

## 基于时间反演技术的钢塔筒法兰节点螺栓松动监测研究

闫尊昊, 徐菁\*, 张端, 任师训

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

**摘要:**随着我国风电装机容量的连年提高,风电规模常年位居世界第一,对风电支撑塔架的健康运营提出了更高的要求。针对钢塔筒法兰节点内部的连接螺栓具有隐蔽性且松动微小不易察觉等问题,提出了基于时间反演技术的钢塔筒法兰节点螺栓松动监测方法。通过理论推导建立应力波聚焦信号峰值与法兰节点螺栓预紧力之间的相关关系,为所提方法提供理论依据;设计并制作一个缩尺风电钢塔筒法兰节点模型,通过对法兰节点处螺栓施加不同的扭矩以模拟螺栓不同的松动状态。在高压脉冲信号的激励下,将一个压电陶瓷传感器(Lead Zirconate Titanate Piezoelectric Ceramics,简称PZT)粘贴于螺栓帽,作为驱动器产生应力波,将另一个PZT片粘贴于法兰板,作为传感器接收应力波,以应力波聚焦信号峰值作为螺栓松动监测指标,根据监测指标变化实现对节点内部螺栓的监测。为了验证方法的可重复性,随机选取3根螺栓进行步骤一致的重复性试验;为了进一步验证方法的抗噪性,通过金属棒摩擦钢塔筒模拟监测噪声,进行抗噪性试验。模型试验结果表明,所提方法具有良好的有效性、可重复性和抗噪性,以为风电支撑塔架结构的钢塔筒法兰节点健康监测研究提供一种新思路。

**关键词:**健康监测;螺栓松动监测;时间反演技术;钢塔筒法兰节点;压电陶瓷片

**中图分类号:** TU317<sup>+</sup>.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)02-0025-07

### Research on bolt looseness monitoring of steel tower flange joint based on time inversion technology

YAN Zunhao, XU Jing\*, ZHANG Duan, REN Shixun

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** With the continuous increase of the installed capacity of wind power, China's scale of wind power ranks first in the world all year round, which puts forward higher requirements for the healthy operation of wind power support tower. Aiming at the problems that the connecting bolts inside the steel tower flange joints are invisible and the looseness is small and difficult to detect, a monitoring method of bolt looseness of steel tower flange joints based on time inversion technology is proposed. The correlation between the peak value of stress wave focusing signal and the bolt preload of flange joint is established by theoretical derivation, which provides a theoretical basis for the proposed method. A scaled flange joint model of wind turbine steel tower is designed and fabricated. Different torques are applied to the bolts at the flange joints to simulate different loosening states of the bolts. Un-

收稿日期: 2023-09-06

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2021ME033; ZR2021ME239)

作者简介: 闫尊昊(1999—), 男, 山东潍坊人。硕士, 研究方向为结构健康监测。E-mail: yanzh0945@163.com。

\* 通信作者: 徐菁(1976—), 女, 山东青岛人。博士, 副教授, 主要从事大跨度空间钢结构健康监测等方面的研究。  
E-mail: jingxu180@163.com。

der the excitation of Gaussian pulse signal, a lead zirconate titanate piezoelectric ceramics (PZT) is pasted on the bolt cap as a driver to generate stress waves, and another PZT sheet is pasted on the flange plate as a sensor to receive stress wave. The peak value of stress wave focusing signal is used as the bolt loosening monitoring index, and the bolt inside the joint is monitored according to the change of monitoring index. In order to verify the repeatability of the method, three bolts are randomly selected for the repeatability test with the same steps. In order to further verify the anti-noise performance of the method, a metal rod is used to rub against the steel tower to simulate and monitor the impact of noise, and the anti-noise test is carried out. The model test results show that the proposed method has good effectiveness, repeatability and noise resistance, so as to provide a new idea for the health monitoring of steel tower flange joints of wind power support tower structure.

