

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.004



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于小波包分析的输电塔螺栓松动损伤识别方法

桑硕, 余希洋, 李小华

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 高压输电铁塔结构健康监测对保证输电线路安全运行具有重要意义, 输电塔结构发生破坏时, 节点板螺栓首先会发生松脱, 有必要对节点板上的螺栓进行损伤识别。用 ABAQUS 有限元分析软件建立输电塔结构多尺度模型, 利用小波包变换, 引入小波包能量变化率作为损伤识别指标, 提取出螺栓周围测点的动应变数据, 对塔腿处一块节点板螺栓松动的不同工况进行损伤识别; 以基于物联网技术的传感器为信号传输设备, 利用高精度的 PVDF 压电薄膜应变片为数据采集设备, 在实际输电塔结构底部施加激励荷载, 提取节点板上测点的动应变对该损伤识别方法进行试验验证。结果表明, 该损伤识别指标对测点附近的螺栓松动较敏感, 并且在所有测点处的最小值能较好地识别出节点板的损伤程度。

关键词: 输电塔; 小波包; 多尺度分析; 压电薄膜; 损伤识别

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)03-0152-09

Damage identification of bolt looseness in transmission tower based on wavelet packet analysis

SANG Shuo, YU Xiyang, LI Xiaohua

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The structure health monitoring of high voltage transmission tower was very important to ensure the safe operation of the transmission line. When the transmission tower structure was damaged, the gusset plate bolts would be loosened first. The multiscale model of the transmission tower structure is established by using ABAQUS finite element analysis software. The energy change rate of the wavelet packet was taken as the damage index. The damage identification was carried out under different working conditions when bolt looseness of a joint plate at the tower leg. The signal transmission equipment was a sensor based on Internet of Things technology. The data acquisition equipment was PVDF piezoelectric film strain gauge. Applying excitation loads at the bottom of the actual transmission tower structure, the dynamic strain of the measured points on the gusset plate was extracted to verify the damage identification method. The test results show that the damage index can accurately identify the damage degree of the gusset plate. It is also sensitive to bolt looseness near the measuring point.

Keywords: transmission tower; wavelet packet; multiscale analysis; piezoelectric film; damage identification

收稿日期: 2021-09-27

基金项目: 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0254)

作者简介: 桑硕(1997-), 男, 主要从事结构健康监测研究, E-mail: a1424787589@163.com。

李小华(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: lixiaohua@cqu.edu.cn。

Received: 2021-09-27

Foundation item: Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2019jcyj-msxmX0254)

Author brief: SANG Shuo (1997-), main research interest: structure health monitoring, E-mail: a1424787589@163.com.

LI Xiaohua (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: lixiaohua@cqu.edu.cn.

输电塔在电力系统中扮演着重要的角色,其运行状态直接影响整个电网系统的运行稳定性。在风荷载的长期作用下,节点板上螺栓会产生振动并导致松动,这将造成节点的螺栓发生损伤。如果不能及时发现上述现象,节点的损伤会继续发展甚至在强风作用下导致输电塔倒塌^[1-3]。螺栓松动是最终导致杆塔变形或倒塔的主要因素,杆材形变是杆塔结构整体稳定性遭受破坏的直观体现,因此,及时对节点板处的螺栓松动损伤程度进行识别具有重要的意义。

结构在发生损伤后会引引起振型、频率和阻尼等模态参数的变化,由结构施加动荷载得到的振动信号中含有能够反映出损伤信息的非平稳成分。基于小波分析的方法对结构损伤具有更好的灵敏度和鲁棒性,在结构检测中得到了广泛应用^[4-7]。小波包变换可以依据信号的特征选取分解频带,并能对非平稳信号进行局部化分析,因此小波包变换在结构健康监测领域中具有光明的运用前景。Sun等^[8]利用小波包变换将重复脉冲作用下获得的信号进行分解得到小波包分量能量,然后构建损伤指标进行损伤诊断,结果表明该指标受噪声的影响较小,可应用于实际结构的在线健康监测。韩建刚等^[9]利用小波包能量变化率指标对一连续梁进行试验并识别损伤,结果表明该指标对结构的损伤比较敏感并且可以判断出损伤位置。Diao等^[10]利用小波熵在损伤和未损伤的工况下的曲率差值构建了损伤指标,然后用某海洋平台进行了地震下的数值模拟和模型试验,结果表明该指标识别效果较好而且对噪声敏感性较低。罗辉等^[11]利用小波包能量谱构造损伤指标对盾构隧道结构进行了数值模拟和试验验证,结果表明该指标可以准确地识别出损伤位置。王鑫等^[12]利用小波包分解构建了两个损伤指标,分别用其对西安钟楼木结构用有限元进行损伤识别,结果表明两指标均能较好地识别出损伤并具有一定的抗噪性。目前的研究对象大多是整体结构下的损伤识别分析,没有把小波包能量方法应用到结构中部分构件的损伤识别。为了验证小波包能量在上述问题的可应用性,构建了小波包总能量变化率为损伤指标,对输电塔节点板螺栓松动进行损伤识别,并进行输电塔模型试验,进一步验证小波包分解在输电塔结构健康监测中的适用性。

