

酒杯型输电塔损伤定位的识别方法*

刘 纲^{1,2}, 杨 溥^{1,2}, 秦 阳¹, 刘 遥¹

(1. 重庆大学土木工程学院 重庆, 400045)

(2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室 重庆, 400045)

摘要 针对酒杯型大跨越输电塔结构在塔头节段具有刚度突变的特性,建立了基于模态双指标的损伤定位方法。通过对现有模态指标的对比,提出首先采用振型差指标判断酒杯型输电塔刚度突变处是否损伤,再利用模态柔度改变率指标定位输电塔其他节段的损伤,以克服单一模态指标易误报警的缺陷。分析了模态识别误差、不完备测点和环境因素对模态双指标方法的影响。采用实塔数值模拟分析的结果表明,该方法能根据环境激励较为准确地识别损伤发生的部位,测试误差、环境等因素对其损伤定位功能的影响较小,为该类塔架结构长期在线健康监测提供了损伤识别的方法支撑。

关键词 输电塔; 损伤定位; 刚度突变; 模态柔度改变率; 振型差

中图分类号 TU279.7⁺44; TH113

引 言

大跨越高压输电塔体系塔体高柔、跨距大,具有高耸结构和大跨度结构的共同特点,且塔线耦合振动,对风和导线浮冰等环境荷载的反应较为敏感。若不能及时发现其损伤隐患,容易发生极端条件下的动态倒塌破坏^[1],故对其进行长期健康监测,对保证主干电网安全具有重要的意义。目前,国内、外对大跨越输电塔的损伤识别主要集中在一般动力特性的识别方面^[2-8],仅有少量针对输电塔损伤识别的工作^[9-10]。在大跨越输电塔中,由于结构形式的需求,大量地采用了酒杯型塔型或混凝土和钢结构的组合形式,该类塔结构在沿塔高度方向有刚度突变点,采用单一指标通常不能有效定位这类输电塔的损伤部位,如文献^[10]采用空间小波方法在刚度突变点易发生误报警。因此,结合现有输电塔动力特性识别成果和已有损伤识别方法,建立适用于酒杯型输电塔结构的损伤定位方法具有重要的应用价值。

笔者针对酒杯型大跨越输电塔结构的组成特点,提出利用环境随机激励下塔架结构的振动响应进行损伤定位的模态双指标识别方法,并研究了测试噪音、环境等不利因素对该识别方法的影响。

1 模态双指标损伤定位识别方法

1.1 常用模态指标概述

任何结构系统都可以看作是刚度、质量等物理参数组成的力学系统,如果结构出现损伤,其参数必然随之发生改变,从而导致结构的模态参数发生改变。最早的损伤识别方法是直接采用结构的频率、振型和阻尼比来识别结构的损伤,但这些直接指标对结构的初期损伤并不敏感。基于以上的直接指标,人们提出了较多的模态指标^[11-16],常用的有模态保证准则(MAC)、坐标模态保证准则(COMAC)、模态应变能和模态柔度指标等。

MAC利用损伤前、后的模态振型进行构造,其物理意义为由振型组成的向量在向量空间的交角。如结构未损伤,则振型向量完全相交,MAC值为1。有研究表明,MAC和COMAC对损伤的敏感程度不高,当结构发生多处损伤时不能准确定位^[15]。

结构第*i*阶模态的应变能定义为

$$MSE_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{NE} \phi_i^T \mathbf{K}_j \phi_i \quad (1)$$

其中: \mathbf{K}_j 为第*j*个单元对整体刚度的贡献;NE为结构单元数; ϕ_i 为第*i*阶振型。

通过对比损伤前后模态应变能的变化即可实现

* 中央高校基本科研业务费资助项目(编号:CDJZR11200015)

收稿日期:2010-06-13;修改稿收到日期:2010-10-13

结构的损伤识别。基于应变能的方法需要计算每个单元刚度对整体刚度的贡献,这对于大型复杂结构很难准确计算,故该指标主要应用于简单的梁或桁架结构。

模态柔度的定义为

$$F = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\omega_i^2} \phi_i \phi_i^T \quad (2)$$

其中: ω_i 为第*i*阶频率; m 为可测试的模态阶数。

从模态柔度的定义可以看出,随着频率逐渐增高,与之对应的振型对柔度矩阵的贡献将呈指数趋势减小,采用在实测中较易准确测量的前几阶模态即可较为精确地描述模态柔度矩阵,且不需要进行模态的缩扩阶,故模态柔度及其衍生指标在损伤识别领域得到了广泛应用。