**Key words:** health monitoring; bolt loosening monitoring; time inversion technology; steel tower flange joint; piezoelectric ceramic sheet

风电钢塔筒是风力发电设备的主要支撑构件,需要支撑一定质量的风力发电设备,还要吸收机组正常工作产生的振动,必须有足够的刚度、强度、安全性和耐久性。然而,在风叶不停转动的交变荷载作用下,钢塔筒长期处于亚健康状态,连接节点处螺栓的摩擦系数随之下降低,摩擦力减小,螺栓因不能满足自锁条件而存在微量蠕变和滑动,最终导致松动;而且风电塔工作环境极度恶劣<sup>[1]</sup>,地基不均匀沉降以及施工过程中螺栓假拧和拧入深度不足,将导致节点处螺栓的进一步松动,从而降低节点连接刚度,导致钢塔筒在节点处发生损伤,甚至倒塌。因此,针对钢塔筒法兰节点松动状态进行监测,对于保证风力发电系统整体安全运营具有重要意义。

目前,对风电钢塔筒的监测研究主要集中在模态分析、数值模拟以及数学解析方面,针对在役阶段的风电钢塔筒法兰节点螺栓松动的监测研究相对较少。同时,钢塔筒巡检工作以定期人工巡检为主,该方法受到人为因素影响较大;另一方面,风电钢塔筒较高,受到的水平荷载作用较大,且随时处于交变荷载的作用下,工作环境复杂多变,难以实现对塔筒的实时在线监测,且存在一定的危险性<sup>[2]</sup>。以压电传感为代表的压电智能监测方法,具有响应快、灵敏度高、频率范围广、可以实时在线监测等众多优点,被广泛应用于健康监测领域<sup>[3]</sup>。LI等<sup>[4]</sup>利用压电传感技术监测了桥梁缆索支柱销接结构不同松动程度下的受力状态;WANG等<sup>[5]</sup>利用时间反演技术基于非线性超声特征的振声调制(VAM)方法对早期螺栓松动进行了监测;张全景等<sup>[6]</sup>利用压电传感技术实现了木结构螺栓连接节点的损伤识别。

针对钢塔筒法兰节点螺栓松动的问题,结合压电智能传感法,提出了基于时间反演技术的钢塔筒法兰节点螺栓松动监测方法,制作了一个缩尺的风电钢塔筒试件,通过模型试验,验证了所提方法的有效性、可重复性和抗噪性,试验结果表明该方法可以有效监测法兰节点螺栓松动,以期为风力发电中普遍存在的法兰节点螺栓松动问题的健康监测提供解决方案。

## 1 基于时间反演技术的钢塔筒法兰节点螺栓监测研究

### 1.1 钢塔筒法兰节点连接构造

钢塔筒法兰连接节点的组成如图1所示,包括上塔筒、下塔筒、上法兰盘、下法兰盘和高强螺栓。钢塔筒和法兰盘之间采用焊接连接后可以做到安全密封<sup>[7]</sup>,上下法兰盘采用高强螺栓连接,通过拧紧螺母来使螺栓达到预紧拉力值,实现上下塔筒的连接。

### 1.2 时间反演技术基本原理

时间反演技术是基于压电陶瓷传感器(Lead

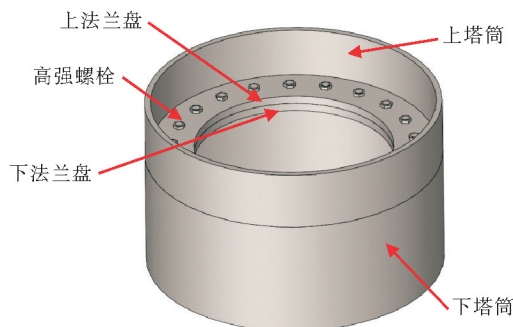


图1 风电钢塔筒法兰节点示意

Zirconate Titanate Piezoelectric Ceramics, PZT) 的监测方法, 将接收到的信号反转并重新发射到目标区域, 由于反转前后信号在同一路径中传播, 所以能在波源处实现信号聚焦, 该方法具有良好的时-空自适应聚焦特性、一定的抗噪鲁棒性。时间反演技术原理如图 2 所示。