1 输电塔结构的损伤识别指标

1.1 小波包分析

小波包是由一个函数族构造出来的 $L^2(R)$ 的规范正交基库,从中选取 $L^2(R)$ 的很多组规范正交基,

比如,常用的小波正交基就是从其中选取的。这一族函数就是小波包系,它在时域和频域上宽度之积很小并且具有紧支性。定义小波包分解的推广二尺度方程为

$$\begin{aligned}\omega_{2n}(t) &= \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \mathbf{h}(k) \omega_n(2t-k) \\ \omega_{2n+1}(t) &= \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \mathbf{g}(k) \omega_n(2t-k)\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $\mathbf{h}(k)$ 为尺度向量; $\mathbf{g}(k)$ 为小波向量;当 $n=0$ 时, $\omega_0(t)=\phi(t)$, $\omega_1(t)=\varphi(t)$,定义函数集 $\{\omega_n(t)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 由 $\omega_0(t)=\phi(t)$ 确定的小波包。

1.2 小波包能量及损伤识别指标

在外部荷载激励作用下,结构损伤后的信号可以通过传感器提取出来。采用数值模拟与模型试验的方法来研究节点板螺栓的损伤识别,即在外界某一恒定的环境荷载激励下提取出节点板螺栓附近各测点单元的动应变,并运用小波包分解对信号进行 j 层分解,得到了 2^j 个等宽频带的子信号,然后依据频率从低到高提取出各频率成分的信号。

对振动响应信号 $f(t)$ 进行 j 层小波包分解可表示为

$$f(t) = \sum_{j=1}^{2^j-1} f_{j,i}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,i,k} \psi_{j,i,k}(t) \quad (2)$$

式中: i, j, k 均为正整数,分别为调制参数、尺度参数、平移参数; $c_{j,i,k}$ 为小波包系数, $c_{j,i,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,i,k}(t) dt$; $\psi_{j,i,k}(t)$ 是一组标准正交基,故当 $m \neq n$ 时,有

$$\psi_{j,m,k} \psi_{j,n,k} = 0 \quad (3)$$

选择第 i 层小波包进行重构,利用分解系数 $i=1, 2, \dots, 2^j$,重构小波包分解系数,获取每个频带范围内的信号。以 $f_j^i(t)$ 代表 $p_j^i(t)$ 的重构信号,以此类推。则总信号 $f(t)$ 可表示为

$$f(t) = \sum_{j=1}^{2^j} f_j^i(t) \quad (4)$$

然后,求各个频带信号的能量。令第 i 个频带的能量为 E_j^i , A_{ik} 为重构信号 $f_j^i(t)$ 各离散点的幅值, n 为离散点的个数,其中 $i=1, 2, \dots, 2^j$; $k=1, 2, \dots, n$ 。则

$$E_j^i = \int_0^T |f_j^i(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n A_{ik} \quad (5)$$

式中: T 为采样的时间。

则小波包节点能量 E 为

$$E = [E_j^1, E_j^2, E_j^3, \dots, E_j^{2^j}], \quad i=1, 2, \dots, 2^j \quad (6)$$

把这个频带上的所有能量分量加起来,即得到小波包总能量 E_j 。

$$E_t = \sum_i E_i \quad (7)$$

最后构建的损伤指标为小波包总能量变化率^[13] (The Change Rate of Total Energy, 简称RES)。

$$RES = \frac{E_{t,d}}{E_{t,u}} \quad (8)$$

式中: $E_{t,u}$ 为完好结构的小波包总能量; $E_{t,d}$ 为发生损伤结构的小波包总能量。

2 数值模拟

2.1 输电塔多尺度模型的建立

为了更好地对输电塔结构的节点螺栓损伤进行监测并兼顾试验验证, 选取自行设计并制造的小型输电塔, 输电塔实物图如图1所示。该输电塔总高4.485 m, 塔身主材及斜材采用Q235钢, 节点板采用Q345钢, 螺栓均采用M12高强螺栓。塔身的主材、斜材等通过节点板和螺栓连接成节点, 杆件的材料都为角钢, 钢材的弹性模量为 2.00×10^5 MPa, 密度为 7850 kg/m^3 , 泊松比为0.3。



图1 输电塔实物图

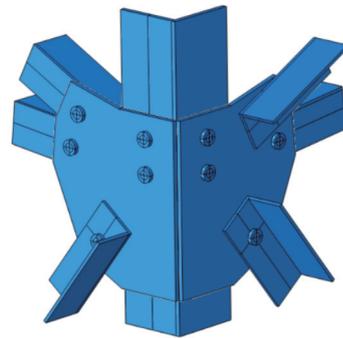
Fig. 1 Front view of transmission tower

为了研究节点螺栓的损伤识别效果, 利用ABAQUS有限元软件建立包含节点精细化模型的输电塔多尺度模型, 节点板实物图和局部精细化有限元模型如图2所示。局部三维结构包括1根主材、6根斜材、2个节点板和10颗螺栓, 均采用实体单元进行模拟, 而其他区域则采用梁单元进行模拟。在实体螺栓上施加10 kN的预紧力, 当模拟损伤的工况时, 则考虑螺栓的状态为已经发生松脱, 即预紧力已经降低为零。为了使不同的单元能够协调分析, 通过定义耦合关系将杆件实体单元部分和梁单元部分连接在一起。由于实际输电塔的塔腿与基础是焊接起来的, 因此底部采用固定约束, 杆件与节点板及螺栓之间均采用面对面接触定义。

