

基于随机子空间和统计模型的输电塔损伤识别*

曹枚根¹, 杨婷婷^{2,3}, 王瑜⁴, 郑翀⁴, 周文松^{2,3}

(1. 北方工业大学土木工程学院 北京, 100144)

(2. 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室 哈尔滨, 150090)

(3. 哈尔滨工业大学土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室 哈尔滨, 150090)

(4. 国网温州供电公司 温州, 325000)

摘要 针对输电塔结构, 给出一种基于随机子空间结合统计模型的损伤诊断方法, 利用输电塔振动响应信号挖掘数据统计特征并构建高灵敏损伤诊断指标实现输电塔结构局部构件的损伤检测。首先, 获取输电塔结构的瞬态动力响应数据; 其次, 利用随机子空间法识别模态参数, 构造名义模态参数, 并定义一个与参数识别过程相关的残差向量表征结构动力参数变化; 最后, 计算该残差对结构参数的灵敏度, 并构造残差灵敏度的 χ^2 统计量作为结构损伤诊断指标。通过数值模拟及现场试验对某足尺输电塔结构进行分析, 结果表明, 上述方法可有效对输电塔结构局部构件的螺栓松动、杆件破坏等损伤进行识别。

关键词 输电塔; 结构振动; 随机子空间算法; 统计模型; 损伤识别

中图分类号 TB123

引言

在电力系统中, 输电塔担负着支撑输电导线、电力运输的重要功能, 其结构的安全运营对整个输电系统、社会经济和人民生命财产安全具有重要影响。然而, 输电塔在长期服役过程中会遭遇各种自然灾害^[1], 而且其本身材料老化以及动力荷载下的疲劳效应会进一步加深输电塔结构的损伤程度并减弱其结构抗力, 最终导致输电塔结构的突发性破坏^[2]。为了保障输电塔结构的安全持久运营, 亟需采用可靠方法评定已建成输电塔的运行状态, 尽早判别并修护潜在损伤^[3-7]。在各种损伤识别方法中, 由于结构振动信号易于测量, 因此基于振动信号的结构损伤识别方法是研究最早且应用最广的方法。Lifshitz 等^[8]将基于振动信号的模态分析应用于结构损伤识别, 其后经过多年的发展, 又有许多损伤识别方法被相继提出^[9-10]。早期的结构损伤识别方法直接利用包括频率、振型以及传递函数等在内的模态参数信息对结构进行分析, 根据结构模态参数变化推算出结构损伤。相较于其他模态参数, 频率信息更易获取, 且需要的传感器较少, 测点位置也相对独立。文献[11]利用频率变化进行损伤识别, 并将这

种方法应用于海洋平台的状态评估。相较于频率, 模态振型中的损伤信息更加丰富, 通过进一步构造指标, 可以对结构损伤进行定位^[12-13]。但是, 基于振型变化的损伤识别技术在应用中面临着测量振型不完整以及易受噪声干扰等问题, 一旦识别不到较为敏感的模态, 或模态识别结果误差较大, 会大幅影响损伤识别的精度。目前, 常用于识别输电塔结构损伤的方法种类很多, 如小波分析^[14-16]、互相关函数^[5]及 HHT^[17]等, 但这些研究仍存在一些问题, 如抗噪性较差、对小损伤不敏感及传感器布设数量较多等, 且大多仍处于理论研究阶段, 较少验证所提方法在实际结构下的适用性。基于统计理论的结构损伤识别方法考虑了实测数据的随机性, 可有效处理测量噪声及结构的不确定性, 提高损伤识别的精度^[18-22]。

笔者综合利用频率和振型两种结构模态参数, 结合统计模型, 给出一种对结构损伤敏感的识别指标。使用该方法进行未知工况的结构损伤识别时, 直接利用测量的结构响应数据构造的 Hankel 矩阵对损伤指标进行求解, 无需重复进行新的模态识别, 杜绝了多次模态识别极易引入的新误差。将通过数值模拟及现场试验对一实例输电塔结构进行损伤分析, 验证了该方法的有效性和可靠性。

* 国家电网公司科技资助项目(5200-201919121A-0-0-00); 浙江省电力实业总公司科技资助项目(CF058807002021006)

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2021-09-30

1 基于随机子空间算法的结构损伤识别方法

假定输电塔结构在服役期间未进入非线性阶段,其动力响应的稳态线性动力系统方程可描述为

$$\begin{cases} M\ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = v \\ Y = LZ \end{cases} \quad (1)$$