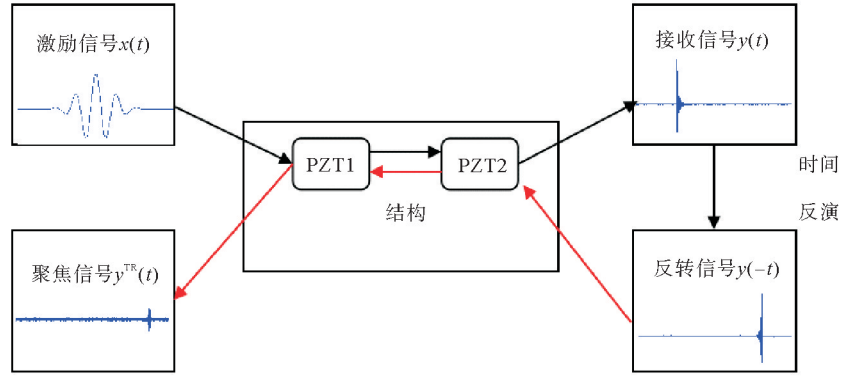


图 2 时间反演技术的原理

当对驱动器 PZT1 施加激励信号  $x(t)$  时, PZT2 的接收信号  $y(t)$  表达式为

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) \quad (1)$$

式中:  $h(t)$  为结构的传递函数;  $\otimes$  为卷积运算。

式(1)在频域里表达式为

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega) \quad (2)$$

式中:  $Y(\omega)$ 、 $X(\omega)$ 、 $H(\omega)$  分别为接收信号  $y(t)$ 、激励信号  $x(t)$ 、传递函数  $h(t)$  的傅里叶变换。

在时域里, PZT2 接收到的信号  $y(t)$  经过时间反演后, 变成反转信号  $y(-t)$ 。在时域里的信号逆序排列等同于在频域里进行傅里叶变换求复共轭。所以, 频域里的信号  $Y(\omega)$  表达为

$$Y(\omega) \xrightarrow{\text{TR}} Y^*(\omega) \quad (3)$$

式中:  $*$  为函数复共轭运算; TR 为时间反演;  $Y^*(\omega)$  为  $Y(\omega)$  时间反演后的信号。

由式(2)和式(3)可以得出  $Y^*(\omega)$  表达式为

$$Y^*(\omega) = X^*(\omega)H^*(\omega) \quad (4)$$

式中:  $X^*(\omega)$ 、 $H^*(\omega)$  分别为  $X(\omega)$ 、 $H(\omega)$  时间反演后的信号。

将经过时间反演的接收信号  $Y^*(\omega)$  由 PZT2 重新发射, 在 PZT1 接收到的信号成为聚焦信号, 用  $Y^{\text{TR}}(\omega)$  表示:

$$Y^{\text{TR}}(\omega) = Y^*(\omega)H(\omega) = X^*(\omega)H^*(\omega)H(\omega) \quad (5)$$

由于激励信号, 如高斯调制信号、方波信号等, 都是关于时间轴对称的, 即都满足  $x(t) = x(-t)$ , 频域可以表达为  $X^*(\omega) = X(\omega)$ , 式(5)也可以表达为

$$Y^{\text{TR}}(\omega) = Y^*(\omega)H(\omega) = X^*(\omega)H^*(\omega)H(\omega) = X(\omega) |H(\omega)|^2 \quad (6)$$

将在频域里聚焦的信号, 通过逆傅里叶变换, 转换到时域中可以得到

$$y^{\text{TR}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) |H(\omega)|^2 e^{j\omega t} d\omega \quad (7)$$

$H(\omega)$  由结构自身特性决定, 令  $C = |H(\omega)|^2$ , 表达式可以写为

$$y^{\text{TR}}(t) = Cx(t) \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 激励信号确定时聚焦信号峰值只与结构传递函数有关, 噪声对聚焦信号不会产生影 响, 说明时间反演具有良好的抗噪能力。