最终, 建立起来的输电塔多尺度有限元模型如图3所示。



(a) 实物图



(b) 有限元模型

图2 节点板实物图和局部精细化有限元模型

Fig. 2 Physical diagram of gusset plate and fine finite element model

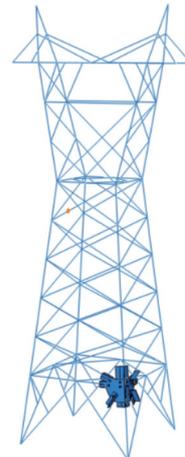


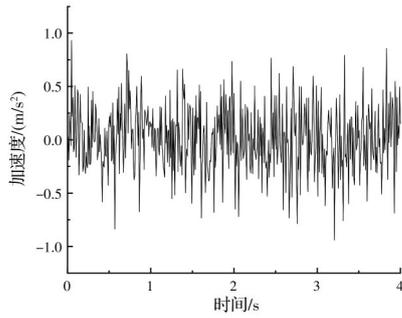
图3 输电塔多尺度有限元模型

Fig. 3 Multiscale finite element model of transmission tower

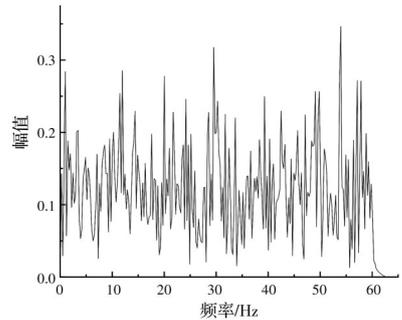
2.2 施加荷载与测点选取

为了模拟环境噪声的作用, 在模型底部施加白噪声加速度荷载。该白噪声的持续时间为4 s, 频率范围为0~60 Hz, 分析步长为0.008 s, 时域和频域图如图4所示。

由于研究的是一块节点板上螺栓松动的损伤识别, 因此用于信号提取的5个测点分别位于5个螺栓的附近, 螺栓编号与测点的具体位置如图5所



(a) 时域图



(b) 频域图

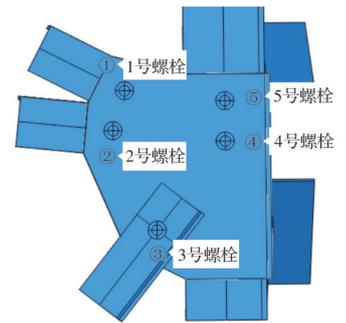
图 4 白噪声激励的时程曲线和频域图像

Fig. 4 White noise excitation time history curve and frequency domain image

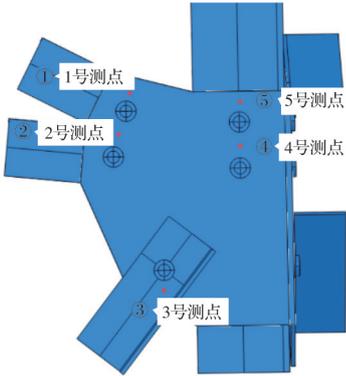
示。为了初步判断时域信号是否可以直观地观察到损伤及程度,选取测点 2 处的 3 种不同的工况分别为无损伤、2 号螺栓发生松动的轻度损伤和 1 号、3 号和 5 号 3 颗螺栓发生松动的重度损伤,测点 2 提取出来的 3 种不同损伤工况下的动应变如图 6 所示。由图 6 可以看出,仅仅通过观察提取信号的动应变时程曲线很难直观地识别出节点板螺栓的损伤程度,因此采用小波包总能量变化率 RES 来识别损伤。

2.3 基于小波包能量的损伤识别

目前利用环境振动的损伤识别方法主要有基于模态参数和基于实测时域信号的方法。损伤引起的物理特性(如质量、阻尼和刚度)的变化将引起模态特性变化,如频率、振型、曲率模态、柔度和应变能等,这些特性都可以被检测到。结构频率对损伤的敏感性较低,只能反映出结构整体的损伤,对局部损伤的位置判断能力较差,不能反映出结构的损伤程度,因为与环境 and 操作条件引起的变化相比,损伤引起的频率变化相对较小^[14]。对振型法和曲率模态法来说,高阶振型对局部损伤比较敏感,但是在环境荷载条件下高阶振型相比于低阶振型很难获得,限制了其应用。曲率模态法会受到应力集中的影响,导致其对损伤部位不敏感,同时对应变片数量和布置的要求比较高。柔度法在应用时得到的模态振型需要进行质量矩阵归一化处理,然



(a) 螺栓编号



(b) 测点位置

图 5 螺栓编号和测点位置

Fig. 5 Bolt number and measuring point position

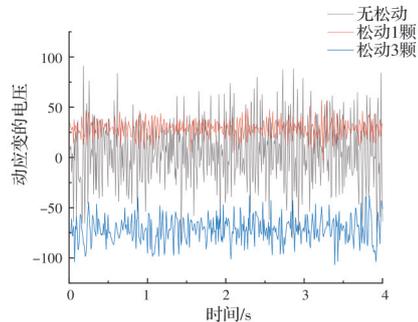


图 6 测点 2 动应变

Fig. 6 Dynamic strain of measuring point 2

而,对于一些大型结构,环境激励不足以实测出结构的质量归一化振型,使其在实际的应用受到限制^[15]。基于实测时域信号的识别方法以小波变换和 Hilbert-Huang 变换为代表,其不需要建立实测结构的有限元模型,只需要通过对比损伤前后利用动力响应数据构建的损伤识别指标即可确定结构的健康状态,并且对应变片的数量和布置的要求并不高,大大提高了损伤识别的效率,有着广阔的应用前景。研究对象为输电塔节点板上的螺栓松动,属于局部损伤,并且在环境荷载条件下难以获得高阶振型,这限制了其采用基于模态参数的损伤指标,因此,采用灵敏度较高的小波包分解构建的损伤识别指标。

