

基于VMD和排列熵的海缆振动信号降噪方法

郭家兴,钱君霞,闫安心,赵盛杰

(江苏科能电力工程咨询有限公司,南京 210036)

摘要:为了有效去除信号中的噪声,提出了基于变分模态分解(VMD)和排列熵(PE)的海缆振动信号降噪方法。该方法首先使用VMD将信号分解成从高频到低频的数个本征模态函数,然后计算各模态分量的PE值定量表征其随机性程度。接着,对含噪声信息较多的本征模态函数(IMF)分量进行小波阈值降噪,并通过信号重构得到降噪后的海缆振动信号。为了验证该方法的有效性,搭建了基于布里渊光时域分析(BOTDA)的海底电缆(海缆)振动信号监测模拟实验系统,通过实验获得了冲刷、摩擦、锚碇3种工况下的海缆振动信号。实验结果表明:所提方法能有效去除海缆振动信号中的高频噪声,其冲刷、摩擦及锚碇3类信号的信噪比分别提升至30.257 8 dB、29.635 4 dB、38.786 2 dB,且标准差较低。

关键词:海底电缆;降噪;布里渊光时域分析;振动监测

中图分类号:TN911.6 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2024)02-0084-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.02.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Denoising method for submarine cable vibration signals based on VMD and permutation entropy

GUO Jiaying, QIAN Junxia, YAN Anxin, ZHAO Shengjie

(Jiangsu Keneng Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 210036 China)

Abstract: In order to effectively remove noise from the signal, a denoising method for submarine cable vibration signals based on variational mode decomposition (VMD) and permutation entropy (PE) is proposed. This method first uses VMD to decompose the signal into several intrinsic mode functions from high frequency to low frequency, and then calculates the PE values of each mode component to quantitatively characterize its degree of randomness. Next, wavelet thresholding is applied to the intrinsic mode function (IMF) components with more noisy information, and the denoised submarine cable vibration signal is obtained through signal reconstruction. In order to verify the effectiveness of this method, a simulation experimental system for monitoring the vibration signals of submarine cables based on Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA) is established. The vibration signals of submarine cables under three working conditions of erosion, friction, and anchoring are obtained through experiments. The experimental results show that the proposed method can effectively remove high-frequency noise in submarine cable vibration signals. The signal-to-noise ratios of the three types of signals, namely erosion, friction, and anchoring, are increased to 30.257 8 dB, 29.635 4 dB, and 38.786 2 dB, respectively, with a low standard deviation.

Key words: submarine cable, noise reduction, Brillouin optical time domain analysis, vibration monitoring

0 引言

随着近海风电建设和岛礁经济的发展,光纤复合

收稿日期:2023-07-21。

作者简介:郭家兴(1997—),男,河北保定人,硕士,主要研究方向为光通信与光传感、故障诊断、电力系统通信等,现就职于江苏省电力设计院科能咨询有限公司。曾参加河北省自然科学基金项目,发表论文6篇。参加了大唐杯移动设计大赛、亚太建模比赛等科技竞赛,均取得国家级别的优异成绩。



海底电缆(简称“海缆”)在海洋通信和电能传输方面的重要性不断提升^[1]。由于海缆的使用环境复杂多变,如海洋地质状况、施工环境、海洋流动、磨损和锚的撞击等因素,都会导致海缆损伤从而出现通信传输问题,影响经济发展^[2]。因此,对海缆的健康状况进行有效监测至关重要。采用布里渊光时域分析(BOTDA)监测系统收集的海缆振动信号经常会受到布里渊散射噪声的干扰,如何去除这些噪声,只保留有用的信号是一个挑战。