1.2 模态定位双指标的选取及方法流程

基于模态柔度的衍生指标较多,包括模态柔度差、模态柔度改变率、模态柔度曲率差和均匀力平面指标等。选取其中计算较为简单的模态柔度改变率(MFI)指标来定位输电塔的损伤,其定义^[13]为

$$MFI_i = |F_{ii}^d - F_{ii}^u| / F_{ii}^u \quad (3)$$

其中: F_{ii}^u 、 F_{ii}^d 分别为损伤前、后模态柔度矩阵第*i*行的对角元素。

在结构体系第*j*个自由度上作用单位力时,在第*i*个自由度上所产生的位移^[14]可表示为

$$u_{i,j} = \sum_{k=1}^m \frac{\varphi_{ik}\varphi_{jk}}{\omega_k^2} \quad (4)$$

其中: φ_{ik} 为第*k*阶模态第*i*节点的模态位移。

在式(4)中, $u_{i,j}$ 与模态柔度 F 矩阵中的元素 $f_{i,j}$ 的计算公式完全相同,故 F 矩阵中的各列表示单位力作用在不同自由度上时沿结构长度方向的位移变化^[14]。如果在沿结构长度方向出现刚度突变,例如酒杯型大跨越输电塔在塔头部分具有刚度突变的特征,则在单位力的作用下,突变点左右位移曲线的变化趋势必然不同,故基于模态柔度的指标易在刚度突变点引发误报警。另一方面,模态振型虽对非刚度突变点(常见普通结构)的损伤不敏感,但对刚度突变点的损伤却较为敏感,故可采用振型差指标(MPI)来进行刚度突变点的损伤定位,其定义为

$$MPI_i = \phi_i^d - \phi_i^u \quad (5)$$

综上所述,采用MPI指标对刚度突变点的损伤进行识别,采用MFI指标对非刚度突变点的其余部位进行损伤定位,形成基于模态的双指标,相辅相成,共同完成酒杯型大跨越输电塔的损伤定位,该方法的流程如图1所示。

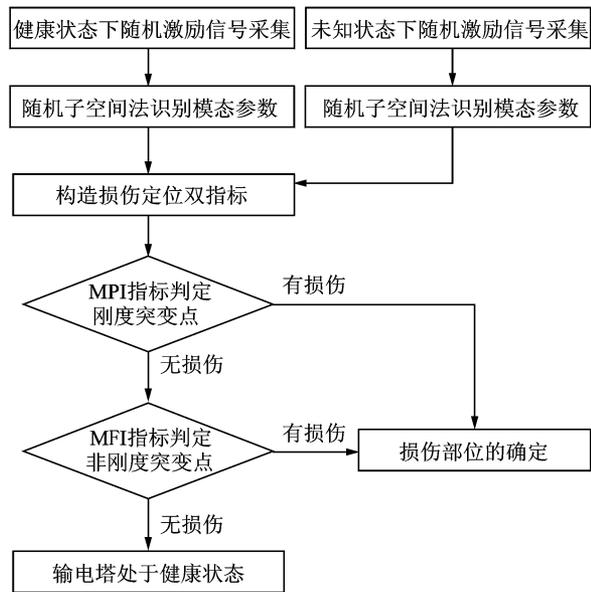


图1 双指标方法损伤定位流程图

2 损伤定位识别的数值模拟分析

2.1 实塔的有限元模型及损伤工况

以某酒杯型大跨越输电塔线路为工程背景,建立两塔三基空间杆系有限元模型,如图2所示。其中输电塔杆件采用空间梁单元模拟,导、地线采用索单元模拟,并施加初始应变来表征导地线的初应力。塔基与地基视为固接,导、地线在耐张塔处简化为铰接。图3为该跨越塔塔体的立面布置图,圆圈内数字为不完备测点布置时加速度传感器的测点号,方框内的数字为模拟损伤的杆件号,其余数字为节点号。