利用 ABAQUS 隐式动力学分析,提取出各个

测点的动应变-时间信号,然后将提取到的信号带入MATLAB进行小波包分解,并计算出小波包总能量,最后算出损伤识别指标RES。其中,小波基函数的选取要考虑消失矩和紧支撑性两个方面,并且根据信号的类型来选择。综合上述因素,小波包函数选择Db20,分阶层数为6层,最后可得到64组小波包能量值并求和^[16]。最终算出的5个测点在无损伤工况下的小波包总能量从测点1到测点5依次排

序为 8.30×10^{-11} 、 3.63×10^{-12} 、 2.72×10^{-12} 、 1.88×10^{-11} 和 8.44×10^{-11} ,通过控制节点板上螺栓的预紧力来模拟螺栓松脱所产生的损伤,总共分析了28种工况,计算出每种工况提取出来的时域信号的小波包总能量,然后除以无损伤工况时的小波包总能量即得到了每种工况下的RES指标。最后,5个测点在所研究工况下求出的损伤识别指标RES如图7所示。

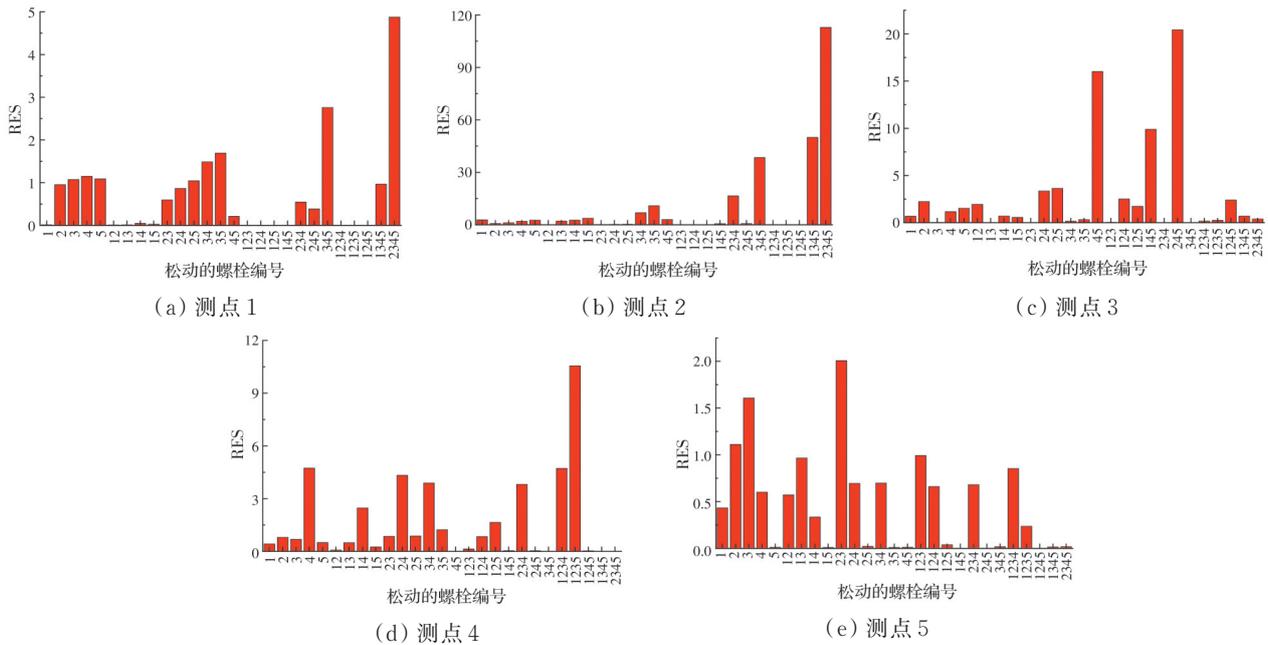


图7 5个测点所求得模拟的损伤识别指标

Fig. 7 The simulated damage identification index obtained from five measuring points

由图7可以发现,测点2对1号和2号螺栓同时松动的情况比较敏感,当其二者同时松动时,损伤识别指标RES会变得很小,可以与其他工况区分开来。同样地,根据测点3和测点4的结果也可以得出,测点3对3号螺栓是否松动比较敏感,测点4对4号和5号螺栓同时松动比较敏感,其RES指标都会变得很小并且可以和其他工况区别开来。

但是仅仅通过上述结论不能判断出节点板的损伤程度,因此需要把5个测点得到的指标综合起来分析。测点周围的螺栓发生松动后,该测点得到的指标RES值会变小。当松动的螺栓数量变多即损伤程度更严重时,节点板会与输电塔主体结构的连接更加薄弱,测点受到的振动即测得的动应变变化会变得更小,该测点的损伤识别指标RES值也变得更小,因此,可以得出在上述所有工况下5个测点RES的最小值可以区分出节点板的损伤程度,如图8所示。定义损伤1颗或2颗螺栓为轻度损伤,损伤3颗或4颗螺栓为重度损伤。由图8每种工况的最小值可以看出,轻度损伤的RES指标要大于重度损