其中: M, C, K 分别为结构的质量、阻尼及刚度矩阵; Z 为结构对应全部自由度的位移向量; v 为外部作用力向量,对于大型工程结构,可简化为白噪声; Y 为测点对应自由度的位移向量; L 为测点位置矩阵。

对式(1)进行特征分析,得

$$\begin{cases} \det(\mu^2 M + \mu C + K) = 0 \\ (\mu^2 M + \mu C + K)\varphi_\mu = 0 \\ \Psi_\mu = L\varphi_\mu \end{cases} \quad (2)$$

其中: μ 为系统特征值; Ψ_μ 为输出特征向量。

对于式(1)中的动力模型,可转换为状态空间方程形式,并以 $1/\tau$ 的频率进行采样,可得到离散系统状态空间模型为

$$\begin{cases} X_{k+1} = FX_k + V_{k+1} \\ Y_k = HX_k \end{cases} \quad (3)$$

其中: F 为状态转移矩阵; H 为状态观测矩阵。

$$\begin{cases} X_k = \begin{bmatrix} Z(k\tau) \\ \dot{Z}(k\tau) \end{bmatrix} \\ Y_k = Y(k\tau) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} F = e^{L\tau} \\ L = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

$$H = \begin{bmatrix} L_a & 0 \\ 0 & L_v \\ -L_d M^{-1} K Z & -L_d M^{-1} C \dot{Z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

令 λ, φ_λ 分别为矩阵 F 的特征值及特征向量,即

$$\begin{cases} \det(F - \lambda I) = 0 \\ (F - \lambda I)\varphi_\lambda = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(2)中定义的系统模态参数可以从上述特征结构中计算得到,即

$$\begin{cases} \exp \tau \mu = \lambda \\ L\Phi_\mu = \varphi_\lambda = H\varphi_\lambda \end{cases} \quad (8)$$

假定阻尼为比例阻尼,即 $C = \alpha M + \beta K$,则系统特征向量为实数向量。将系统特征值 λ 及特征向量 φ_λ 进行组合,对所有 φ_λ 组成的矩阵进行堆栈运算,并将其与相应的 λ 组合成式(9)所示的形式,得到名义系统特征参数向量 θ ^[22]

$$\theta \triangleq \begin{pmatrix} \Lambda \\ \text{vec} \Phi \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中: Λ 为特征值 λ 组成的向量; Φ 为特征向量 φ_λ 形成的矩阵; vec 表示堆栈运算,即将特征向量矩阵 Φ 中的所有列向量头尾相连重组为单个列向量。

在笔者提出的结构损伤识别算法中, θ 将作为名义系统模态参数以表征系统的动力特性。该损伤识别算法主要原理为判断式(9)中系统名义模态参数 θ 是否发生改变,即假设首先识别得到无损结构名义模态参数为 θ_0 ,在得到一组新的数据样本后,结构的损伤识别问题等价于判别新数据所描述的结构状态与名义模态参数 θ_0 所描述的无损结构状态是否一致。在本研究中,将通过定义一个与参数识别过程相关的残差,并进一步求取残差灵敏度,根据灵敏度统计值的变化判断结构损伤与否。

在基于系统输出协方差的随机子空间算法中,为了估计系统模态参数,首先需要构造系统的可控性矩阵 C 和可观性矩阵 O 。假定特征向量 φ_λ 为式(3)对应状态空间的基向量,则可观性矩阵为

$$O_{p+1}(\theta) = (\Phi \quad \Phi\Delta \quad \dots \quad \Phi\Delta^p)' \quad (10)$$

其中: $\Delta = \text{diag}(\Lambda)$; $p+1$ 和 q 分别为Hankel矩阵的行数和列数。

为了判断给定的输出协方差序列 $(R_j)_j = E(Y_k Y_{k-i}^T)$ 所描述的系统状态是否与名义模态参数 θ_0 所描述的未损伤系统状态一致,定义判定准则^[22]为 $O_{p+1}(\theta_0)$ 与 $H_{p+1,q}$ (系统输出协方差矩阵所构造的Hankel矩阵)具有相同的核空间。