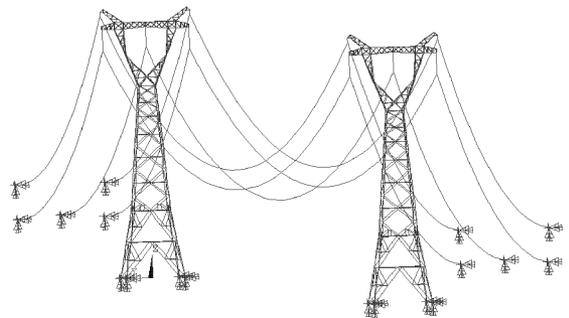


图2 大跨越输电塔塔线体系示意图

通过降低主弦杆的弹性模量来模拟输电塔结构的损伤,选取4种损伤工况进行分析,如表1所示,各主弦杆的损伤部位如图3所示。由于实塔结构的可靠度较高,根据文献^[10]的建议,每种损伤工况均将主弦杆的弹性模量降低70%来模拟损伤。

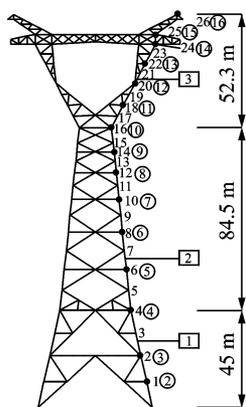


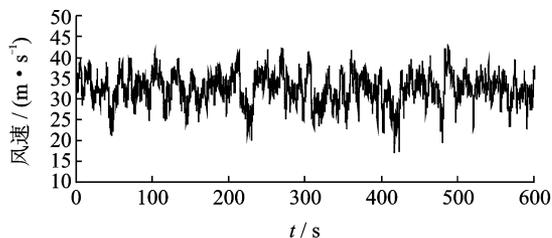
图3 跨越塔立面及加速度测点布置图

表1 输电塔损伤工况表

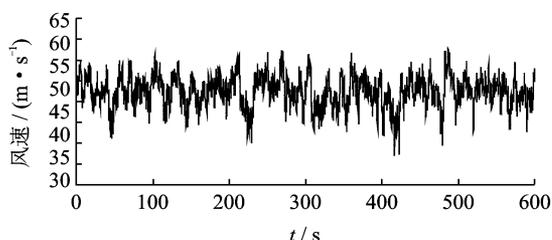
工况号	1	2	3	4
损伤部位	主弦杆1	主弦杆2	主弦杆3	主弦杆1,3

2.2 风荷载模拟及模态参数的识别

采用谐波叠加法模拟脉动风荷载,设计风速为30 m/s,地面粗糙程度取为B类,模拟时间为600 s,其中塔底和塔顶处的模拟风速时程曲线如图4所示。根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2001)中相关公式,由不同高度处的风速时程曲线可计算出塔架结构各节点所受的风荷载时程曲线。



(a) 塔底 (12.0 m高度处)



(b) 塔顶 (181.8 m高度处)

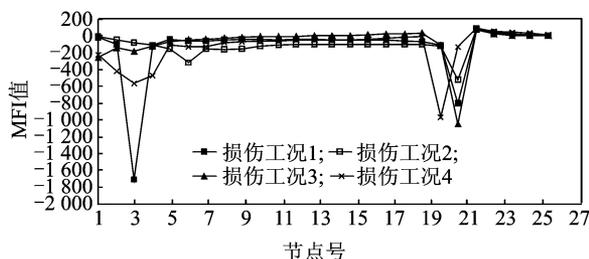
图4 模拟的风速时程曲线

笔者采用随机子空间法识别输电塔在随机风荷载作用下的动力模态参数。随机子空间法结合系统识别、线性代数和统计学理论,通过矩阵计算,从状

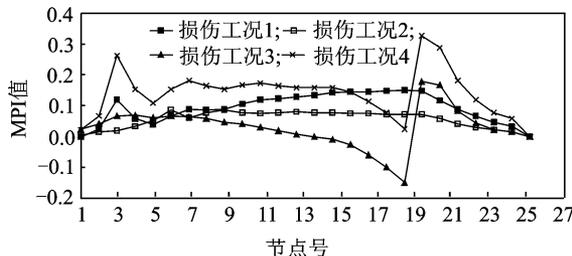
态空间方程中识别动态系统,既能准确识别结构的频率,又能很好地识别模态振型和阻尼比^[11-12]。