### 1.3 基于时间反演技术的螺栓松动监测原理

针对图 1 所示的钢塔筒法兰节点, 分别将 2 个压电陶瓷片 PZT1 和 PZT2 粘贴于待测螺栓的螺栓帽

和靠近该螺栓的法兰盘上<sup>[8]</sup>。时间反演信号在钢塔筒法兰节点的传递流程如下:①对 PZT1 施加电信号激励, PZT1 作为驱动器通过逆压电效应将电信号转化为应力波信号, 应力波信号通过螺栓传递至法兰盘, PZT2 作为接收器接收应力波信号, 通过正压电效应转化为电信号并由数据采集设备收集; ②接收到的电信号经过时间反演处理作用于 PZT2, 此时 PZT2 作为驱动器产生应力波, 应力波经过法兰盘传递到螺栓帽, 最终由 PZT1 作为接收器接收并转化为电信号, 由数据采集设备收集。

又因传递函数  $H(\omega)$  的大小与接触面积  $A$  成正比例关系<sup>[3]</sup>, 法兰节点的接触面积  $A$  随着螺栓预紧力  $F$  的增大而增大<sup>[9]</sup>, 故聚焦信号峰值  $y^{\text{TR}}(0)$ 、传递函数  $H(\omega)$ 、接触面积  $A$  和螺栓预紧力  $F$  之间的关系可以表示为

$$y^{\text{TR}}(0) \propto |H(\omega)|^2 \propto A \propto F \quad (9)$$

通过式(9)可以建立起应力波聚焦信号峰值与法兰节点螺栓预紧力之间的正相关关系<sup>[10-12]</sup>。螺栓连接越紧密, 上法兰盘与下法兰盘接触面积越大, 应力波传递过程中的损失就越小, 时间反演后 PZT1 接收到的信号峰值就越高。因此, 利用时间反演技术, 根据压电陶瓷传感器接收的应力波聚焦信号峰值的变化, 实现对钢塔筒法兰节点螺栓连接松动程度的监测。

## 2 模型试验

### 2.1 试验简介

制作试验用模型如图3所示, 缩尺比例为1:3, 塔筒采用Q235钢。钢塔筒的外径为500 mm, 壁厚为10 mm, 上塔筒筒高为200 mm, 下塔筒筒高为300 mm。法兰盘外直径为500 mm, 内直径为326 mm, 法兰盘厚度为14 mm, 法兰盘上螺栓孔中心到塔筒内壁的距离为40 mm。螺栓型号为M12, 强度等级为8.8级, 对模型螺栓依次编号。利用环氧树脂胶将PZT1粘贴于1号螺栓的螺栓帽, PZT2粘贴于1号螺栓孔正前方的法兰盘, 具体位置详见图4。

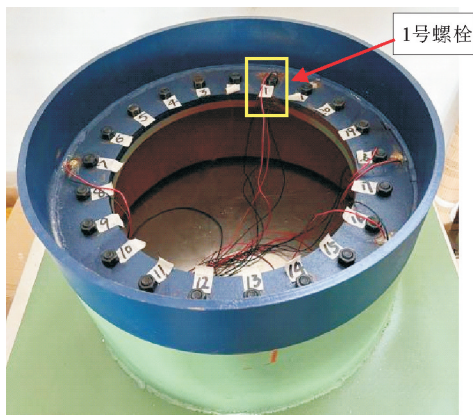


图3 试验模型

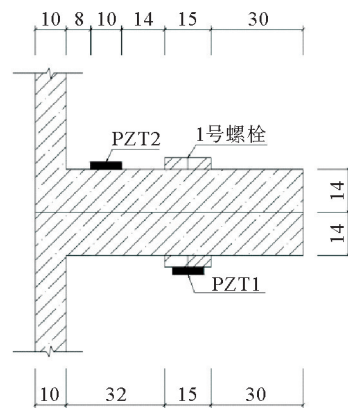


图4 PZT 粘贴位置示意(单位:mm)

试验仪器连接如图5所示, 包括型号为NI USB-6363的数据采集卡、型号为ATA-2022H的功率放大器、WSC3-060CN型力矩扳手、笔记本电脑。试验采用尺寸为 $\phi 10 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ 的单面双极式电极布置PZT-5型压电陶瓷片, 其具体性能参数如表1所示。粘贴PZT片之前, 使用砂纸对粘贴处进行打磨, 以增大PZT与结构的接触面积, 利于信号波的传递。试验过程中, 为了减少应力波的损失, 在模型与外界的各接触面位置铺垫海绵<sup>[13-14]</sup>。

