

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.033

基于 BESSMHD 和 SLMSGST 的风电塔筒裂纹损伤识别

吴海涛, 刘军, 李林, 季香梅

(国华能源投资有限公司江苏分公司, 江苏 盐城 224299)

摘要:针对风电塔筒疲劳裂纹难以识别的问题,提出一种基于 BESSMHD 和 SLMSGST 的损伤识别方法。利用 BES 算法优化后的 SMHD 方法对 AE 信号进行降噪;对降噪信号进行广义 S 变换计算二阶瞬时频率估计算子;进一步将时频能量重排压缩至局部最大值附近从而得到时频分析结果;通过对比有无裂纹状态下的时频分析结果实现裂纹损伤识别。现场数据分析结果表明:该方法可以有效提取损伤特征,实现塔筒裂纹损伤识别。

关键词:声发射技术;秃鹰优化算法;稀疏最大谐波噪声比解卷积;二阶局部最大值同步压缩广义 S 变换;塔筒裂纹损伤
中图分类号:TH17 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0170-05

Crack Damage Identification for Wind Turbine Towers Based on BESSMHD and SLMSGST

WU Haitao, LIU Jun, LI Lin, JI Xiangmei

(Guohua Energy Investment Co., Ltd., Jiangsu Branch, Yancheng 224299, China)

Abstract: To address the difficulty in identifying fatigue cracks in wind turbine towers, a damage identification method based on BESSMHD and SLMSGST is proposed. The SMHD method optimized by the BES algorithm is first employed to denoise the acoustic emission (AE) signals. Then, the generalized S-transform is applied to the denoised signals to calculate the second-order instantaneous frequency estimation operator. Next, the time-frequency energy is rearranged and compressed around local maxima to obtain the time-frequency analysis results. Finally, crack damage is identified by comparing the time-frequency analysis results under cracked and crack-free conditions. Analysis of on-site data shows that this method can effectively extract damage features and achieve crack damage identification for wind turbine towers.

Keywords: acoustic emission technology; bald eagle search; sparse maximum harmonics-to-noise-ratio deconvolution; second-order local maximum synchrosqueezed generalized S-transform; tower crack failure

0 引言

风电塔筒作为风电机组的主要支撑,需同时承受机组自身质量以及各种风况下的动态载荷,其长时间运行后极易产生疲劳损伤^[1-2]。由于损伤具有突发性和局部性等特点,难以及时发现,容易造成安全事故,因此开展风电塔筒损伤识别研究对保障风电机组安全运行具有重要意义^[3-4]。在风电塔筒裂纹损伤识别过程中,声发射(acoustic emission, AE)技术方案是目前的研究热点,由于金属裂纹产生的 AE 信号在幅值和频率上特征明显,采集过程无需接触声发射源,受传递路径影响较小,因此可精准捕捉风电塔筒裂纹损伤信息^[5-6]。

受工作环境、工件状态等因素的影响,AE 信号中成分复杂,塔筒裂纹识别难度增加,为此将稀

疏最大谐波噪声比解卷积方法^[7-8] (sparse maximum harmonics-to-noise-ratio deconvolution, SMHD)引入到 AE 信号处理过程中,并利用秃鹰优化算法^[9-10] (bald eagle search, BES)对滤波器长度 L 进行最优化选取,从而提出一种基于秃鹰优化算法优化稀疏最大谐波噪声比解卷积(bald eagle search sparse maximum harmonics-to-noise-ratio deconvolution, BESSMHD)的 AE 信号降噪方法,旨在实现对 AE 信号的自适应卷积滤波处理。

然而,在现场监测数据的实际应用过程中,由于采集到的 AE 信号中存在强噪声干扰,使得塔筒损伤特征无法被准确提取,识别效果难以达到预期水平。针对此问题,本文将广义 S 变换(generalized s-transform, GST)^[11]引入到 AE 信号的后处理过程中,使其与同步压缩变换(synchrosqueezed transform, SST)^[12]原理融合,并