海缆振动信号具有明显的非线性和非平稳特性。虽然传统的傅里叶降噪技术能够在除噪的过程中发挥作用, 更适合处理平稳的周期性信号, 因此其在消减海缆振动信号噪音的效果并不尽如人意。目前, 非线性信号降噪策略主要包括小波降噪和经验模态分解(EMD)等方法^[3-6]。虽然小波降噪的降噪能力超强, 但必须选择恰当的基波函数和阈值, 而且不同的基波函数各自适应性也会有所不同。EMD 是一种经典的时频域特征分析算法, 可根据被处理信号的特性, 自适应地将信号分解到不同尺度上, 克服了小波变换高频分辨率低的不足, 且自适应性更强, 处理非线性非平稳信号的效果更好。但是, 海缆故障对应的光纤振动信号一般包含噪声和冲击成分, 而 EMD 容易受信号间断、突变等奇异点的影响, 使其对应的极值点发生较大变化, 导致计算的包络线扭曲变形, 从而出现模态混叠现象^[7]。2014 年, DRAGOMIRETSKIY K 等人^[8]提出了变分模态分解(VMD)方法, 有效地趋避模态混叠、过包络、欠包络、端点效应等问题。该方法重新定义了本征模态函数(IMF)为一个调幅-调频信号, 这相比于 EMD 的 IMF 定义具有更广泛的适应性。因此, VMD 具有出色的噪声抵抗性能, 能有效解决海缆监测 BOTDA 系统的光纤振动信号信噪比低的问题。文献[9]提出了排列熵(PE)算法检测时间信号序列随机特性和动力学变动, 其抗扰性强且计算快, 可以作为量化评估信号序列中所含随机噪声程度的指标。本文提出一种基于 VMD 和 PE 的海缆振动信号降噪方法, 有效去除信号中存在的噪声。

1 基本原理

1.1 VMD 算法原理

相较于经典的 EMD 方法, VMD 作为一种创新的时间-频率分析方法, 能够弱化在迭代过程中出现的端点影响和模态交错问题, 且能有力地应对非线性信号的处理。VMD 算法的分解过程^[10-12]如下:

步骤一: 变分问题的建立。

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} * u_k(t) \right] \times e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^K u_k = f(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, ∂_t 是中括号内函数与时间 t 相对应的偏微分, $f(t)$ 为冲刷、摩擦和锚砸振动信号, $u_k(t)$ 为 $f(t)$ 分解后得到的模态分量; K 为对所有模态部分进行的合计, 本文

$K=6$; ω_k 为与 u_k 对应的频率中心; $\delta(t)$ 为狄拉克分布; $*$ 为卷积运算。

步骤二: 拉格朗日变换。将约束变分问题转变为非约束变分问题, 利用二次惩罚项和拉格朗日乘法子的优势, 引入了增广拉格朗日函数 L 表示为

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\|_2^2 + \langle \lambda(t), f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \rangle \quad (2)$$

其中, λ 为拉格朗日乘法算子, 有助于严格保持约束条件; α 为二次惩罚参数, 有助于提高信号的重构精度, 本文 $\alpha=2000$ 。

步骤三: 交替更新。采用交替方向乘子法优化变分问题, 并在迭代优化过程中寻找扩展拉格朗日的“鞍点”, 以此找出方程式(1)的最优解。迭代方程为

$$\hat{u}_k^{n+1} = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (3)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega \left| \hat{u}_k(\omega) \right|^2 d\omega}{\int_0^\infty \left| \hat{u}_k(\omega) \right|^2 d\omega} \quad (4)$$

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \gamma \left[\hat{f}(\omega) - \sum_{k=1}^K \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right] \quad (5)$$

其中, $\hat{u}_k^{n+1}$ 表示迭代后各模态分量对应的维纳滤波函数, $\left| \hat{u}_k(\omega) \right|$ 为各模态分量对应的维纳滤波; γ 为噪声容限, n 为迭代次数; $\hat{f}(\omega)$ 、 $\hat{\lambda}(\omega)$ 分别为 $f(t)$ 、 $\lambda(t)$ 对应的频域形式; ω_k^{n+1} 为各模态分量的频率中心。本文 $\gamma=0$, $n=150$ 。

