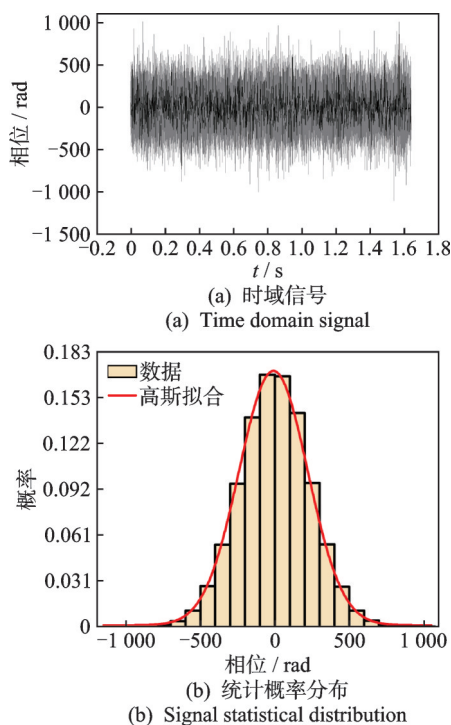


图5 时域图与统计概率分布

Fig.5 Time domain diagram and density distribution

基于信号统计特征,对FIV信号与理论高斯噪声进行7层小波分解,实验信号细节系数标准差变化如图6所示。

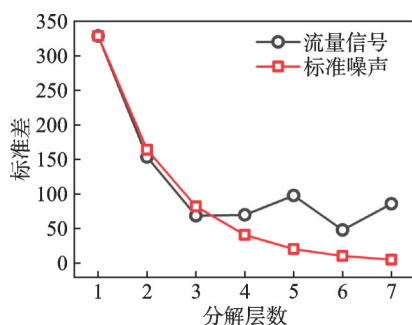


图6 实验信号细节系数标准差变化

Fig.6 Threshold function comparison

由图6可知,当小波分解到第3层时,细节系数能量并没有呈现减小趋势,反而开始增大,说明从第4层开始包含有效特征信号。因此,笔者将小波分解层数设定为3层。为验证选取层数的合理性,设置2层、3层、4层3种小波分解方案,采用笔者提出的改进阈值函数与阈值估计算法完成降噪处理,并

对比不同层数下信号与流量的二次拟合结果。不同分解层数对应的降噪效果如图7所示。

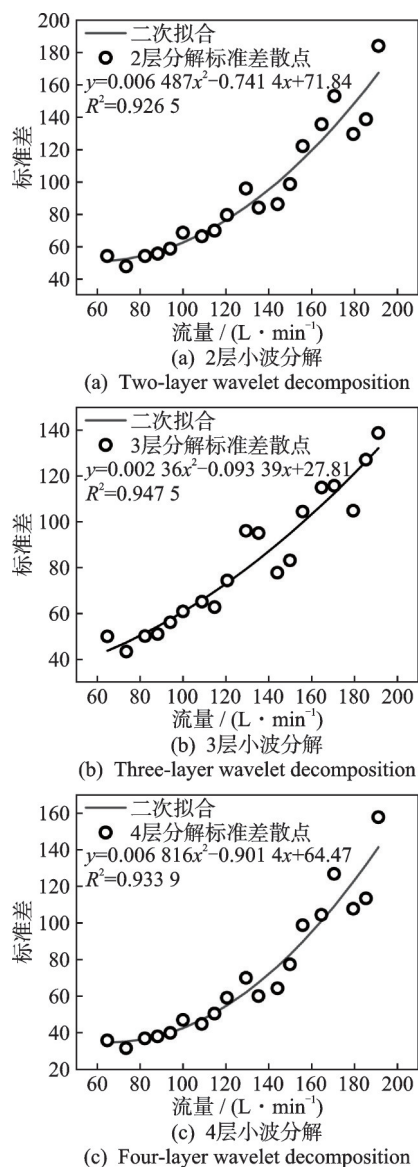


图7 不同分解层数对应的降噪效果

Fig.7 Effect of different decomposition layers on denoising

由图7可知,3层小波分解的去噪效果最佳,其拟合系数为0.9475。分析表明,对信号进行2层分解时,第2层近似系数中包含噪声分量,影响二次拟合效果;对信号进行4层小波分解时,第3层细节系数中包含有效信号,在降噪过程中有效信号分量被误去除,导致拟合效果降低。