第一作者简介:吴海涛(1971—),男,江苏滨海人,工程师,本科,研究方向为风电机组运行维护研究, wuhaitao0117@163.com。

应用二阶瞬时频率估计算子和局部最大值频率重排算子^[13]对其进行改进,提出一种基于二阶局部最大值同步压缩广义 S 变换 (second-order local maximum synchrosqueezed generalized s-transform, SLMSGST) 方法,将其与 BESSMHD 方法进一步结合,分别作为预处理和后处理方法对塔筒裂纹 AE 信号进行分析,实现对塔筒裂纹损伤状态的准确识别。

1 BESSMHD 方法

1.1 SMHD 算法

SMHD 算法是以谐波噪声比^[14]为目标函数对信号进行卷积滤波处理,能够有效增强信号损伤特征。谐波噪声比的表达式如下

$$H_{NR}[f(l)] = \frac{\int x(t)x(t+T)dt}{\int x(t)^2dt - \int x(t)x(t+T)dt} \quad (1)$$

式中: T 表示损伤信号周期; t 表示时间; H_{NR} 表示谐波噪声比; $f(l)$ 表示滤波系数。

SMHD 方法通过计算谐波噪声比来估计信号的周期,进而增强信号的潜在周期脉冲特性。在每次迭代过程中,利用稀疏因子进一步降低噪声的影响,提高信号的信噪比。同时,稀疏阈值和周期的更新机制也保证了 SMHD 的鲁棒性,相较于传统的解卷积方法,SMHD 的损伤分析表现更为出色,算法具体过程参考文献[7-8]。

1.2 滤波器长度 L 的选取

在 SMHD 算法的应用过程中,滤波器长度 L 的选取将直接影响其降噪效果,为了达到最佳的降噪效果,本文采用 BES 算法对滤波器长度 L 进行寻优,并提出一种结合基尼指数^[15] (gini index, GI) 和信息熵^[16] 的综合指标 GIE

$$G_{IE} = \lg\left(\frac{E}{G_1}\right) \quad (2)$$

式中: E 表示信息熵; G_1 表示基尼指数。GIE 的值越小,滤波信号与原始信号相关性更大,含有噪声较少,损伤特征信息越丰富,因此可根据最小 GIE 选取最优滤波器长度 L ,完成降噪过程。

基于上述综合指标以及 BES 算法强大的全局搜索能力对滤波器长度 L 进行最优化选取,随着 BES 算法迭代的进行,秃鹰将围绕最优个体进行搜索,当 GIE 值最小时到达最优位置,获得最优滤波器长度 L 。

2 SLMSGST 方法

二阶局部最大值同步压缩广义 S 变换方法旨在通过二阶瞬时频率估计算子和局部最大值频率重排算子有效集中时频能量、减少噪声干扰、提高鲁棒性。具体过程如下:

一阶谐波信号 $x(t)$ 广义 S 变换

$$S_x^p(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \omega_f^p(t - \tau) e^{-i2\pi f t} dt \quad (3)$$

计算瞬时频率估计算子 $W_{(1)}^p(\tau, f)$

$$W_{(1)}^p(\tau, f) = \frac{\partial S_x^p(\tau, f)}{i2\pi S_x^p(\tau, f)} \quad (4)$$

引入群延时系数 $\tilde{\tau}(\tau, f)$, 式(4)对 $\tilde{\tau}^{(1)}(\tau, f)$ 求偏导可得调制系数 $\tilde{q}(t, f)$

$$\tilde{q}(\tau, f) = \frac{\partial W_{(1)}^p(\tau, f)}{\partial \tilde{\tau}(\tau, f)} \quad (5)$$

结合调制系数 $\tilde{q}(t, f)$ 和 $W_{(1)}^p(\tau, f)$ 可得二阶瞬时频率估计算子 $W_{(2)}^p(\tau, f)$

$$W_{(2)}^p(\tau, f) = W_{(1)}^p(\tau, f) + \tilde{q}(\tau, f)(\tau - \tilde{\tau}(\tau, f)) \quad (6)$$