2.3 双指标定位效果分析

以模拟的风荷载数据为输入,通过 ANSYS 时程分析得到塔线体系健康状态和各种损伤工况下的加速度响应。输电塔的振动为空间振动,但其水平向的振动比竖向振动的幅值大一个量级以上。同时,由于损伤引起的顺导线向和横导线向水平振动模态的变化规律基本一致,故仅以横导线水平向为例进行分析。因实测时只能准确测量结构的低阶模态,选取第2阶振型进行损伤定位,采用双指标计算完备测点下的损伤定位效果,如图5所示。



(a) MFI指标



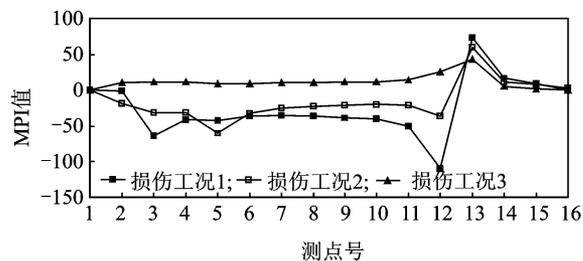
(b) MPI指标

图5 完备测点下双指标的损伤定位效果

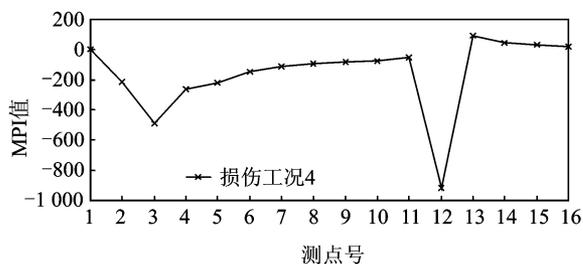
由图5(a)可知,在完备测点下,模态柔度改变率指标具有如下特征:a. 在发生损伤的杆件节点部位出现极值,对于损伤工况1和2,该指标分别在发生损伤的3号和6号节点处出现极值;b. 无论刚度突变处是否发生损伤,MFI指标均会表明该处出现极值,如在损伤工况1下,刚度突变处未出现损伤但MFI指标出现了极值,这与文献[10]中采用空间小波方法得出的结论基本一致。由图5(b)可知:a. MPI指标能有效定位刚度突变处的损伤,如在损伤工况3和4下,位于刚度突变处的19号和20号节点的振型差出现较大改变,而对于损伤工况1和2,刚度突变处的振型差指标基本不变;b. MPI指标对刚度突变点以外部位损伤的定位能力较弱,如对损伤工况2,几乎不能识别节点6处主弦杆2出现的损伤。因此,

结合 MPI 和 MFI 指标,按图 2 所示流程可实现不同损伤工况下酒杯型输电塔的损伤定位工作。

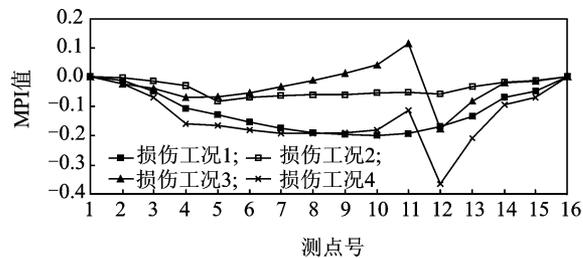
实塔测试具有测点不完备的特点,故根据优化后的加速度测点布置,计算不完备情况下指标损伤定位效果,如图 6 所示。



(a) 损伤工况1,2,3下的MFI指标



(b) 损伤工况4下的MFI指标



(c) MPI指标

图6 不完备测点下双指标的损伤定位效果

由图 6 可知,在非完备测点情况下,MFI 指标和 MPI 指标的损伤定位效果与测点完备时的规律基本一致,即 MFI 指标能准确定位非刚度突变处的损伤,MPI 指标能有效定位刚度突变处的损伤,故双指标方法在测点不完备的情况下依然能有效地进行损伤定位。