步骤四: 迭代终止。当满足条件

$$\frac{\sum_{j=1}^K \left\| u_k^{n+1}(t) - u_k^n(t) \right\|_2^2}{\left\| u_k^n(t) \right\|_2^2} < \varepsilon \text{ 时, 停止迭代。输出 } \hat{u}_k(\omega),$$

$\hat{\omega}_k(t)$ 并利用傅里叶变换得到每一个 u_k , 其中, ε 为预先设定的阈值。

1.2 PE 算法原理

2002 年, BANDT C 等人^[13]构造出了一种检查动力学突变特征和时间序列的算法, 即 PE 算法。PE 算法最大的特点是抗干扰性能很强, 可以很好地应用在非

郭家兴, 钱君霞, 闫安心, 等: 基于 VMD 和排列熵的海缆振动信号降噪方法

线性信号的处理中。具体的实现步骤如下:

$X(i)_{(i=1,2,3,\dots,N)}$ 是一维的时间序列, 序列长度定为 N , 把 $X(i)$ 的相空间进行重新构造, 可以得出重构后的信号如下:

$$\begin{cases} X(1)=(x(1), x(1+\zeta), \dots, x(1+(m-1)\zeta)) \\ X(2)=(x(2), x(2+\zeta), \dots, x(2+(m-1)\zeta)) \\ \vdots \\ X(l)=(x(l), x(l+\zeta), \dots, x(l+(m-1)\zeta)) \\ X(D)=(x(D), x(D+\zeta), \dots, x(D+(m-1)\zeta)) \end{cases} \quad (6)$$

其中, m 为时间序列嵌入的维数, ζ 为时间序列的延迟, $x(l+(m-1)\zeta)$ 为重构矩阵的第 l 行分量; D 为重构分量的个数, $D=N-(m-1)\zeta$ 。按照升序对第 l 行重构分量进行排序, 可得

$$\begin{aligned} x[i+(l_1-1)\zeta] \leq x[i+(l_2-1)\zeta] \leq \dots \leq \\ x[i+(l_m-1)\zeta] \end{aligned} \quad (7)$$

其中, l_m 为重新排列后各分量所在的索引值。获取重构分量的符号序列 $S(g)=[j_1, j_2, \dots, j_m]$, $g=1, 2, \dots, k$, $k \leq m!$ 。一维时间序列的种类共计得到 $m!$ 组。每个时间序列出现的概率可通过计算求得, 这里定义为 $h_1, h_2, \dots, h_k$ 。

可以将 $X(i)$ 的 PE 定义为

$$G_p(m) = \sum_{g=1}^k h_g \ln h_g \quad (8)$$

当 $h_g=1/m$ 时, PE 最大, 其表达式为

$$G_{p\max} = G_p(m) / \ln(m!) \quad (9)$$

PE 越大表示时间序列随机性越强; 反之, 时间序列随机性越弱。

1.3 评价指标

本文使用信噪比(SNR)和标准差(REMS)作为评定降噪效能的评估标准。将带有噪声的信号定义为 $F(n)$, 对经过降噪处理后的信号定义为 $f(n)$ ^[14]。降噪操作的优良程度越高, 其 SNR 就会相应提升, 相关定义如下:

$$S_{\text{SNR}} = 10 \lg \sum_{n=1}^N \frac{F(n)^2}{[F(n) - f(n)]^2} \quad (10)$$

信号降噪越好, REMS 就会小, 标准差定义为

$$R_{\text{REMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^N [F(n) - f(n)]^2} \quad (11)$$