将时频能量压缩到 $W_{(2)}^p(\tau, f)$ 附近, 可得二阶同步压缩广义 S 变换表达式

$$S_{SGST}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_x^p(\tau, f) \delta(f - W_{(2)}^p(\tau, f)) df \quad (7)$$

定义二阶局部最大值同步压缩广义 S 变换的频率重排算子 $W_m(\tau, f)$

$$W_m(\tau, f) = \begin{cases} \operatorname{argmax}_w |S_{SGST}(\tau, f)|, & |S_{SGST}(\tau, f)| \neq 0 \\ 0, & |S_{SGST}(\tau, f)| = 0 \end{cases} \quad (8)$$

因此, 将二阶同步压缩广义 S 变换的能量重排并压缩到 $W_m(\tau, f)$ 附近, 可以得到 SLMSGST 的公式如下

$$S_{LMSGST}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_x^p(\tau, f) \delta(f - W_m(\tau, f)) df \quad (9)$$

3 风电塔筒裂纹损伤识别流程

针对风电塔筒疲劳裂纹损伤识别问题, 提出一种基于 BESSMHD 和 SLMSGST 的风电塔筒疲劳裂纹损伤识别方法, 该方法能够精准挖掘出风电塔筒裂纹状态下的特征信息实现损伤识别, 所提方法具体步骤如下:

1) 加载声发射信号, 初始化 BES 算法的参数,

设置秃鹰种群规模 $z=40$ 、最大迭代次数 $T_{\max}=50$,以综合指标为适应度函数,确定滤波器长度为秃鹰个体解,设定滤波器长度取值范围[20,500];

2) 当迭代次数达到设定的最大值后,输出最优滤波器长度,并使用最优滤波器长度的 SMHD 方法对信号进行降噪预处理;

3) 对降噪信号进行广义 S 变换,计算瞬时频率估计算子 $W_{(1)}^p(\tau, f)$,引入群延时系数 $\tilde{\tau}(\tau, f)$ 并计算调制系数 $\tilde{q}(t, f)$,构建二阶瞬时频率估计算子 $W_{(2)}^p(\tau, f)$,实现二阶同步压缩广义 S 变换;

4) 搜索二阶同步压缩广义 S 变换时频能量局部最大值,根据式(8)构建局部最大值频率重排算子 $W_m(\tau, f)$,将能量重排并压缩至局部最大值附近,得到时频分析结果;

5) 对比有无裂纹状态下的时频分析结果实现裂纹损伤识别。

4 试验验证

4.1 风电塔筒裂纹检测

在某风电机组塔筒的外表面发现一处贯穿厚度裂纹,将其放大如图 1 中方框所示。为准确采集损伤 AE 信号,将多个声发射探头分段安装在塔筒内侧,并在塔筒底部放置声发射采集仪,其中 4 号测点靠近塔筒裂纹。塔筒摆动过程中自动加载,导致裂纹出现微扩展,激发 AE 信号,传感器探头与声发射采集设备如图 1 所示。为对比试验,对同一风场的无裂纹风电机组也进行了 AE 信号采集,且每组实验单独进行,互不干扰。信号采样频率为 1 MHz,单个数据存储时间为 0.01 s, 60 dB 增益信号,门限电压触发存储。