为定量表达该性质,首先需要估计结构的模态参数。利用式(10)重新计算可观性矩阵 $O_{p+1}(\theta_0)$,并通过奇异值分解(singular value decomposition,简称SVD)定义其核空间,即提取得到奇异值矩阵 S ^[22],满足

$$S^T O_{p+1}(\theta_0) = 0 \quad (11)$$

由式(11)可知,矩阵 S 与名义模态参数 θ_0 有关联且关系式并不唯一,即可认为二者互为函数关系,即可表示为 $S(\theta_0)$ 。根据式(12)是否成立可以判别 θ_0 与 $(R_j)_j$ 是否对应

$$S^T(\theta_0) H_{p+1,q} = 0 \quad (12)$$

假定已知参考状态下的名义模态参数 θ_0 和一组待诊断状态下的结构响应输出样本 Y_1, Y_2, \dots, Y_n ,若要判断参数是否改变即损伤是否发生,需要利用新的响应数据计算的 $\hat{H}_{p+1,q}$ 值并定义残余向量^[22]为

$$\zeta_n(\theta_0) \triangleq \sqrt{n} \text{vec}(S^T(\theta_0) \hat{H}_{p+1,q}) \quad (13)$$

令 θ 为结构在待诊断状态下的名义模态参数识

别值, E_θ 为残余向量的期望值, 由式(12)可知

$$E_\theta(\zeta_n(\theta_0))=0 \quad (\theta=\theta_0) \quad (14)$$

如果模态参数不发生改变, 则残余向量 $\zeta_n(\theta_0)$ 的期望值等于 0, 即可以理解为非零的期望等价于结构出现损伤。 $\theta=\theta_0$ 的判别要求 $\zeta_n(\theta_0)$ 的统计分布已知, 然而一般情况下该分布的先验知识难以提前获知, 因此需给出如下假设检验

$$\begin{cases} H_0: \theta=\theta_0 & (\text{健康}) \\ H_1: \theta=\theta_0+\delta\theta/\sqrt{n} & (\text{损伤}) \end{cases} \quad (15)$$

其中: 矢量 $\delta\theta$ 未知, 但为定值。

当 n 足够大时, 可假定 H_1 对应 θ 值为一个微小量, 则可以认为式(13)中的残余向量 ζ_n 近似服从高斯分布, 对于不同检验条件, 其值^[22]可近似表达为

$$\zeta_n(\theta_0) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \begin{cases} N(0, \sum(\theta_0)) & (H_0 \text{ 健康}) \\ N(J(\theta_0)\delta\theta, \sum(\theta_0)) & (H_1 \text{ 损伤}) \end{cases} \quad (16)$$

其中: $J(\theta_0)$ 为残余向量对结构模态参数的灵敏度; $\sum(\theta_0)$ 为残余向量的方差。

当系统名义模态参数 θ 发生微小改变 $\delta\theta$ 时, 结果将反映到残余向量 ζ_n 的改变上, 且此时 $J(\theta_0)$ 和 $\sum(\theta_0)$ 不依赖于 n 和 $\delta\theta$ 。

假定 $\hat{J}, \hat{\Sigma}$ 分别为 $J(\theta_0)$ 和 $\sum(\theta_0)$ 的一致性估计, 那么残余向量 ζ_n 是否为 0 的判断问题即等价于式(15)中的假设检验问题。

$$\chi^2 \triangleq \zeta_n^T \hat{\Sigma}^{-1} \hat{J} (\hat{J}^T \hat{\Sigma}^{-1} \hat{J})^{-1} \hat{J}^T \hat{\Sigma}^{-1} \zeta_n \quad (17)$$

利用式(17)中的检验关系可得到 χ^2 的计算值, 与设定好的损伤阈值进行对比, 即可判断结构是否发生损伤。

2 损伤识别方法数值模型验证

2.1 有限元模型建立

为验证上述算法的有效性, 笔者将该算法应用于输电塔数值模型。输电塔模型根据实际结构建立, 整塔高度为 12.7 m。铁塔的杆件均为角钢, 主体结构为 4 根竖向主杆, 主杆件之间由横杆、斜弦杆及水平弦杆进行连接, 主杆与其他杆件采用钢板连接, 而弦杆交叉处采用螺栓连接。主杆可分为上、下两部分, 其中下部主杆采用 Q420 钢材, 上部主杆及主要弦杆采用 Q345 钢材, 次要弦杆采用 Q235 钢材。利用 ANSYS 软件对输电塔结构进行有限元模型重建, 如图 1 所示。塔身竖向主杆及主要弦杆通过 BEAM188 单元进行模拟, 次要腹杆通过 LINK180