通过 SNR 和 REMS 的结合, 能更好地验证去噪方法的性能。

1.4 算法流程

海缆振动信号包含有丰富的光纤内部信息, 本文提出的基于 VMD 和 PE 的海缆振动信号降噪方法将

VMD 算法和 PE 算法(VMD-PE 算法)相结合对含噪的海缆振动信号进行分解并降噪。首先, 对含大量噪音的原始海缆振动信号实施 VMD, 拆解为众多模态成分, 并同时计算出各模态成分的 PE 值。然后, 根据这些 PE 值的量级进行进一步的降噪操作, 一旦模态成分的 PE 值超越了预设的临界值, 就确定其为带噪声的成分, 并对其进行小波阈值降噪; 反之, 如果模态成分的 PE 值低于预定阈值, 则认为它是无噪声的成分, 无需进行任何处理。最后, 将无噪声的成分与已降噪的带噪成分重新融合, 以生成经过降噪处理的海缆振动信号。VMD-PE 算法流程图如图 1 所示。

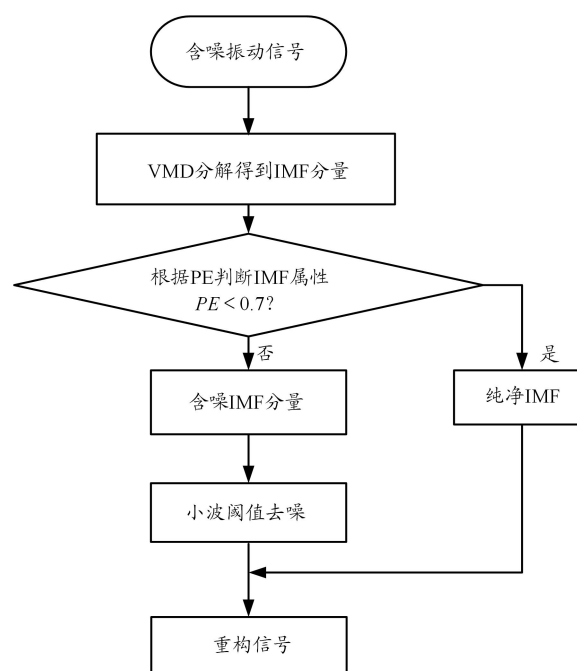


图 1 VMD-PE 算法流程图

2 信号分析

2.1 仿真信号分析

为了验证所提算法的降噪性能, 首先对仿真信号进行分析, 设置仿真信号的采样持续时间 $\partial=10$ s, 采样频率 $f=100$ Hz。构造仿真函数如式(12)所示。

$$g_1 = 0.2 \sin(0.3\pi f\partial) + 0.5 \sin(0.4\pi f\partial) + 0.4 \sin(0.2\pi f\partial) \quad (12)$$

加噪后的表达式如式(13)所示。

$$g_2 = g_1 + N \quad (13)$$

其中, $N=0.6\text{randn}(1, 1\ 000)$ 代表了由 Matlab 创建的序列长度为 1 000 的随机白噪声成分。

对含噪信号实施 VMD 后得到 5 个模态分量, 根据公式计算出各模态分量的 PE 值如表 1 所示。

本文选用 PE 值超出 0.7 的 IMF 部分进行小波阈值去噪。分别使用 EMD 降噪法、VMD 剔除法(去掉前 2 个 IMF 部分)和本文方法来处理模拟信号, 并对比其性能。经过本文方法降噪前后的对比情况如图 2 所示。可以看出, 降噪后信号和初始(降噪前)信号相似度高, 信号降噪效果较好。

表 1 VMD 后 各模态分量 PE 值	
IMF 分量	PE 值
IMF1	0.997 5
IMF2	0.953 8
IMF3	0.665 1
IMF4	0.597 8
IMF5	0.472 9

表 2 3 种降噪方法性能对比		
降噪方法	降噪后 SNR/dB	RMSE
EMD 降噪法	8.132 4	0.213 5
VMD 剔除法	11.235 1	0.182 3
本文方法	13.257 8	0.123 6