考虑到风电钢塔筒较高, 在实际使用过程中, 连接节点在较大的水平荷载和风叶不停转动的交变荷载作用下, 将产生较大水平位移, 螺栓受剪力较大, 进一步促使连接螺栓发生松动<sup>[15]</sup>。为了模拟该影响, 通过配重块和夹具将模型竖向固定于墙面, 节点处的连接螺栓在模型重力作用下, 将产生松动趋势。

利用力矩扳手施加不同扭矩以构建不同松动工况下的螺栓连接状态, 以 $9 \text{ N} \cdot \text{m}$ 为增量, 共设计7种工况, 扭矩值取 $0 \sim 54 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 如表2所示。将扭矩值为 $54 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时的状态设置为螺栓终拧状态, 即结构健康状态。试验中选用高斯脉冲信号, 采样频率为 $1 \text{ MHz}$ , 采样时长为 $1 \text{ s}$ 。



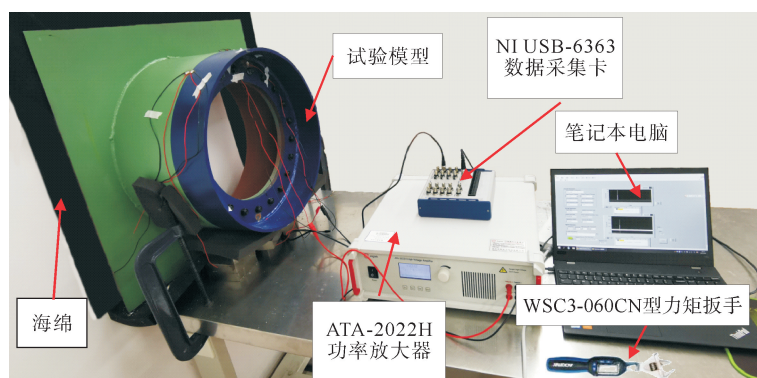


图 5 基于时间反演技术的钢塔筒法兰节点螺栓松动监测试验装置

表 1 PZT 性能参数

型号	$\nu$	$d_{33}/(\text{C} \cdot \text{N}^{-1})$	$g_{33}/(\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{N}^{-1})$	$K_T$	$K_P$	$\epsilon_{33}/\epsilon_0$
PZT-5	0.39	$5.80 \times 10^{-10}$	$7.00 \times 10^{-3}$	0.35	0.62	0.50

注: $\nu$  为泊松比; $d_{33}$  为压电应变常数; $g_{33}$  为压电电压常数; $K_T$  为厚度伸缩机电耦合系数; $K_P$  为平面机电耦合系数; $\epsilon_{33}/\epsilon_0$  为相对介电常数。

表 2 不同工况对应的扭矩值

损伤工况	1	2	3	4	5	6	7
扭矩值/(N·m)	0	9	18	27	36	45	54

## 2.2 有效性试验结果

在 7 种不同扭矩工况下,即螺栓不同松紧状态下,钢塔筒法兰节点结构基于时间反演技术测得的聚焦信号峰值如图 6 所示;不同扭矩值作用下聚焦信号峰值的变化,如图 7 所示。