2) 选取阈值估计方法

确定小波分解层数后,对FIV信号进行小波分解,选取4种阈值估计方法的降噪效果进行对比。将各阈值估计方法的小波降噪重构信号标准差与平均流量进行二次拟合,不同阈值估计处理结果对比如表2所示。

表 2 不同阈值估计处理结果对比
Tab.2 Comparison of different threshold estimation processing results

阈值估计方法	拟合系数		
	第 1 组	第 2 组	第 3 组
无偏似然估计	0.930 3	0.905 8	0.893 9
极大极小阈值	0.926 8	0.912 5	0.892 9
启发式阈值	0.937 7	0.912 9	0.893 1
改进固定阈值	0.947 5	0.923 1	0.905 5

由表 2 可知,小波阈值降噪对各组 FIV 信号的标准差与平均流量的拟合均有优化效果,其中,改进固定阈值对 FIV 信号降噪后的拟合系数最高,达到 0.947 5。由于其他方法估计阈值较小,噪声小波系数未能被有效去除,导致拟合精度较低,因此笔者选择改进固定阈值方法进行降噪。

3) 选取阈值函数

确定阈值估计方法后,进一步验证改进阈值函数的降噪效果,将不同方法降噪后信号标准差与平均流量的拟合系数进行对比。不同阈值函数处理结果对比如表 3 所示。

表 3 不同阈值函数处理结果对比
Tab.3 Comparison of processing results of different threshold functions

组数	阈值函数	拟合系数	
		滤波前	滤波后
1	软阈值函数	0.760 7	0.908 9
	硬阈值函数	0.760 7	0.914 6
	文献[17]函数	0.760 7	0.921 5
	改进阈值函数	0.760 7	0.931 8
2	软阈值函数	0.812 3	0.921 2
	硬阈值函数	0.812 3	0.923 1
	文献[17]函数	0.812 3	0.935 2
	改进阈值函数	0.812 3	0.947 5
3	软阈值函数	0.826 4	0.910 7
	硬阈值函数	0.826 4	0.913 1
	文献[17]函数	0.826 4	0.921 1
	改进阈值函数	0.826 4	0.937 7

由表 3 可知,经各阈值函数处理后,FIV 信号标准差与流量的二次拟合系数均有所提升,噪声对信号标准差的影响得到有效抑制。其中,改进阈值函数的拟合系数最优,但此时拟合精度尚未达到理想状态,还需进一步去除干扰信号的影响。