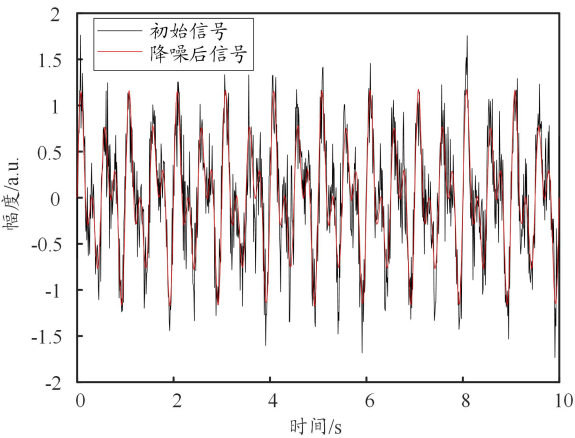


图 2 采用本文方法降噪前后信号对比

3 种降噪方法的海缆振动信号降噪性能对比如表 2 所示。可以看出, 本文方法的降噪效果最优。

2.2 实验信号分析

采用 BOTDA 和偏振分析仪可以同时监测海缆的温度、应变和偏振状态, 实现对海缆状态的综合监测

功能^[15]。根据布里渊散射原理, 携带 SBS 信息的探测光经环行器和光纤耦合器分光后分成 2 路: 一路连接到光电探测器以检测温度、应变; 另一路连接到偏振检测模块用于振动信号监测。系统结构图如图 3 所示。

在室温条件下, 将 1 段长度大约为 10 m 的光纤跳线和 2 盘长为 25 km 的光纤跳线固定在振动台上, 按照图 3 连接光路。在实验阶段, 将实验得到的模拟海缆振动信号输入到任意波形发生器中产生所需波形; 之后, 通过功率放大器提升此波形, 并驱动振动平台; 接着, 长为 10 m 的光纤跳线经振动台驱动产生振动, 进而模拟出海缆震动信号。同时, 通过振动台连接的加速度传感器确保振动台产生波形的准确性; 振动信号会对 BOTDA 中的单模光纤偏振状态进行调整。10% 的光功率由光纤耦合器 2 传入光检测器, 而余下的 90% 则进入偏振分析仪 (POD)。然后, 通过使用 POD 内的 PolaView 软件对振动信号波形进行实时监测, 发现归一化斯托克斯矢量 S_1 显示的波形与海缆振动信号波形最匹配, 因此本文抽取了 S_1 中的信号波形数据进行实验分析, 并应用 ANSYS 软件进行仿真, 得到光单元的振动数据, 获得带有噪声的 3 种海缆振动