单元进行模拟, 整个有限元模型包括 547 个单元和 245 个节点。进一步对模型进行模态分析, 提取前 3 阶振型如图 2 所示, 分别为沿横线路方向 (x 向) 振动、沿顺线路方向 (y 向) 振动及扭转振动。

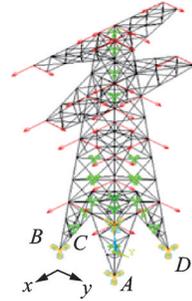


图 1 输电塔有限元模型

Fig.1 The finite element model of transmission tower

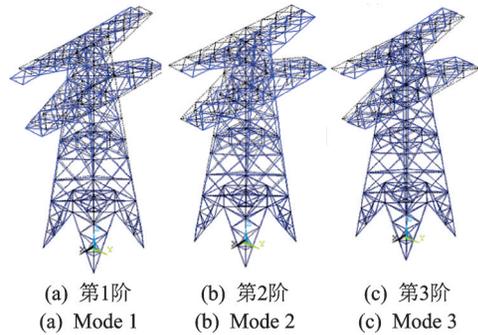


图 2 前三阶振型图

Fig.2 The first three mode shapes

笔者使用高斯白噪声信号模拟环境激励, 并施加在塔身主要节点上。通过删除单元或单元刚度折减模拟损伤, 共设置 8 组损伤工况, 分别为删除塔身的 3 组杆件单元以及对主杆 4# 单元设置 10%~50% 的刚度折减, 输电塔损伤工况如表 1 所示。测点 $N_1 \sim N_9$ 沿 D# 主杆均匀布置, 损伤单元及测点位置如图 3 所示。动力加载模拟过程中采样频率为 200 Hz, 采样时间为 5 min, 模拟采集 x, y 方向加速度信号。考虑到实际采集数据将受到环境噪声的影

表 1 输电塔损伤工况

Tab.1 The damage cases of transmission tower		
工况	损伤单元号	损伤模拟
1	91,105,113,117	拆除
2	141,145	拆除
3	78,81,85,90,149,154,158,161	拆除
4	4	10%
5	4	20%
6	4	30%
7	4	40%
8	4	50%

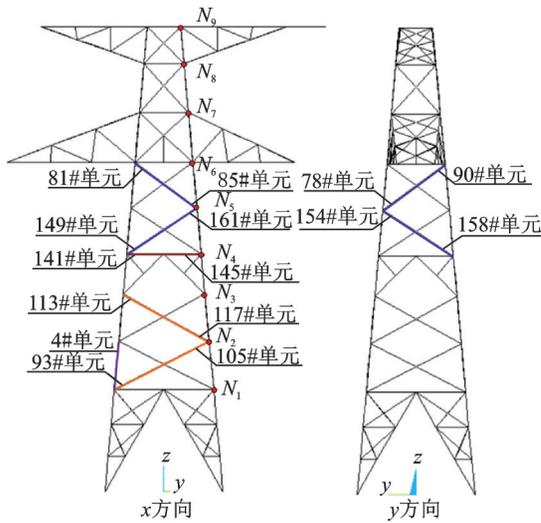


图3 损伤单元及测点位置

Fig.3 The location of damage unit and measuring points

响,因此在模拟的加速度信号中添加信噪比为 20 dB 的噪声。为验证所提损伤识别方法的有效性,同时模拟了无损状态下的结构动力响应作为对照组,其中 N_1 测点的加速度响应时程曲线见图 4。

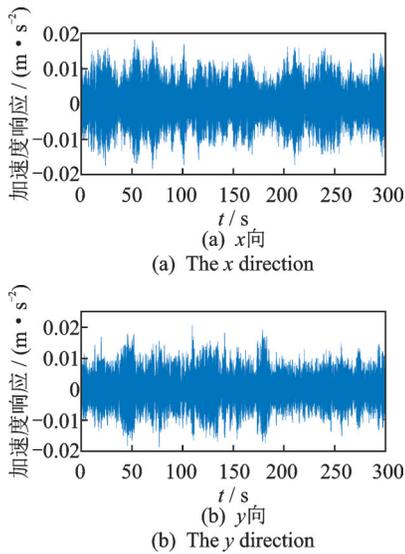


图4 N_1 测点的加速度时程曲线

Fig.4 The acceleration time history curves of point N_1

2.2 损伤敏感性分析

所提损伤识别算法的主要过程如下:①基于结构安全状态的加速度响应数据,采用随机子空间方法对结构进行模态分析,得到结构名义模态参数 θ_0 ;②计算残余向量 $\zeta_n(\theta_0)$ 的灵敏度 $J(\theta_0)$ 和 $\sum(\theta_0)$ 的一致性估计 \hat{J} 和 $\hat{\Sigma}$;③计算损伤状态数据的残余向量;④计算 χ^2 值,判断结构是否发生损伤。