伤,并且可以清晰地区分两种损伤程度,即当 $0.01 < RES < 1$ 时,为轻度损伤状态,当 $RES < 0.01$ 时,则为重度损伤状态。因此该损伤指标RES可以较好地对节点板上螺栓的损伤程度进行识别。

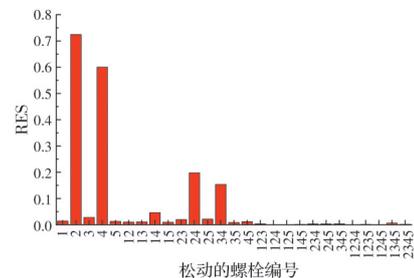


图8 5个测点中识别指标的最小值

Fig. 8 Minimum value of identification index in five measuring points

3 试验验证

3.1 输电塔试验装置

输电塔结构试验采集装置由无线传感器装置节点、压电应变片、天线和防湿接头等组成,其示意

图和工作状态如图 9 所示。该装置是目前最智能的基于无线 Zigbee 技术的传感器节点,低功耗,大容量的数据存储,超远的通讯距离,包含简易控制装置,可以控制低功率的电磁阀,实现野外长期无人值守工作。再搭配物联网网关进行信号接收,采集频率高达 125 Hz,将采集到的电荷信号转换为与应变成正比的电压信号,并可以快速地传输到电脑端。

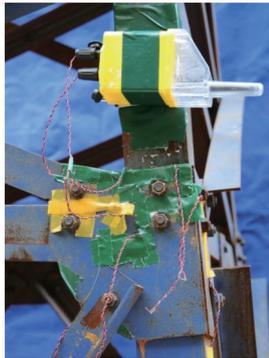


图 9 无线传感器节点工作图

Fig. 9 Wireless sensor node and working diagram

PVDF 压电薄膜应变片具有灵敏度高、频率范围广、化学稳定性良好、质地柔软、机械强度与韧性强、响应速度快和密度小质量轻等优点,其逐渐成为广泛推广的一种新型智能无线传感器^[17]。由于试验的目的是对比节点板上螺栓松动前后测点动应变的变化,根据模拟可得节点板上的应变单位为微应变级别,如果采用传统的电阻应变片无法采集到微应变数据,因此,试验采用高精度的 PVDF 压电薄膜应变片。目前利用小波包能量方法进行螺栓的损伤识别的研究集中于基于压电陶瓷的主动监测技术,并且研究对象多数是钢框架及钢板,还没有对输电塔节点板进行研究,并且其需要同时有发出信号的驱动器和接收信号的传感器,因此基于压电陶瓷的主动监测技术只能间歇式进行螺栓检测,无法实现无人值守的长期实时监测。而基于压电薄膜传感器的监测方式可以随时采集应变数据储存并传输到数据接收端,为实现未来无人值守的实时健康监测提供了路线。

该试验采用由德国生产的电动力、长冲程的 APS420 激振器,其工作原理是内部一个较重的质量块通过加速度运动来产生激励,可以以最小的激振器质量和驱动功率为谐振负载提供动力,激振器实物图如图 10 所示。该激振器具有信号输入端,可以通过信号转换器输入任意波形的信号,并按照指定的信号进行激励。

3.2 施加荷载与测点数据提取

为了使输电塔结构振动并且和模拟的激励方

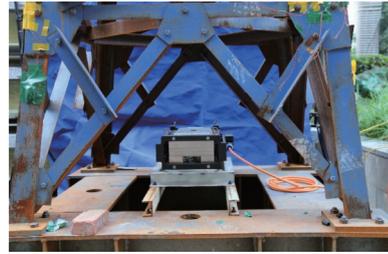
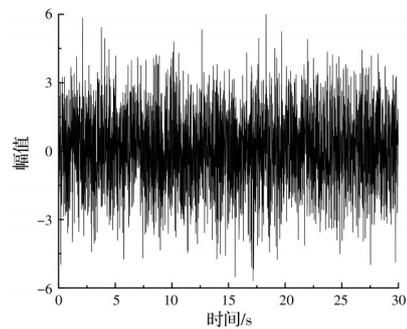


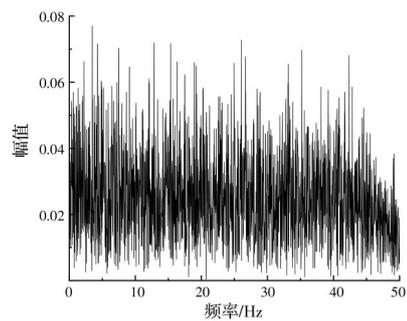
图 10 激振器实物图

Fig. 10 Physical drawing of vibration exciter

式相对应,激振器通过底座和基础相连接,产生纵向方向的激振力。为了采用小波包能量方法进行损伤识别,在试验过程中,节点板螺栓发生损伤前后的激振力保持不变^[9]。为了与模拟情况下的螺栓松动相对应,采用扭矩扳手对节点板上的螺栓施加预紧力,在螺栓松动工况时,把螺栓拧松至预紧力为零。由于该试验模拟的条件为环境噪声下,因此采用白噪声激励,通过信号转换器输入控制台中,其持续时间为 30 s,频率范围为 1~50 Hz,时间步长为 0.002 5 s,时域和频域图像如图 11 所示。