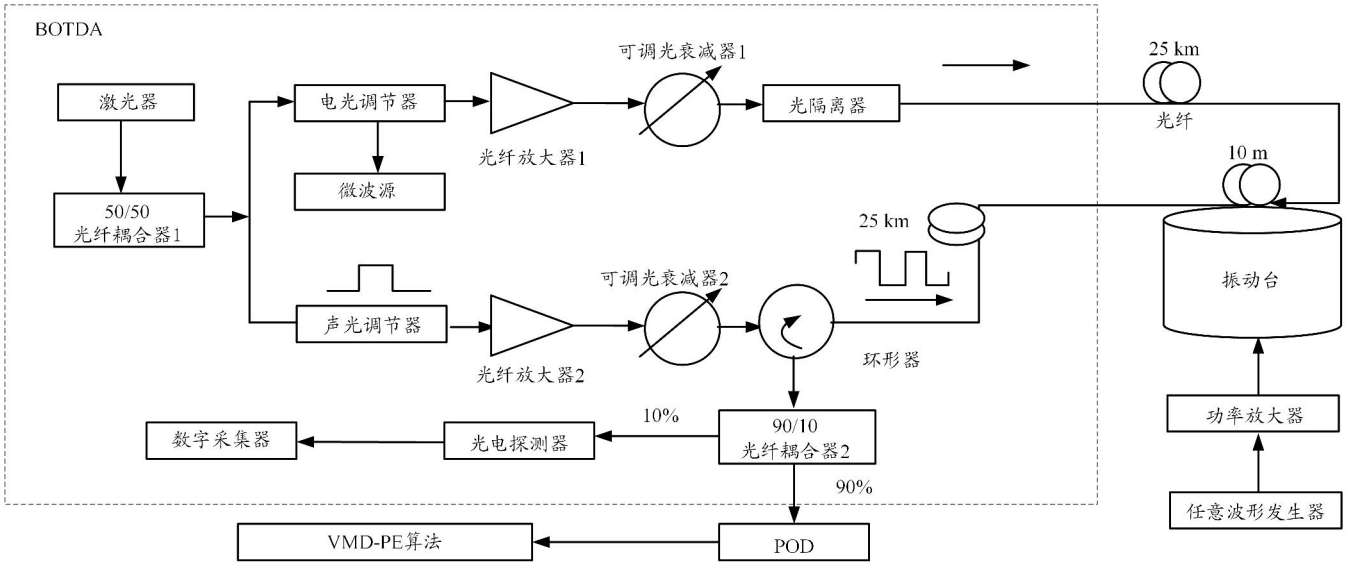


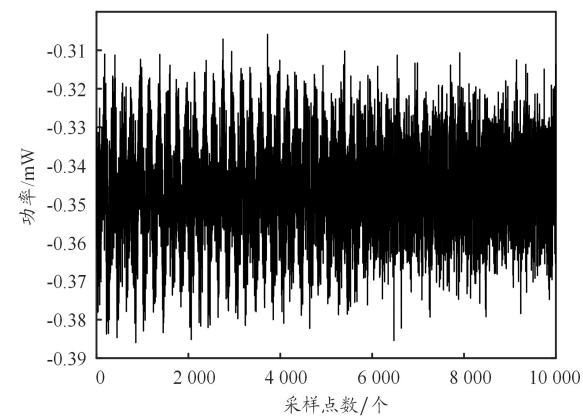
图 3 实验系统结构图

郭家兴, 钱君霞, 闫安心, 等: 基于 VMD 和排列熵的海缆振动信号降噪方法

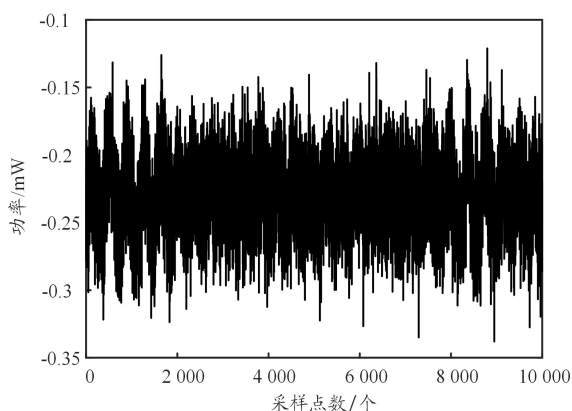
信号样本如图 4 所示。由图 4 可知, 由于 BOTDA 在产生 SBS 过程中会产生大量噪声, 这会对信号分析造成影响, 因此必须对其进行降噪处理。

本研究选择了 PE 值超过 0.7 的 IMF 分量进行小波阈值的降噪操作。海缆振动信号通过本文方法处理后的效果如图 5 所示。可以看出, 本文方法能够有效

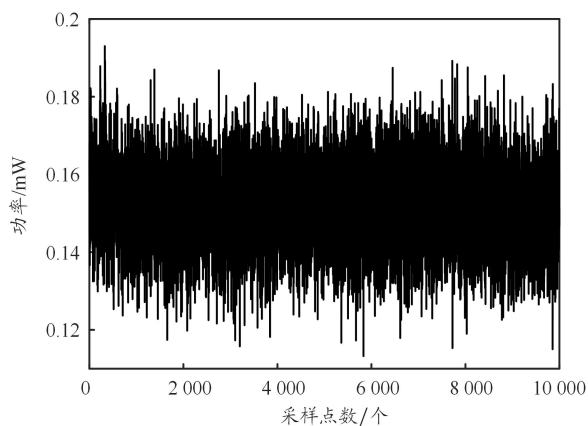
的去掉海缆振动信号中的噪声, 并且保留了原信号有效成分。为了验证本研究提出的降噪方法的优越性, 我们同时采用了 EMD 降噪法和 VMD 剔除法对海缆振动信号进行降噪处理, 并对比其性能。3 种降噪方法对振动信号处理前后系统的 SNR 数据如表 3 所示。可以看出, 采用 EMD 降噪法处理过的三类海缆振动信