首先,使用各测点 x 向及 y 向的加速度数据识

别输电塔结构的模态参数,稳定图识别模态参数结果如图 5 所示,频率及阻尼比识别结果如表 2 所示。可以看出,频率识别误差最大为 2.01%,可较好地识别结构前 3 阶模态信息,各阶振型的模态置信度(modal assurance criterion,简称 MAC)均超过 99%。

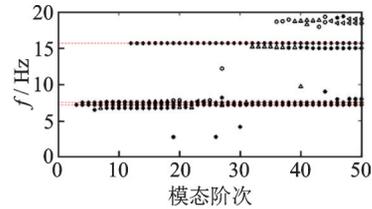


图5 稳定图识别模态参数结果

Fig.5 The modal parameter identification results in the stability diagram

表 2 频率及阻尼比识别结果

Tab.2 The identification results of frequency and damping ratio

阶次	振动频率/Hz		误差/%	阻尼比	MAC/%
	有限元计算	SSI识别			
1	7.250	7.215	0.490	0.014 1	99
2	7.544	7.537	0.099	0.014 0	99
3	16.044	15.722	2.010	0.017 5	100

对于前文设置的试验塔的 8 种损伤工况,利用随机子空间法对不同工况下考虑噪声的加速度信号进行分析,可得到各工况损伤发生时的结构损伤频率变化,如表 3 所示。结果分析可知:非主杆上杆件单元拆除工况对于第 3 阶频率更加敏感,而主杆单元损伤在第 1、第 2 阶频率上变化率更大,且随着损伤程度的加深而逐渐变大;除前 3 种工况的第 3 阶频率出现超过 6% 变化,其余损伤工况下频率变化均较小。

基于得到的模态参数,进一步利用所提损伤识别算法进行分析。考虑到噪声对所提方法的干扰,

表 3 结构损伤频率变化

Tab.3 The frequency variation of damaged structure

工况	1 阶		2 阶		3 阶	
	f/Hz	变化率/%	f/Hz	变化率/%	f/Hz	变化率/%
1	7.177	0.405	7.507	0.307	14.651	6.815
2	7.182	0.328	7.523	0.095	14.691	6.563
3	7.203	0.038	7.522	0.116	14.663	6.741
4	7.194	0.169	7.510	0.278	15.730	-0.044
5	7.172	0.465	7.489	0.546	15.731	-0.052
6	7.141	0.899	7.470	0.809	15.727	-0.027
7	7.095	1.540	7.446	1.121	15.721	0.009
8	7.031	2.431	7.427	1.371	15.727	-0.025

同时对无噪声与有噪声的数据进行对比分析,损伤指标识别结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出:结构处于完好状态时,有无噪声下的损伤指标 χ^2 量值均较小;当损伤发生时,指标量值将出现指数值跃迁。这说明所提指标对损伤十分敏感,且不会受噪声影响导致误判。对比不同损伤工况的计算结果可以发现:所提指标对杆件拆除损伤更敏感,其中工况 2 的指标值最大;对于单元刚度折减损伤(工况 4~工况 8),损伤指标值随损伤程度的增加而增大。对比不同方向指标计算值,发现各工况均对横线路方向(x 向)更敏感,这与不同杆件损伤对结构不同方向的动力特性影响有关。

综上所述,所提损伤指标在一定程度上可以衡量损伤大小,且对不同位置的损伤具有不同的灵敏度。所提方法具有较好的抗噪性能,在 20 dB 的噪声下仍然可以识别出损伤的存在。

表 4 损伤指标识别结果

Tab.4 Identification results of damage index

工况	x 方向		y 方向	
	无噪声	有噪声	无噪声	有噪声
完好	1.09	2.51	1.15	1.24
1	11 921 806.00	8 039 939.60	397 821.93	2 723 825.00
2	52 547 186.00	36 090 269.00	1 097 263.64	8 091 130.00
3	1 276 482.00	1 132 081.70	126 357.37	362 374.07
4	4 378.98	239 009.76	934.68	130 732.57
5	24 693.00	259 155.98	4 278.91	141 735.45
6	89 249.26	332 180.30	10 583.28	158 803.33
7	288 504.54	633 417.34	23 618.35	195 801.22
8	868 251.68	1 611 073.60	49 364.25	278 389.52