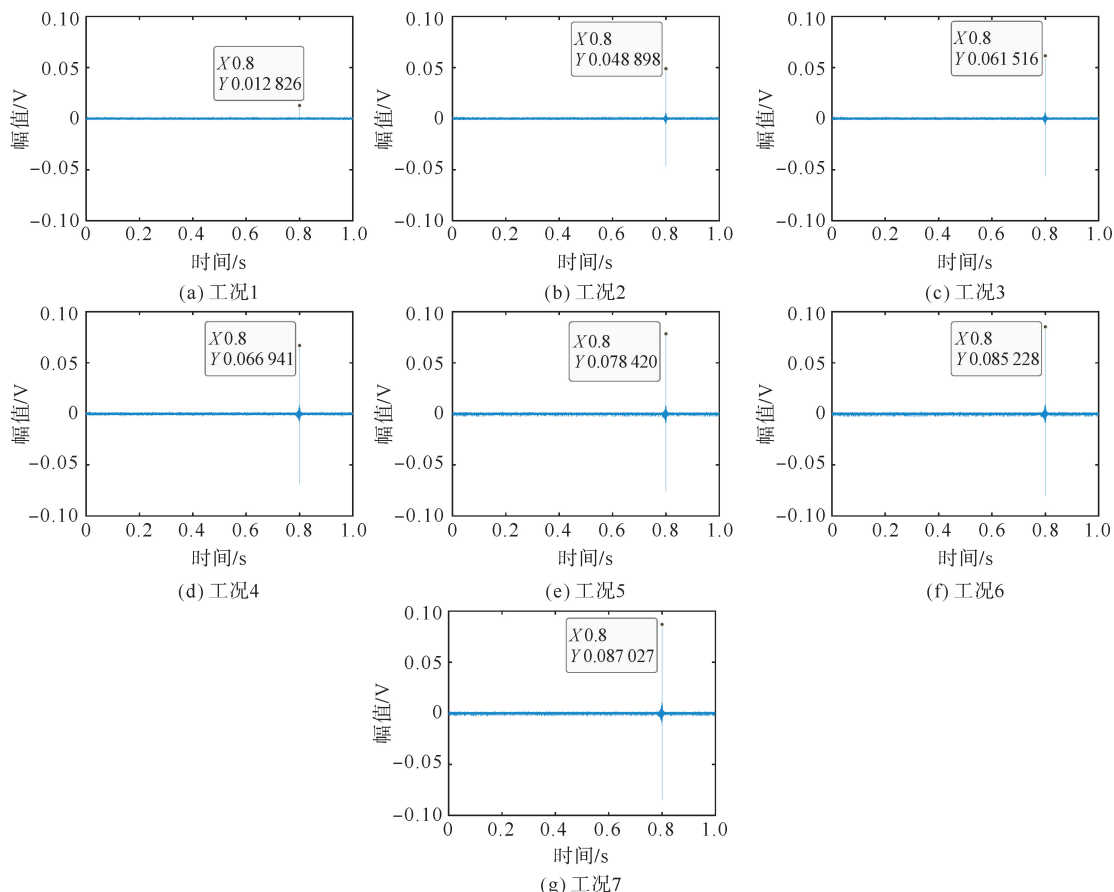


图 6 1 号螺栓在不同工况下的应力波聚焦信号峰值

由图6可知,在不同的工况下应力波信号形成了不同程度的聚焦,验证了时间反演技术的有效性。由图7可知,应力波聚焦信号峰值的大小随着扭矩的增加而增大,即法兰节点连接越紧密,PZT接收到的应力波聚焦信号峰值就越大。这证明了基于时间反演技术所获得的应力波聚焦信号峰值可以实现钢塔筒法兰节点螺栓松动的有效监测。

2.3 重复性试验

为了验证试验的可重复性,在逆时针编号的螺栓中随机选择7号、16号、18号螺栓进行和之前1号螺栓步骤一致的重复性试验,螺栓具体位置见图3。为了使试验结果便于分析,将1号、7号、16号、18号4根螺栓的应力波聚焦信号峰值进行归一化处理,如图8所示。

通过图8可以看出:随着扭矩值的增大,每根螺栓的应力波聚焦信号峰值均逐渐增大,节点连接越来越紧密,这与1号螺栓试验结果表现出一致性。结果表明,所提出来的基于时间反演技术的钢塔筒法兰节点连接状态的监测方法是有效且可重复的。

2.4 抗噪性试验

对1号螺栓通过金属棒摩擦钢塔筒引入噪声,验证所提方法的抗噪性,除噪声外,本试验所有条件均不变。进一步提取各工况下应力波聚焦信号峰值,绘制出有无噪声情况下,应力波聚焦信号峰值和扭矩的关系曲线,如图9所示。同一工况下有无噪声时应力波聚焦信号峰值的差值,如表3所示。