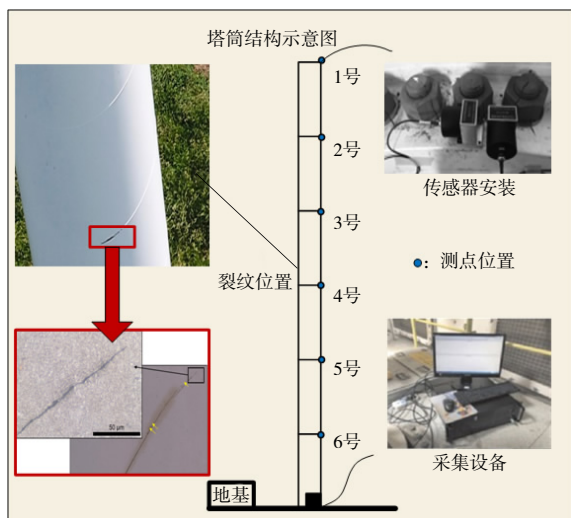


图 1 塔筒裂纹位置及数据采集系统

4.2 结果分析

将风电塔筒 4 号测点位置的有裂纹和无裂纹 AE 信号波形进行对比,结果如图 2 所示,其中风电塔筒有裂纹 AE 信号相较于无裂纹 AE 信号具有明显脉冲冲击。这些冲击可以被视为微裂纹扩展所引发的 AE 信号。因此,通过观察 AE 信号的时域波形,可以初步判断风电塔筒是否存在裂纹损伤。

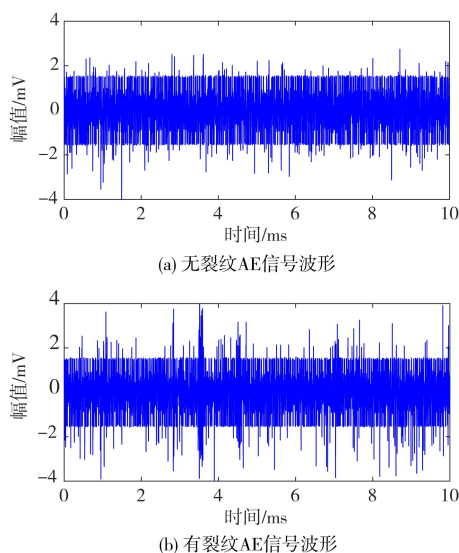


图 2 塔筒信号波形

利用本文所提方法分析风电塔筒 AE 信号。两种状态下 AE 信号的适应度函数值随迭代次数变化曲线如图 3(a) 和图 4(a) 所示,分别在第 27 和 14 次迭代时完成收敛,最优的滤波器长度分别为 252 和 371。经 BESSMHD 方法和 SLMSGST 算法处理后的时频分析结果如图 3(b) 和图 4(b) 所示。无裂纹状态下,时频分析结果中无明显能量集中,而有裂纹状态下,纵坐标在 [95, 120] 区域内出现明显能量集中。由文献[17]中的试验数据可知,该频率段是金属材料裂纹产生的常见频率段,可作为风电塔筒裂纹 AE 信号激发的一个佐证,由此可知采用本文研究方法的有无裂纹声发射信号时频分析结果差异明显,能够有效识别风电塔筒疲劳裂纹损伤。

为了验证本文方法的优越性,利用 SST 和 GST 方法对有裂纹 AE 信号进行对比分析,结果如图 5 所示。针对有裂纹 AE 信号,两个对比方法的时频分析结果中尽管可以看出一定的能量集中,但相较于本文研究方法,两种对比方法的有裂纹 AE 信号时频能量集中并不明显,仍存在发散

现象。

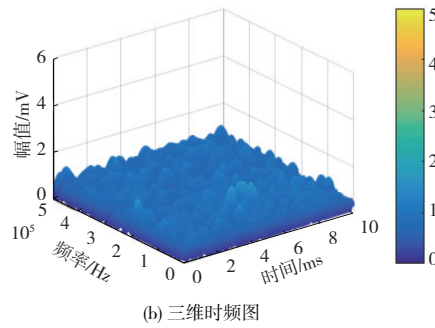
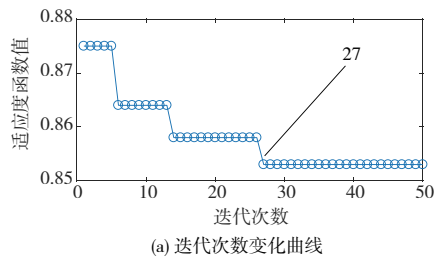