3 损伤识别方法试验验证

3.1 测点布置及损伤模拟

为了验证所提方法的有效性,笔者以一实际足尺输电塔作为对象进行损伤识别研究,现场照片如图 6 所示。

在现场试验中,由于结构塔身刚度较大,而现场



图 6 实际输电塔照片

Fig.6 The photo of the transmission tower

环境自然风荷载较小,结构动力响应不明显。因此,本次试验采取在 A#塔腿顶部进行锤击的方式进行激励,并在 D#塔腿上 $N_1 \sim N_9$ 测点位置依次布设集成电路压电(integrated circuits piezoelectric,简称 ICP)加速度传感器(INV9828)。考虑实际结构情况,试验采用对输电塔节点杆件断裂及螺栓松动 2 类损伤进行验证,每类损伤选取有代表性的 3 组位置进行损伤模拟,预设损伤位置如图 7 所示,输电塔损伤工况如表 5 所示。试验中,分别在完好及损伤状态下采集 x, y 方向的加速度信号,采样频率为 312.5 Hz,采样时间为 10 min,其中输电塔 N_1 测点 x, y 方向部分振动信号如图 8 所示。

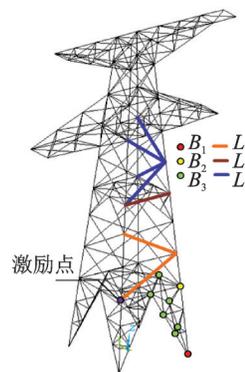


图 7 预设损伤位置

Fig.7 Preset damage location

表 5 输电塔损伤工况

Tab.5 The damage cases of transmission tower

工况	损伤位置	损伤类型	工况	损伤位置	损伤类型
1	L_1	杆件失效	4	B_1	螺栓松动
2	L_2	杆件失效	5	B_2	螺栓松动
3	L_3	杆件失效	6	B_3	螺栓松动

3.2 损伤识别结果

在不同工况下,利用布设的 9 个传感器采集双向加速度信号,并通过第 1 节所提出的损伤识别算法进行分析,计算得到损伤识别结果如图 9 所示。由图可知,由输电塔完好状态下 x, y 方向响应计算得 χ^2 值分别为 104.86 和 449.76。对于杆件失效的 3 种损伤工况, x 方向计算损伤指标值为 3 721.85, 1 112.21 及 408.08, 分别为完好状态的 35.49 倍、10.61 倍及 3.89 倍; y 方向计算损伤指标值为 7 695.06, 1 040.67 及 810.03, 分别为完好状态的 17.11 倍、2.31 倍及 1.80 倍。可以发现:对于工况 1 及工况 3, χ^2 指标值对顺线路方向(y 向)较为敏感,而对于工况 2, χ^2 指标值对横线路方向(x 向)更为敏