2.2.2 改进小波阈值降噪与干扰分量剔除

选取最优方法后,对 3 层分解的 FIV 信号分别计算各流量下的近似分量与各层细节分量的信号标准差,并依次进行拟合。图 8 为信号标准差-流量关系图。

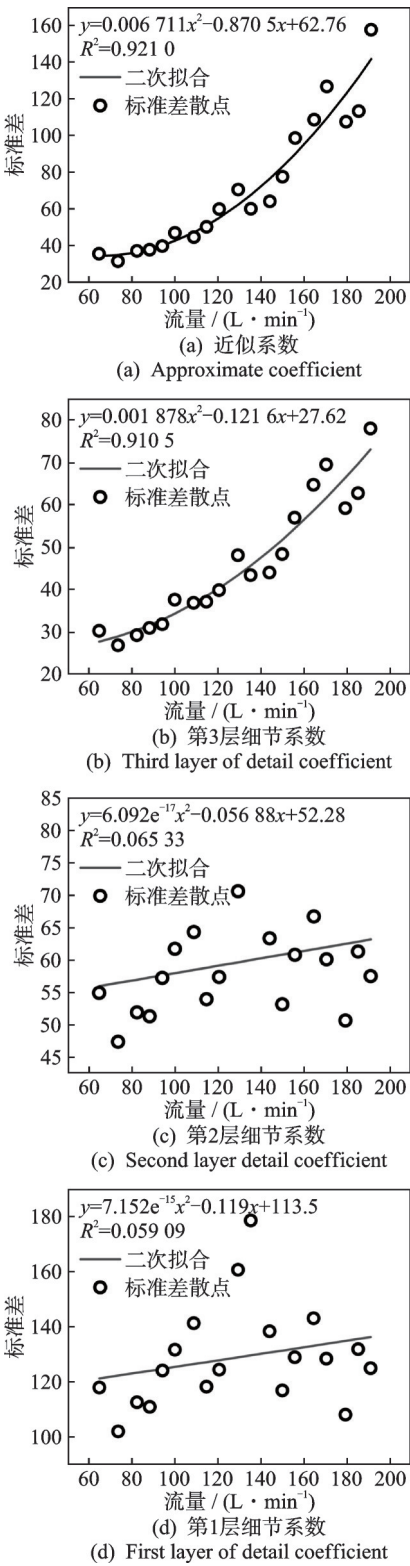


图 8 信号标准差-流量关系图

Fig.8 Relationship between signal standard deviation and flow rate

由图8可知,第3层近似分量和细节分量均具有良好的二次拟合效果,其拟合系数分别为0.921 0和0.910 5;而第2层和第1层的拟合系数分别为0.065 33和0.059 09。分析表明,第1、2层细节分量随机性大、不确定性高,随流量变化呈无规律分布,其二次项系数均小于0.25,数据点基本不呈现二次曲线趋势。因此,剔除这两类分量,仅对第3层细节分量进行改进小波阈值降噪处理。

综上,将剔除干扰信号前后的改进小波阈值降噪拟合效果进行对比,图9为滤波后标准差-流量关系图。由图9可知,剔除干扰信号后,改进小波阈值降噪的数据拟合系数最高达0.979 4,较未剔除干扰信号时提升了3.19%。这表明基于小波阈值的FIV信号滤波方法既降低了噪声对信号标准差的干扰,又削弱了干扰分量对二次拟合的影响,能够有效提升拟合系数。

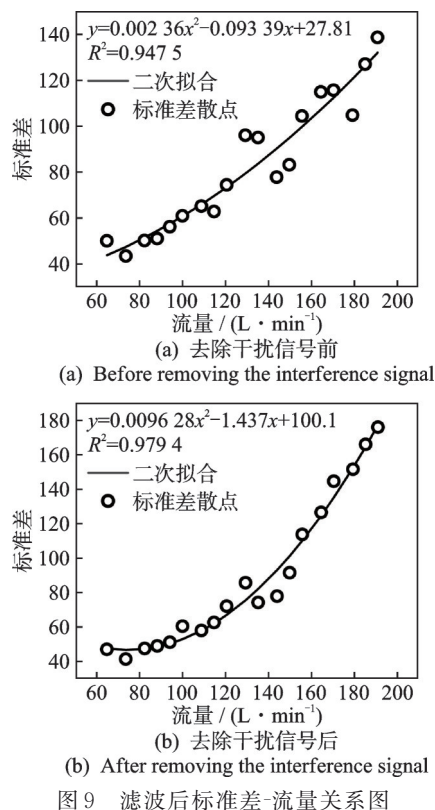


图9 滤波后标准差-流量关系图

2.2.3 流量检测

对信号标准差与平均流量进行二次拟合后,流量拟合函数为

$$a_{STD} = 0.009\,628\bar{Q}^2 - 1.437\bar{Q} + 100.1 \quad (13)$$

根据标准差与平均流量之间的二次关系,对曲线进行拟合并反演,并与基准流量进行对比。平均

检测误差的计算式为

$$\text{error} = \frac{\sum_{i=1}^M \left| \frac{V_i - U_i}{U_i} \right|}{M} \quad (14)$$

其中: M 为反演流量总数; V_i 为反演流量值; U_i 为基准流量值。

将不同方法处理后的流量平均检测误差进行对比,实验流量平均检测误差如表4所示。

表4 实验流量平均检测误差	
Tab.4 Experimental flow average detection error	%
处理方法	平均检测误差
原始信号	19.57
小波降噪	8.50
改进滤波	3.64

由表4可知,改进滤波方法的流量平均检测误差降至3.64%。相较于滤波前和未剔除干扰信号的情况,精度分别提升了15.93%和4.86%,这表明基于小波阈值的FIV信号滤波方法能够有效减小流量检测误差。

3 井下验证

采用湖北潜江石油工程技术研究院实验井平台进行井下验证,井下装置如图10所示。测量管道长度为5 m,采用GB/T 19830规定的油管,管道内径为62 mm,壁厚为17.6 mm,DAS空间分辨率为1.25 m,采集频率为20 kHz,为保障长期检测,采用紧套光纤进行测量。现场检测时,先打开阀门并将待测光纤接入DAS,待流动稳定后,电磁流量计记录流量,同时使用DAS记录10 s数据。逐次增大流量,记录流量从33.0 ~281.65 L/min范围内的DAS数据。