图3 无裂纹 AE 信号本文方法分析结果

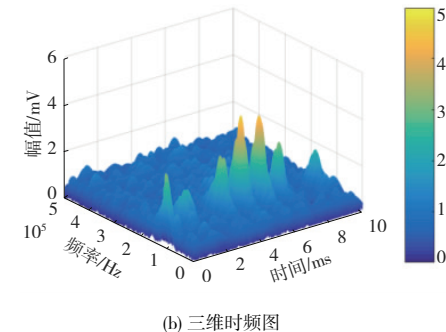
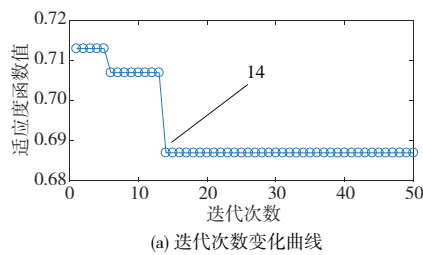


图4 有裂纹 AE 信号本文方法分析结果

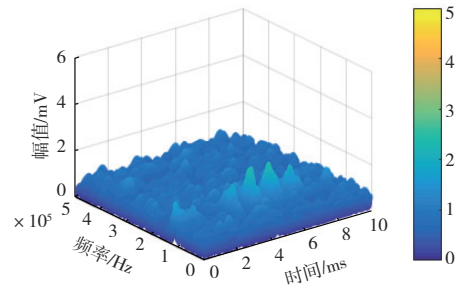
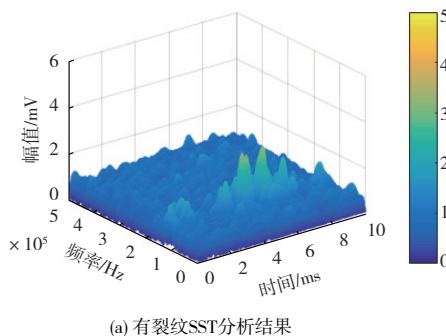


图5 2种对比方法分析结果

为进一步比较各方法的性能,采用 Renyi 熵^[18]、信号时频聚集度 CM 和瞬时频率估计峰值 PV^[19]作为量化指标对多种方法进行性能评估。针对风电塔筒有无裂纹 AE 信号,分别计算本文方法以及两种对比方法的 Renyi 熵值、CM 值以及 PV 值,具体结果如图 6 所示。通过对比可以发现,对于有裂纹 AE 信号,本文方法 Renyi 熵值最小,CM 值和 PV 则最大,表明所得时频分析结果中能量集中更加明显。同时通过对比图中有裂纹 AE 信号的 3 种指标差值可知,本文研究方法的差值均最大,性能最佳,因此能够获得更加良好的损伤识别效果。

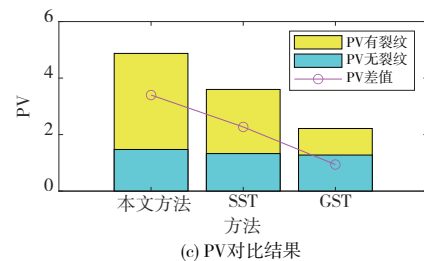
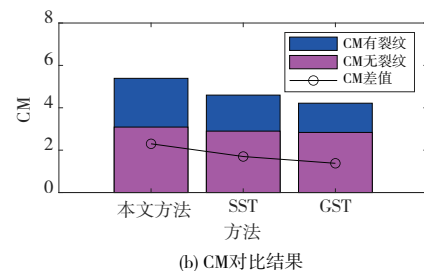
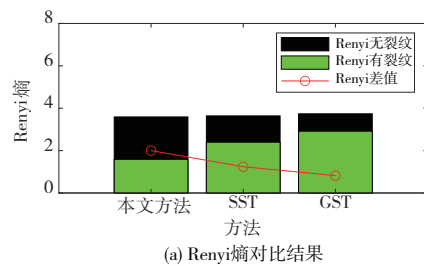


图6 性能评价指标对比结果

5 结语

为了有效识别风电机组塔筒裂纹损伤,本文提出了一种基于 BESSMHD 和 SLMSGST 的风电塔筒疲劳裂纹损伤识别方法,通过实验数据分析验证可得出以下结论:

1) 采用 BES 算法和结合基尼指数及信息熵的综合指标 GIE 对 SMHD 方法中滤波器长度进行寻优,能够快速且高效地选取最优滤波器长度,提高了 SMHD 方法的滤波性能。