(a) 时域图



(b) 频域图

图 11 输入激振器信号的时域和频域图

Fig. 11 Time domain and frequency domain diagram of input vibration exciter signal

该试验的研究对象是一块节点板上的螺栓松动并且要和模拟对应起来进行验证,因此应变片的粘贴位置和序号与图 5 所示的位置相同,具体贴片位置如图 9 所示。输入激振器的激励持续时间为 30 s,考虑结构开始响应的延迟时间,试验采用中间

部分 22 s 时间段的振动数据。将同一种工况下相同激励测得的信号进行小波包分解求出小波包总能量,并进行试验误差分析,结果发现相同工况下的能量误差均在 5% 以内,满足可用性要求。为了验证试验数据的合理可用性,把测点 2 处无损伤工况下实测得的数据与数值模拟进行比较,将试验实测和数值模拟提取的时域信号进行傅里叶变换,得出的试验和模拟的频域图如图 12 所示。通过图 12 可以看出,两者的频域峰值较为接近,即在 30 Hz 左右两者均出现了峰值,因此,可以采用试验验证的方法来验证模拟结果的合理可靠性。同样为了判断时域信号是否可以直观地观察到损伤及程度,选取和上述模拟相同的 3 种工况,测点 2 提取出来的 3 种不同损伤工况试验下的动应变如图 13 所示。同样地,由图 13 可以看出,仅仅通过观察试验提取到的振动信号很难直观地判断出节点板螺栓的损伤程度,因此采用损伤指标 RES 来识别试验时节点板的损伤。

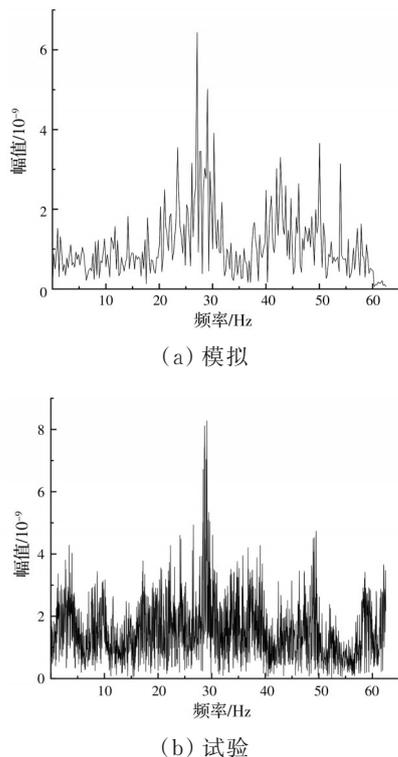


图 12 无损伤工况下测点 2 处模拟和试验频域图

Fig. 12 Frequency domain diagram of simulation and test at measuring point 2 under no damage condition

3.3 振动信号的损伤识别

在整个试验的过程中都采用相同的激励,试验时每种工况分别重复 3 次试验,提取出各个测点的动应变-时间信号,然后将提取到的信号带入

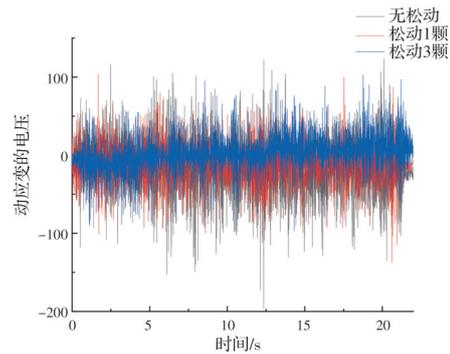


图 13 测点 2 的试验动应变

Fig. 13 Test dynamic strain of measuring point 2

MATLAB 进行小波包分解并计算出损伤识别指标 RES,最后求取 3 次 RES 的平均值即为最终结果。其中,小波包函数仍选择上述模拟所选取的 Db20,分解层数仍然是 6 层,得到 64 组小波包能量值并求和。由试验的振动信号算出的 5 个测点在无损伤工况下的小波包总能量从测点 1 到测点 5 依次排序为 4.83×10^6 、 6.60×10^6 、 1.60×10^7 、 6.37×10^6 和 2.55×10^7 。试验过程中通过扭矩扳手给螺栓施加预紧力,松动时则采用扳手拧松节点板上的螺栓致其松脱,总共分析了 28 种工况,共重复进行了试验激励及数据采集 420 次。同样地计算出每种工况提取出来的时域信号的小波包总能量,然后除以无损伤工况时的小波包总能量即得到了每种工况下的 RES 指标,然后求出 3 次相同试验的平均值。最后,5 个测点在试验工况下求出的损伤识别指标 RES 如图 14 所示。

由图 14 测点 2 的试验数据可以发现,当 1 号和 2 号螺栓同时松动时,损伤识别指标 RES 会变得比其他工况更小。根据测点 3 和测点 4 的结果也可以看出,3 号螺栓松动时,除 2、3、4、5 号螺栓松动的工况出现奇异值外,测点 3 的 RES 值比其他工况都要小;4 号和 5 号螺栓同时松动时,测点 4 的 RES 值也比其他工况更小。这跟模拟得到的结果较为一致,再次验证了测点对附近螺栓松动的敏感性。