(a) 冲刷信号

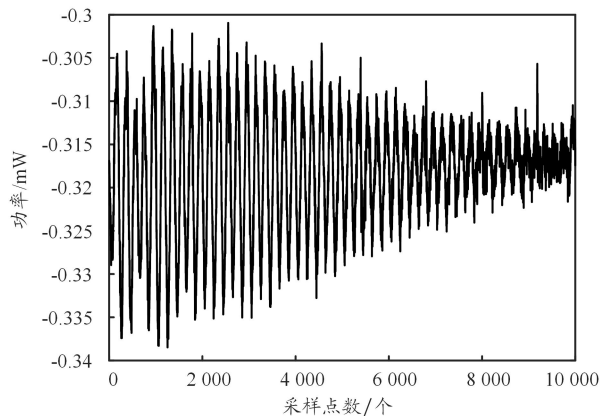


(b) 摩擦信号

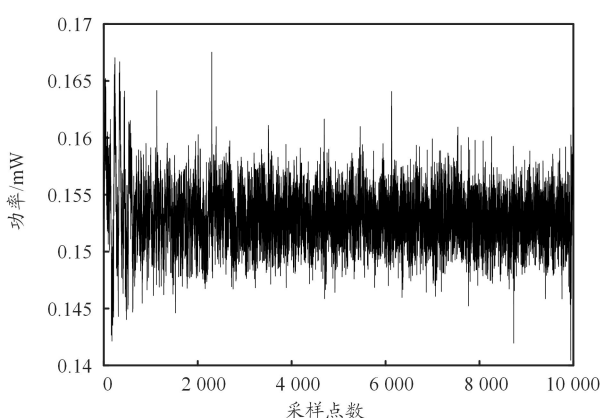


(c) 锚砸信号

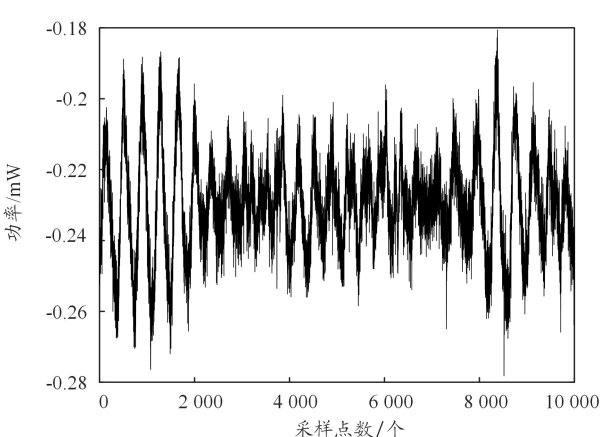
图 4 含噪的三类海缆振动信号



(a) 冲刷信号



(c) 摩擦信号



(b) 锚砸信号

图 5 本文方法降噪后三类海缆振动信号

表3 3种降噪方法对比情况

降噪方法	类别	SNR		RMSE
		降噪前/dB	降噪后/dB	
EMD 降噪法	冲刷	13.147 5	28.325 4	0.102 8
	摩擦	13.785 2	26.421 7	0.126 9
	锚砸	19.689 5	33.254 6	0.087 6
VMD 剔除法	冲刷	13.147 5	29.875 6	0.099 7
	摩擦	13.785 2	28.125 8	0.104 6
	锚砸	19.689 5	35.268 5	0.084 2
本文方法	冲刷	13.147 5	30.257 8	0.089 2
	摩擦	13.785 2	29.635 4	0.092 7
	锚砸	19.689 5	38.786 2	0.063 5