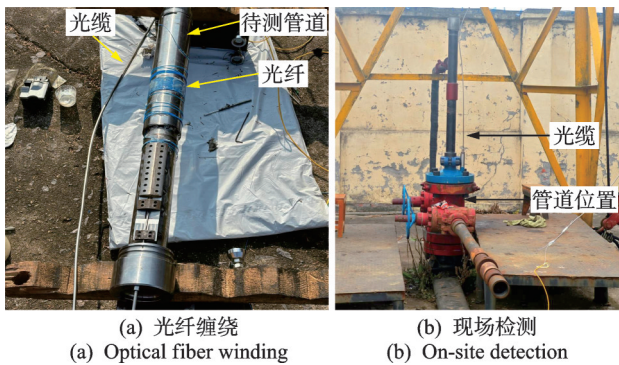


图10 井下装置

Fig.10 Downhole device diagram

随机从中选取 32 768 个采样点作为信号片段。根据标准差与平均流量的二次关系,将不同方法处理后的流量平均检测误差进行对比。井下环境流量平均检测误差如表 5 所示。

表 5 井下环境流量平均检测误差
Tab.5 Average detection error of downhole environmental flow %

处理方法	平均检测误差
原始信号	29.61
小波降噪	11.49
改进滤波	4.51

由表 5 可知,在井下环境中采用改进滤波方法处理后,流量检测平均误差为 4.51%。相较于滤波前和未去除干扰信号,精度分别提升了 25.1% 和 6.98%,验证了改进滤波算法提取井下 FIV 信号的有效性。

4 结 论

- 1) 在自适应确定信号小波分解层数方面,在无流体流动的情况下,DAS 测得信号的统计特性呈高斯分布,通过分析各层小波系数的标准差,可确定小波分解层数。
- 2) 结合功率谱熵选取各层小波阈值变换函数,对信号进行改进小波阈值降噪。
- 3) 基于 FIV 信号标准差与平均流量的二次关系,剔除叠加在 FIV 信号上的各层干扰分量,滤波得到较理想的 FIV 信号。
- 4) 对比分析各方法可知:在实验环境下,改进方法对 FIV 信号处理后的检测精度达 3.64%;在复杂井下环境中,改进方法对信号处理后的检测精度达 4.51%。结果表明,改进方法对不确定性较强的 FIV 信号滤波具有更显著的应用价值。然而,该方法仍存在一定局限性。目前,最优滤波参数的选择基于数据分析,后续工作将重点研究流体性质、管道性质等因素对流致振动参数的影响规律,建立参数选取依据,进一步提升流量检测精度。

参 考 文 献

[1] FANG J X, TAYLOR H F, CHOI H S. Fiber-optic fabry-perot flow sensor[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1998, 18(3): 209-211.
[2] HU Y C, CHEN Z Y, CHANG P Z. Fluid-structure coupling effects in a dual U-tube coriolis mass flow

meter[J]. Sensors, 2021, 21(3): 982.
[3] SHANG Y, SUN M C, WANG C, et al. Research progress in distributed acoustic sensing techniques [J]. Sensors, 2022, 22(16): 6060.
[4] HE Z Y, LIU Q W. Optical fiber distributed acoustic sensors: a review[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3671-3686.
[5] PITTARD M T, EVANS R P, MAYNES R D, et al. Experimental and numerical investigation of turbulent flow induced pipe vibration in fully developed flow [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(7): 2393-2401.
[6] 刘小会, 刘素香, 尚盈, 等. 基于管壁振动频率特性的光纤流量监测系统[J]. 光学仪器, 2015, 37(2): 103-106.
LIU Xiaohui, LIU Suxiang, SHANG Ying, et al. Study of optical fiber fluid flow monitoring system using pipe vibration frequency characteristic [J]. Optical Instruments, 2015, 37(2): 103-106.(in Chinese)
[7] SHANG Y, WANG C, ZHANG Y K, et al. Non-intrusive pipeline flow detection based on distributed fiber turbulent vibration sensing [J]. Sensors, 2022, 22(11): 4044.
[8] XU Z Q, LI C, MU L B, et al. Leakage detection method of underground heating pipeline based on improved wavelet threshold function[J]. Energy, 2024, 295: 131051.
[9] KHOT S M, KHAIRE P, NAIK A S. Experimental and simulation study of flow induced vibration through straight pipes [C] //2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE). Vashi, India: IEEE, 2017: 1-6.
[10] MA X Q, ZHOU S X. A review of flow-induced vibration energy harvesters[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115223.
[11] LI C, LIU M Y, SONG H, et al. A non-invasive measurement method of pipeline flow rate based on dual FBG sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(6): 5669-5677.
[12] BARONCINI V H V, MARTELLI C, DA SILVA M J, et al. Single-and two-phase flow characterization using optical fiber Bragg gratings [J]. Sensors, 2015, 15(3): 6549-6559.
[13] LI T D, FAN C Z, LI H, et al. Nonintrusive distributed flow rate sensing system based on flow-induced vibrations detection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-8.
[14] 师雪玮, 徐大林, 刘志成. 基于 ICEEMDAN 和小波阈值的 Φ -OTDR 信号去噪算法[J]. 指挥控制与仿真, 2024, 46(1): 78-84.