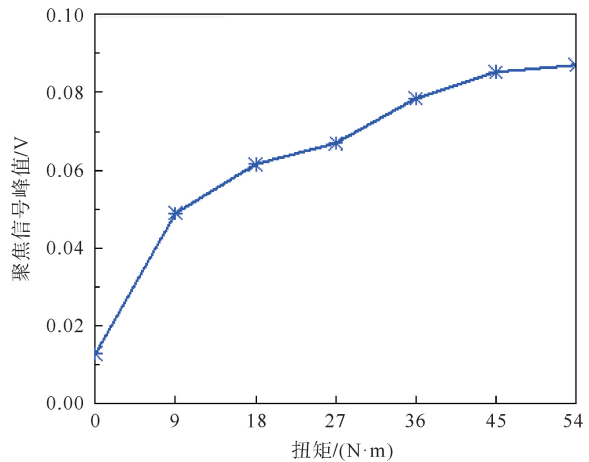


图7 1号螺栓在不同扭矩作用下聚焦信号峰值的变化

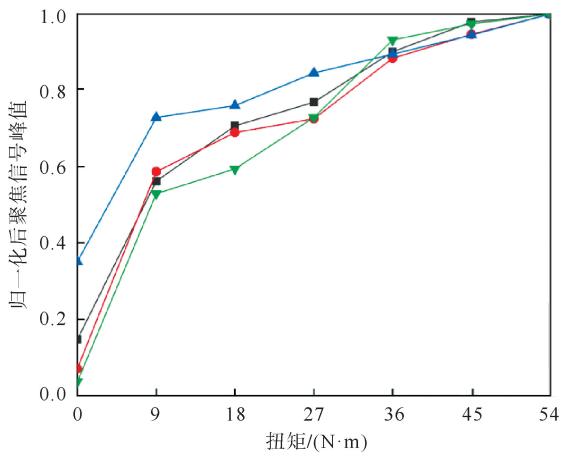


图8 4根螺栓的聚焦信号峰值的变化

—■—1号螺栓; —●—7号螺栓; —▲—16号螺栓; —▼—18号螺栓

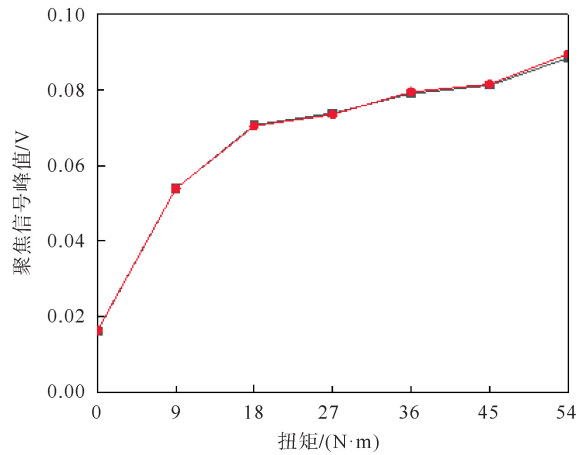


图9 1号螺栓抗噪性试验聚焦信号峰值的变化

—■—无噪声; —●—有噪声

表3 1号螺栓有无噪声时的聚焦信号峰值及其差值

聚焦信号峰值	工况						
	1	2	3	4	5	6	7
无噪声时	0.0162	0.0539	0.0708	0.0739	0.0791	0.0812	0.0885
有噪声时	0.0163	0.0539	0.0705	0.0736	0.0795	0.0815	0.0895
差值	0.0010	0	0.0003	0.0003	0.0004	0.0003	0.0010

由图 9 可知,有噪声时聚焦信号峰值变化曲线和无噪声时聚焦信号峰值变化曲线多处接近,甚至重合;同时,应力波聚焦信号峰值都随着扭矩值的增大而增大,进一步验证了时间反演技术的可重复性。表 3 结果表明两者的差值在误差允许范围内,说明了时间反演技术具有一定的抗噪性。