2) 应用二阶瞬时频率估计算子和局部最大值频率重排算子能够有效增强广义 S 变换的时频能量聚集能力、减少噪声干扰、提高鲁棒性。

3) 本文将 BESSMHD 和 SLMSGST 结合的损伤识别方法能够准确提取出风电塔筒疲劳裂纹损伤特征,且与广泛应用的时频分析方法相比,该方法优势明显,对于解决风电塔筒实际工程问题可提供一定参考及助力。

参考文献:

- [1] 杨春龙,吴晓晨. 风电塔筒焊接接头运行疲劳损伤无损监测技术[J]. 焊接技术,2025,54(10):129-133.
- [2] 姚帅,戴巨川,吕伟荣. 基于频率法的风电机组混合塔筒拉索索力检测技术研究[J]. 机械工程学报,2026,62(2):385-396.
- [3] 胡赢,陈旺明,李怿炳,等. 风电塔筒用高强度钢的疲劳性能与寿命预测研究[J]. 中国金属通报,2025(15):165-167.
- [4] 官宇楠,王超,宋博扬. 采用小波分析的风力机叶片声发射信号处理与分析[J]. 西安交通大学学报,2025,59(5):209-216.
- [5] 吴冠武,吴立群,王洪成,等. 轴承故障声发射信号的涡旋聚焦传输方法[J]. 中国机械工程,2025,36(1):78-86.
- [6] 田德,邓远卓,黄斌,等. 低风速型风电机组高柔塔筒涡激振动疲劳损伤评估[J]. 太阳能学报,2023,44(3):232-238.
- [7] MIAO Y H, ZHAO M, LIN J, et al. Sparse maximum harmonics-to-noise-ratio deconvolution for weak fault signature detection in bearings[J]. Measurement Science

and Technology,2016,27(10):105004.

- [8] 钟辉,郭瑜,高国泽. 参数自适应 SMHD 滚动轴承 IAS 信号特征提取方法[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(12):10-17.
- [9] 刘世杰,刘美,孟亚男,等. 秃鹰搜索算法的优化及图像分类应用[J]. 计算机系统应用,2023,32(11):182-192.
- [10] 温夏露,黄鹤,王会峰,等. 基于秃鹰搜索算法优化的三维多无人机低空突防[J]. 浙江大学学报(工学版),2024,58(10):2020-2030.
- [11] 陆炳文,罗镭兴,曹黎媛,等. 基于广义 S 变换的多变量非平稳风速高精度模拟[J]. 太阳能学报,2025,46(2):548-555.
- [12] 傅顺军,罗强,李江,等. 基于 STFT 同步压缩变换和 ResNet 参数迁移的滚动轴承智能诊断[J]. 船舶工程,2024,46(12):58-67,74.
- [13] YU G, WANG Z H, ZHAO P, et al. Local maximum synchrosqueezing transform: An energy-concentrated time-frequency analysis tool[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2019,117:537-552.
- [14] 刘玉梅,周彦轩,胡婷,等. 基于自适应特征模态分解的轴承微弱故障诊断[J/OL]. 吉林大学学报(工学版),2025:1-9. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250649>.
- [15] 钱门贵,陈涛,于耀翔,等. 一种改进基尼指数加权的轴承健康指标构建方法[J]. 中国机械工程,2023,34(15):1813-1819,1855.
- [16] 党涛,胡钦华,邓见光. 基于信息熵划分的局部密度峰值聚类算法[J]. 计算机工程与设计,2025,46(10):2772-2777.
- [17] 郭志杰,贺利乐,王兴路,等. 金属裂纹扩展声发射信号特性研究[J]. 机械设计与制造,2017(5):102-105.
- [18] LEE J, JEONG K. Quantum Rényi entropy functionals for bosonic Gaussian systems[J]. Physics Letters A,2023,490:129183.
- [19] 李秀梅,杨国青. 几种时频分析方法的性能比较[J]. 计算机仿真,2015,32(3):220-224,252.

收稿日期:2024-03-05