当输电塔结构没有发生损伤时,测得的损伤识别指标 RES 理论值应为 1。由于在实际工程运用中或试验测量时有误差的存在,损伤指标会在某个小范围内波动,可能会引起节点板是否发生损伤的误判。为了解决上述问题,在无损伤工况下对 5 个测点分别进行了多次重复试验,并对采集到的动应变数据进行小波包分解得到损伤指标 RES,结果可得 RES 值的范围为 0.90~1.00。由图 14 可得 5 个测点在损伤工况下的 RES 值有较少一部分位于此区

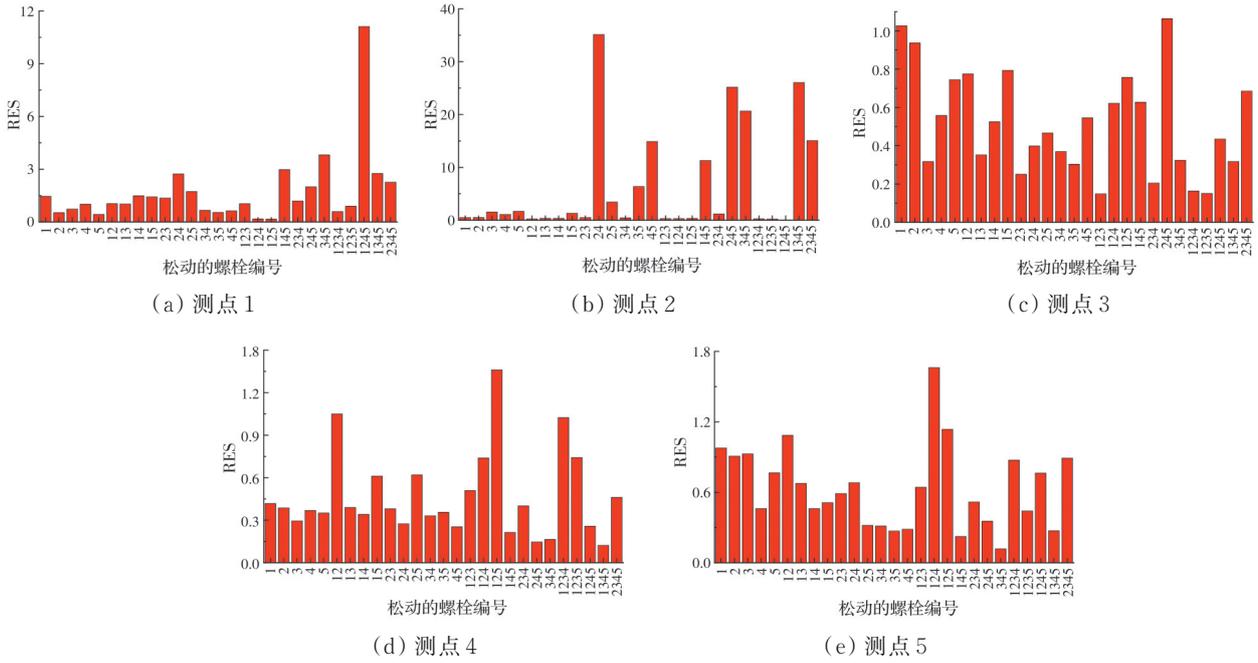


图 14 5 个测点所求得试验的损伤识别指标

Fig. 14 The damage identification index of the test obtained from five measuring points

间内,可以结合 5 个测点的数据来判断是否发生损伤,如果 3 个测点及以上的 RES 值位于此区间外,则说明节点板上的螺栓已经发生了松脱。

当判断节点板上螺栓的损伤程度时,需要把 5 个测点所得到的指标综合起来分析。根据数值模拟的结论,采用所有各个工况下的 5 个测点 RES 的最小值来判断损伤程度,如图 15 所示。由图 15 每种工况的最小值可以看出,除 2、3、4、5 号螺栓松动的工况试验出现奇异值外,轻度损伤下的 RES 指标整体都大于重度损伤并且可以区分两种损伤程度。奇异值的产生是由于当节点板上只剩螺栓 1 受力时右侧测点 4 的动应变会相应比原来增大,损伤指标 RES 值也增大。结果表明该损伤指标 RES 可以对节点板上螺栓是否松脱以及损伤程度进行识别,即当 $0.9 < RES < 1$ 时,为无损伤状态,当 $0.24 < RES < 0.9$ 为轻度损伤状态,当 $RES < 0.24$ 则为重度损伤状态。这也验证了模拟所得的结果可行。

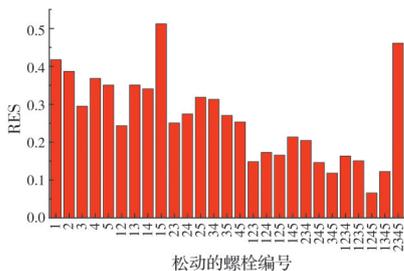


图 15 5 个测点中识别指标的最小值

Fig. 15 Minimum value of identification index in five measuring points

4 结论

1)建立了输电塔多尺度模型,在环境荷载作用下对输电塔结构进行螺栓松脱损伤识别,选取输电塔塔腿的一块节点板进行分析,结果表明测点处的应变对其附近的螺栓是否发生松动较为敏感,并把 5 个测点所得到的指标综合起来分析,得出所有工况下 5 个测点 RES 的最小值指标可以有效识别出节点板是否发生损伤以及损伤程度,即轻度损伤和重度损伤。