### 3 结论

针对钢塔筒法兰节点连接螺栓松动的问题,提出了一种基于时间反演技术的钢塔筒法兰节点螺栓松动监测方法。钢塔筒法兰节点连接螺栓发生松动时,靠近连接螺栓的上法兰盘与下法兰盘之间的接触面积随之减小,导致在 2 个压电陶瓷传感器(PZT)之间传递的应力波有相应的能量衰减,利用时间反演技术,监测 PZT 接收的应力波聚焦信号峰值降低,进而实现节点连接松紧程度监测。以一个缩尺风电钢塔筒法兰节点为试验模型,设置了 7 种扭矩工况以模拟螺栓所处的不同松紧程度,进行了有效性、可重复性和抗噪性试验。结果表明:利用时间反演技术,以所接收到的应力波聚焦信号峰值作为监测指标,可以实现对法兰节点连接螺栓不同松动状态的有效监测,并且具有良好的有效性、可重复性和抗噪性。该方法拓宽了时间反演技术在监测钢结构节点连接状态中的应用,相较传统的监测方法具有可以实现在线实时监测、不易受环境影响及自身抗干扰强等优点,具有良好的工程应用前景。

#### 参考文献(References):

- [1] 巫发明,杨从新,王青,等. 大型风电机组塔筒动态载荷识别研究与验证[J]. 振动与冲击,2020,39(20):197-203.  
WU Faming, YANG Congxin, WANG Qing, et al. Research and verification of dynamic load identification for a large wind turbine tower[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(20): 197-203.
- [2] 陈凯. 风电塔法兰螺栓松动对结构振动影响数值分析[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2019.  
CHEN Kai. Numerical analysis of the effect of flange bolt loosening on structural vibration of wind turbine tower[D]. Harbin: China Earthquake Administration. Institute of Engineering Mechanics, 2019.
- [3] 梁亚斌. 大跨斜拉桥的局部损伤监测和环境因素影响分离[D]. 大连:大连理工大学,2016.  
LIANG Yabin. Local damage detection and elimination of environmental effects for long-span cable-stayed bridge[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [4] LI D S, LIANG Y B, FENG Q, et al. Load monitoring of the pin-connected structure based on wavelet packet analysis using piezoelectric transducers[J]. Measurement, 2018, 122: 638-647. DOI: 10. 1016/j. measurement. 2017. 11. 014.
- [5] WANG F R, SONG G B. Bolt early looseness monitoring using modified vibro-acoustic modulation by time-reversal[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 130: 349-360. DOI: 10. 1016/j. ymssp. 2019. 04. 036.
- [6] 张全景,韩芳,陈天驰. 基于压电传感技术的木结构连接节点损伤识别[J]. 木材科学与技术,2022,36(1):63-67.  
ZHANG Quanjing, HAN Fang, CHEN Tianchi. Damage detection for timber structure joints based on piezoelectric sensing technology[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(1): 63-67.
- [7] 张媛,孙鹏文,李建东. 基于损伤力学的风力机塔筒法兰联接螺栓疲劳寿命分析[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版),2016,35(1):12-17.  
ZHANG Yuan, SUN Pengwen, LI Jiandong. Fatigue life analysis of flange connecting bolts for wind turbine tower based on damage mechanics[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 35(1): 12-17.
- [8] 汪正傲,王涛,李友荣,等. 基于螺母外侧压电材料阻抗峰值频率变化的螺栓松动监测[J]. 传感技术学报,2018,31(6):861-865.  
WANG Zheng'ao, WANG Tao, LI Yourong, et al. Bolt looseness monitoring based on the peak frequency shift of piezoelectric material on the nut[J]. Journal of Transduction Technology, 2018, 31(6): 861-865.
- [9] 党会鸿,孙清超,马跃,等. 考虑临界变形量变化的结合面法向接触刚度计算模型[J]. 大连理工大学学报,2015,55(4):373-379.  
DANG Huihong, SUN Qingchao, MA Yue, et al. Calculation model for normal contact stiffness of joint surfaces considering critical deformation change[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(4): 373-379.
- [10] MOHARANA S, ARUN V S. Piezo impedance-based monitoring of loosening of bolts: Experimental and numerical study[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2022, 33(8): 1056-1071.
- [11] WANG T, WEI D L, SHAO J H, et al. Structural stress monitoring base on piezoelectric impedance frequency shift[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2018, 31(6): 04018092.
- [12] YANG J Y, CHANG F K. Detection of bolt loosening in C-C composite thermal protection panels: I Diagnostic principle[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15: 581.