- SHI Xuewei, XU Dalin, LIU Zhicheng. Denoising algorithm for Φ -OTDR signals based on ICEEMDAN and wavelet thresholding[J]. Command Control & Simulation, 2024, 46(1): 78-84. (in Chinese)
- [15] 罗哲, 高孝帅, 谭刚, 等. 基于声信号的农业机械智能故障诊断研究[J]. 振动、测试与诊断, 2025, 45(6): 1195-1201.
- LUO Zhe, GAO Xiaoshuai, TAN Gang, et al. Research on intelligent fault diagnosis of agricultural machinery based on acoustic signals[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(6): 1195-1201. (in Chinese)
- [16] 何小宇, 张霖, 唐德东, 等. 拉曼光谱小波阈值去噪最佳分解层数自适应确定方法的研究[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(6): 61-65.
- HE Xiaoyu, ZHANG Lin, TANG Dedong, et al. Research on adaptive determination of optimal decomposition layers for wavelet threshold denoising of raman spectroscopy[J]. Automation & Instrumentation, 2023, 38(6): 61-65. (in Chinese)
- [17] 陆俊杰, 刘柱, 丁雪兴, 等. 局部特征尺度与小波阈值协同下密封摩擦面 AE 信号降噪研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(12): 205-211, 219.
- LU Junjie, LIU Zhu, DING Xuexing, et al. A study on noise reduction of AE signal of sealing friction surface under the synergy of local characteristic-scale decomposition and wavelet threshold[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(12): 205-211, 219. (in Chinese)
- [18] 杨勇, 张帅, 金涌涛, 等. 基于图谱功率谱熵和最大均值差异的 GIS 机械状态辨识方法[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(2): 149-155.
- YANG Yong, ZHANG Shuai, JIN Yongtao, et al. Mechanical state identification method of GIS based on spectral power spectral entropy and maximum mean difference[J]. Noise and Vibration Control, 2024, 44(2): 149-155. (in Chinese)
- [19] XIE B, XIONG Z Q, WANG Z J, et al. Gamma spectrum denoising method based on improved wavelet threshold[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52(8): 1771-1776.
- [20] 潘公宇, 朱瑞. 小波阈值降噪技术对 OPAX 方法的改进研究[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(3): 29-34.
- PAN Gongyu, ZHU Rui. Improvement of OPAX method based on wavelet threshold denoising technique[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(3): 29-34. (in Chinese)
- [21] 李磊, 江帅帅, 徐崇杰, 等. 基于自适应小波阈值的皮带机故障声音信号去噪算法研究[J]. 控制工程, 2025, 32(4): 699-706.
- LI Lei, JIANG Shuaishuai, XU Chongjie, et al. Research on denoising algorithm of sound signals of belt conveyor faults based on adaptive wavelet threshold[J]. Control Engineering of China, 2025, 32(4): 699-706. (in Chinese)



第一作者简介:梁磊,男,1963年3月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为新型光纤传感器、光纤智能材料与结构及信息处理。

E-mail: L30L30@126.com

通信作者简介:童晓玲,女,1979年10月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为光纤光栅传感技术在装备、工程领域中的应用。

E-mail: tongxl@whut.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价 30 元,全年 180 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332

邮发代号:28-239 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdcn.nuaa.edu.cn