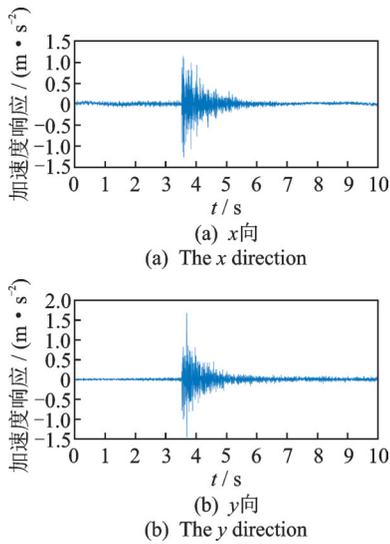


图8 输电塔振动信号

Fig.8 The vibrational signals of transmission tower

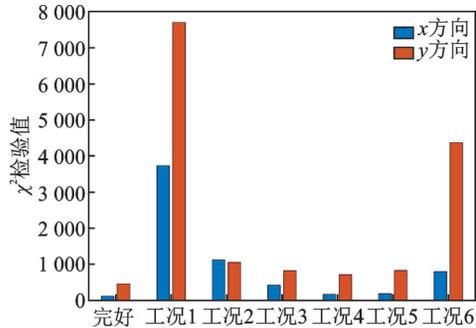


图9 损伤识别结果

Fig.9 The identification results of damage

感;相较于工况2(铁塔节段间的横膈面平材失效)以及工况3(铁塔上部正面、侧面斜杆失效),工况1(主塔下部正面斜杆失效)损伤指标更为显著。对于螺栓松动3种损伤工况下, x 方向计算损伤指标值为155.46,174.69及787.46,分别为完好状态的1.48倍、1.67倍及7.51倍; y 方向计算损伤指标值为704.31,818.90及4363.36,分别为完好状态的1.57倍、1.82倍及9.70倍。在螺栓松工况下, χ^2 指标值对顺线路方向(y 向)更为敏感,且相较于工况4(拆卸D#塔腿侧主杆与地面的连接螺栓)以及工况5(松上、下两节主杆连接处的螺栓),工况6(拆卸D#塔腿侧V面上2根斜杆的连接螺栓)损伤指标更为灵敏。对比2种不同的损伤模式可知,杆件失效相比于螺栓松动也更易利用 χ^2 指标进行识别。

4 结论

1) 利用基于随机子空间的模态分析方法得到的结构模态信息(频率、振型及阻尼)具有较高的识别精度,将健康状态下的识别结果作为基准,再基于

统计模型构造结构损伤指标 χ^2 值,可以有效地进行损伤识别。

2) 对于单一杆件刚度折减损伤工况,损伤并未引起结构各阶频率的明显变化,但基于统计模型构造的损伤指标数值显著增大。对于杆件拆除损伤工况,第3阶频率出现较大变化,而基于统计模型构造的损伤指标则产生跨数量级的变化。由此可知,本研究提出的损伤指标较传统模态参数更加敏感。

3) 对于不同位置的杆件及螺栓损伤,损伤指标数值存在较大差异,说明所提指标对不同损伤位置敏感度不同,且损伤指标出现在同一损伤位置随损伤程度增加而增大的趋势,该识别方法可以区分损伤位置及程度。现场试验所测数据可提取出的模态信息有限,且不同损伤对不同阶次模态信息的敏感程度也不同,因此并不能得到与数值模拟完全相一致的分析结果。

参 考 文 献

- [1] 叶子菀,郭勇,尚奎. 山坡地形输电线路的覆冰脱冰研究[J]. 电网技术,2013,37(7):1959-1964.
YE Ziwan, GUO Yong, SHANG Kui. Research on ice accretion and shedding of ice-coating on transmission lines located in hillside areas[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1959-1964. (in Chinese)
- [2] 秦佳俊,吴坤铭,郝成伟. 高压输电塔线体系风冰振动特征分析[J]. 皖西学院学报,2014,30(5):67-69.
QIN Jiajun, WU Kunming, HAO Chengwei. Dynamic characteristics analysis of transmission tower line system with wind and ice[J]. Journal of West Anhui University, 2014, 30(5): 67-69. (in Chinese)
- [3] 郭惠勇,袁和发,何清林. 基于改进云推理算法的塔架结构损伤识别[J]. 应用力学学报,2020,37(1):365-371,493-494.
GUO Huiyong, YUAN Hefa, HE Qinglin. Damage identification of tower structure based on improved cloud inference algorithm [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(1): 365-371, 493-494. (in Chinese)
- [4] 王志华. 基于AR模型和倒谱测距的输电塔损伤识别[D]. 重庆:重庆大学,2019.
- [5] 霍林生,李旭,李宏男,等. 基于互相关函数幅值和SVM的输电塔损伤识别[J]. 振动、测试与诊断,2017,37(3):495-500.
HUO Linsheng, LI Xu, LI Hongnan, et al. Damage identification of transmission tower based on CORV and SVM [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(3): 495-500. (in Chinese)
- [6] 楼文娟,林宝龙. 基于小波变换的大型输电铁塔损伤位置识别[J]. 工程力学,2006(S1):157-162,168.