号在降号在降噪前后的 SNR 较低且 RMSE 大。虽然 VMD 剔除法能够大幅度剔除振动信号中的高频噪声,同时其 SNR 相较于 EMD 降噪法有一定的提升。但是,与本文方法相比,VMD 剔除法降噪后的 SNR 低且 RMSE 较大。因此,本文提出的基于 VMD 和 PE 的海缆振动信号降噪方法相对于前两者的降噪效果更优,且 SNR 最高。

3 结束语

本文提出了基于 VMD 和 PE 的海缆振动信号降噪方法,搭建了基于 BOTDA 的海缆振动信号综合监测系统,获取了 3 类海缆振动信号海缆振动信号数据。但是,由于 BOTDA 在发生布里渊散射时引入了大量的噪声,对海缆振动信号进一步分析带来了不利影响,故对其降噪很有必要。单纯使用 VMD 剔除法和 EMD 降噪法无法达到很好的降噪效果,而本文提出的基于 VMD-PE 的降噪方法在提升 SNR 的同时,有效

地降低了 RMSE。通过对 3 类海缆振动信号的降噪处理结果可知,本文的降噪方法不仅不会使海缆振动信号的波形失真,对信号波形特征不会产生较大影响,且降噪后的 3 类海缆振动信号波形更加平滑,有效消除了噪声成分,可以达到较好的降噪效果,为工程中海缆信号处理提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 张旭苹,陈晓红,梁蕾,等.长距离海缆在线监测改进 C-OTDR 系统[J]. 光学学报,2021,41(13):3-14.
- [2] 张振鹏,蒙绍新,胡列翔,等.锚害对 500 kV 海底电缆结构层的影响[J]. 高电压技术,2020,46(2):561-568.
- [3] 夏田,詹瑶,郭建斌.基于小波包和梯度提升决策树的轴承故障诊断[J]. 陕西科技大学学报,2020,38(5):144-149.
- [4] 谢丽娟,路锋,王旭,等.一种用于信号去噪的小波阈值去噪算法[J]. 国外电子测量技术,2020,39(4):32-36.
- [5] 刘向锋,黄庚华,张志杰,等.高分七号激光测高中全波形回波数据的 EMD 降噪[J]. 红外与激光工程,2020,49(11):95-104.
- [6] 张阳峰,韦仕鸿,邓娜娜,等.基于小波降噪的振动传感器数据分析[J]. 计算机科学,2019,46(S1):537-539+565.
- [7] 胡爱军,孙敬敬,向玲.经验模态分解中的模态混叠问题[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(4):429-434.
- [8] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [9] 郑近德,程军圣,杨宇.改进的 EEMD 算法及其应用研究[J]. 振动与冲击,2013,32(21):21-26.
- [10] 孟凡煦,张琰骏.基于 VMD 和 ELM 的超短期负荷预测方法[J]. 国外电子测量技术,2019,38(1):24-28.
- [11] 刘文杰,邹瑛珂,张珊,等.基于 VMD 与改进 DAE 人车地震动包络信号识别算法[J]. 科学技术与工程,2022,22(24):10379-10387.
- [12] 杜政奇,王敬华,张新慧.基于参数优化 VMD 和能量相似度的配电网故障区段定位方法[J]. 电子测量技术,2022,45(8):95-101.
- [13] BANDT C, POMPE B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series[J]. Physical Review Letters, The American Physiological Society, 2002, 88(17): 4102-4102.
- [14] 田全虎,王英乐,郑禄林,等.基于 CEEMD 和排列熵的矿山微震信号降噪研究[J]. 黄金,2022,43(8):31-36.
- [15] 尚秋峰,郭家兴.基于 VMD-BSA-SVM 的海缆振动信号识别方法[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(17):65-74.