2)以自行制作的输电塔模型为试验对象,对数值模拟相对应的塔腿处一块节点板进行试验。结果验证了数值模拟中所得到的结论,即测点对附近螺栓松动的敏感性以及所有工况下 5 个测点 RES 的最小值指标的有效性,因此,在该节点板上的螺栓附近粘贴,5 个应变片测点可以有效地识别出节点板是否发生损伤以及损伤程度,为后续实现输电塔节点无人值守的健康监测奠定了基础。

参考文献

[1] 钟岱辉,李荣帅,王文明.输电塔-线体系灾变机理研究综述[J].四川建筑科学研究,2020,46(3):37-45.
ZHONG D H, LI R S, WANG W M. Review on disaster mechanism of transmission tower-line system [J]. Sichuan Building Science, 2020, 46(3): 37-45. (in Chinese)

[2] FU X, DU W L, LI H N, et al. Stress state and failure path of a tension tower in a transmission line under

- multiple loading conditions [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 107012.
- [3] 杨风利, 李正, 张大长, 等. 输电铁塔双螺母防松螺栓横向振动试验研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(10): 164-171.
- YANG F L, LI Z, ZHANG D C, et al. Experimental study on the transversal vibration of double-nut bolted joints of transmission towers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(10): 164-171. (in Chinese)
- [4] MA Q Y, SOLÍS M, GALVÍN P. Wavelet analysis of static deflections for multiple damage identification in beams [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 147: 107103.
- [5] DIAO Y S, MEN X, SUN Z F, et al. Structural damage identification based on the transmissibility function and support vector machine [J]. *Shock and Vibration*, 2018, 2018: 4892428.
- [6] RAZAVI M, HADIDI A. Structural damage identification through sensitivity-based finite element model updating and wavelet packet transform component energy [J]. *Structures*, 2021, 33: 4857-4870.
- [7] ZHAO B N, LEI D, FU J J, et al. Experimental study on micro-damage identification in reinforced concrete beam with wavelet packet and DIC method [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 210: 338-346.
- [8] SUN Z, CHANG C C. Statistical wavelet-based method for structural health monitoring [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(7): 1055-1062.
- [9] 韩建刚, 任伟新, 孙增寿. 结构损伤识别的小波包分析试验研究[J]. *振动与冲击*, 2006, 25(1): 47-50, 57, 164.
- HAN J G, REN W X, SUN Z S. Damage detection and identification of structures in laboratory based on wavelet packet analysis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 25(1): 47-50, 57, 164. (in Chinese)
- [10] DIAO Y S, ZHANG X C, SUN Z F, et al. Wavelet entropy based structural damage identification under seismic excitation [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(10): 105002.
- [11] 罗辉, 胡嫚嫚, 刘雨彤, 等. 基于小波包能量谱的盾构隧道结构损伤识别分析[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(Sup2): 306-314.
- LUO H, HU M M, LIU Y T, et al. Damage identification of shield tunnel based on wavelet packet energy spectrum [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(Sup2): 306-314. (in Chinese)
- [12] 王鑫, 孟昭博, 梁志闯. 基于小波包能量谱的西安钟楼木结构的损伤识别[J]. *应用力学学报*, 2020, 37(3): 1245-1252, 1403.
- WANG X, MENG Z B, LIANG Z C. Damaged identification of Xi'an bell tower wood structures based on wavelet packet energy spectrum [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(3): 1245-1252, 1403. (in Chinese)
- [13] 余印根, 夏樟华, 陈杨利, 等. 基于小波包总能量变化率的体外拉索损伤识别方法[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5): 683-688.
- YU Y G, XIA Z H, CHEN Y L, et al. Damage identification method of external cable based on the change rate of wavelet packet total energy [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(5): 683-688. (in Chinese)
- [14] LI Q Z, LI D S. Structure damage identification under ambient excitation based on wavelet packet analysis [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 842: 012023.
- [15] 赵一男, 公茂盛, 杨游. 结构损伤识别方法研究综述[J]. *世界地震工程*, 2020, 36(2): 73-84.
- ZHAO Y N, GONG M S, YANG Y. A review of structural damage identification methods [J]. *World Earthquake Engineering*, 2020, 36(2): 73-84. (in Chinese)
- [16] 文自刚. 随机激励下小波包能量谱的钢框架结构损伤识别研究[J]. *粉煤灰综合利用*, 2021, 35(1): 7-13.
- WEN Z G. Study for steel structures damage alarming based on wavelet packet energy spectrum [J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2021, 35(1): 7-13. (in Chinese)
- [17] 周刘聪, 罗健林, 李秋义, 等. PVDF薄膜压电传感特性及其在工程结构监测应用研究进展[J]. *功能材料*, 2018, 49(12): 12079-12083.
- ZHOU L C, LUO J L, LI Q Y, et al. Progress on PVDF film piezoelectric performances and its applications in infrastructure monitoring [J]. *Journal of Functional Materials*, 2018, 49(12): 12079-12083. (in Chinese)