- LOU Wenjuan, LIN Baolong. Wavelet transform based method for detection damage location of electricity transmission towers [J]. *Engineering Mechanics*, 2006(S1): 157-162, 168. (in Chinese)
- [7] 汪江, 杜晓峰, 田万军, 等. 500kV 大跨越输电塔振动在线监测与模态分析系统 [J]. *电网技术*, 2010, 34(10): 180-184.
- WANG Jiang, DU Xiaofeng, TIAN Wanjun, et al. Online vibration monitoring and modal analysis system of 500 kV long-span power transmission tower [J]. *Power System Technology*, 2010, 34(10): 180-184. (in Chinese)
- [8] LIFSHITZ J, ROTEM A. Determination of reinforcement unbonding of composites by a vibration technique [J]. *Journal of Composite Materials*, 1969, 3: 412-423.
- [9] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B, et al. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review [R]. Santa Fe, NM: Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [10] SOHN H, FARRAR C R, HEMEZ F M, et al. A review of structural health monitoring literature: 1996-2001 [R]. Santa Fe, NM: Los Alamos National Laboratory, 2004.
- [11] VANDIVER J K. Detection of structural failure on fixed platforms by measurement of dynamic response [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1977, 29(3): 305-310.
- [12] WEST W M. Illustration of the use of model assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen [C] // *Proceeding of Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity*. Los Angeles, CA: [s.n.], 1984: 1-6.
- [13] KO J M, WONG C W, LAM H F. Damage detection in steel framed structures by vibration measurement approach [C] // *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*. Honolulu, HI: Society for Experimental Mechanics, 1994: 280-286.
- [14] 林宝龙, 贾晓云, 马祥旺. 小波变换在输电塔结构损伤位置识别中的应用 [J]. *石家庄铁道大学学报*, 2006, 19(3): 22-27.
- LIN Baolong, JIA Xiaoyun, MA Xiangwang. Application of wavelet transform on damage detection of transmission tower [J]. *Journal of Shijiazhuang Railway Institute*, 2006, 19(3): 22-27. (in Chinese)
- [15] 瞿伟廉, 秦文科. 输电塔法兰连接节点螺栓松动损伤诊断改进的模糊模式识别方法 [J]. *地震工程与工程振动*, 2006(6): 138-143.
- QU Weilian, QIN Wenke. Updating fuzzy-pattern identification approach to flange-joint bolted looseness damage in transmission tower structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2006(6): 138-143. (in Chinese)
- [16] 刘海卿, 宗虎. 基于小波变换和应变能的在役输电塔结构损伤识别 [C] // 2010 年全国振动工程及应用学术会议. 沈阳: 中国振动工程学会, 2010.
- [17] 屈成忠, 连旭伟, 于游江. 基于 HHT 的输电塔结构损伤识别 [J]. *水电能源科学*, 2011, 29(1): 145-147.
- QU Chengzhong, LIAN Xuwei, YU Youjiang. Damage recognition for structure of transmission tower based on HHT [J]. *Water Resources and Power*, 2011, 29(1): 145-147. (in Chinese)
- [18] 宗周红, 牛杰, 王浩. 基于模型确认的结构概率损伤识别方法研究进展 [J]. *土木工程学报*, 2012, 45(8): 121-130.
- ZONG Zhouhong, NIU Jie, WANG Hao. A review of structural damage identification methods based on the finite element model validation [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(8): 121-130. (in Chinese)
- [19] 阳洋, 吕良, 李建雷, 等. 基于统计矩的确定及不确定性结构损伤识别理论在振动台试验中的应用 [J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(4): 167-173.
- YANG Yang, LYU Liang, LI Jianlei, et al. Structural damage identification with and without uncertainty condition for shaking table test based on statistical moment theory [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(4): 167-173. (in Chinese)
- [20] 郭惠勇, 何清林. 基于关联模态云推理算法的输电塔结构损伤识别 [J]. *土木与环境工程学报*, 2020, 42(2): 135-142.
- GUO Huiyong, HE Qingling. Damage identification of transmission tower based on associated mode cloud reasoning algorithm [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(2): 135-142. (in Chinese)
- [21] BASSEVILLE M, ABDELGHANIM, BENVENISTE A. Subspace-based fault detection algorithms for vibration monitoring [J]. *Automatica*, 2000, 36(1): 101-109.
- [22] BALMES E, BASSEVILLE M, MEVEL L, et al. Statistical model-based damage localization: a combined subspace-based and substructuring approach [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, 15: 857-875.



第一作者简介:曹枚根,男,1975年1月生,博士、研究员。主要研究方向为输变电防灾减灾技术与应用。曾发表《地下变电站结构振动与噪声相关性及预估方法》(《中国电机工程学报》2014年第34卷第33期)等论文。

E-mail: 314613692@qq.com

通信作者简介:周文松,男,1976年11月生,教授、博士生导师。主要研究方向为结构健康监测与无损检测。

E-mail: zhouwensong@hit.edu.cn