2.4 识别误差对损伤定位的影响

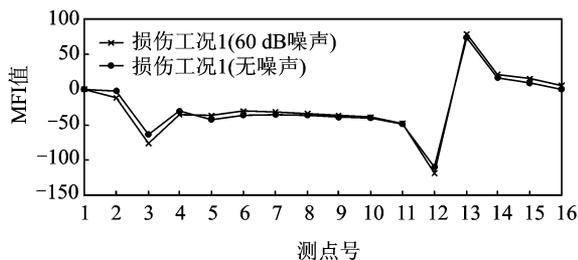
考虑实塔测试时,测试信号中将混入测试噪音,采用信噪比来衡量测试噪音的大小^[17-18]

$$\text{SNR}_i = 10 \lg(P_{s_i}/P_{n_i}) \quad (6)$$

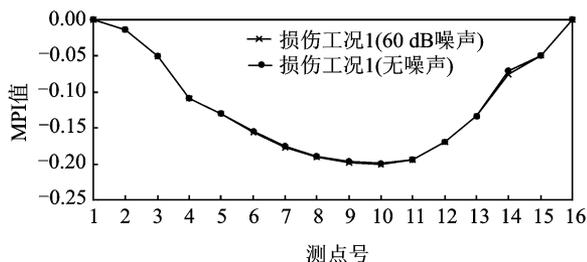
其中: P_{s_i} 为原始信号的功率; P_{n_i} 为噪声信号的功率。

在各测点加速度响应信号中加入信噪比为 60 dB 的高斯白噪声,利用加入测试噪音的加速度信

号重新进行模态识别,因各损伤工况下的结果规律一致,笔者仅给出损伤工况 1 在不完备测点下的识别效果,如图 7 所示。



(a) 工况1下MFI指标对比



(b) 工况1下MPI指标对比

图7 测试噪音对损伤定位的影响

由图 7 可知,当信噪比为 60 dB 时,MFI 指标对计算结果有一定的影响,但影响较小,在损伤发生的测点 3 处依然有较大的极值出现;而测试噪音对 MPI 指标基本没有影响,故测试噪音对双指标的损伤定位能力影响较小。

2.5 环境对损伤定位的影响

实塔在长期健康监测中,温度、湿度等环境的变化不可避免地引发结构状态的改变。根据文献^[19]的建议,利用钢材的弹性模量与温度变化的曲线关系来模拟温度对塔在随机振动下动态特性的影响。该曲线关系如图 8 所示。考虑输电塔结构整体从 0 °C 升温至 40 °C,输电塔横导线向前 3 阶频率变化如图 9 所示,双指标损伤定位效果如图 10 所示。

由图 10 可知,升温 40 °C 并不影响双指标损伤定位效果。有结构实测结果表明,温度的改变往往不会

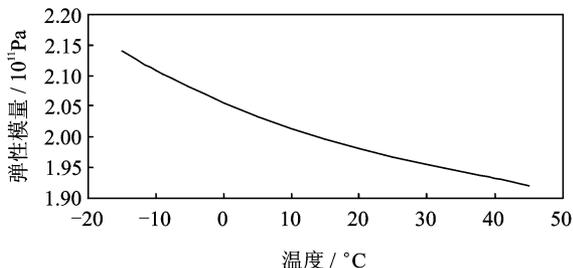


图8 钢材弹性模量随温度变化的曲线关系

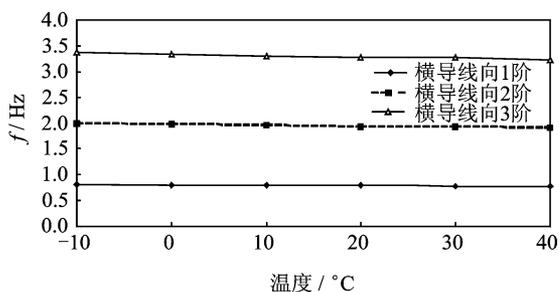
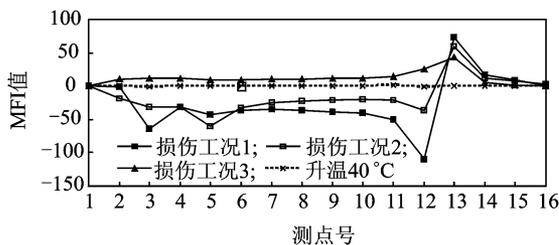
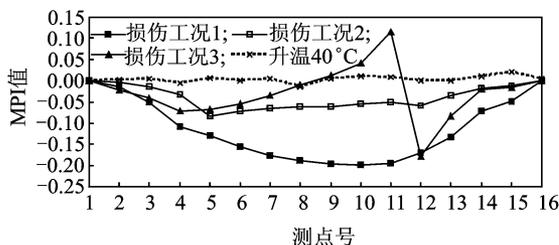


图9 不同温度下横导线向的频率变化



(a) MFI指标对比



(b) MPI指标对比

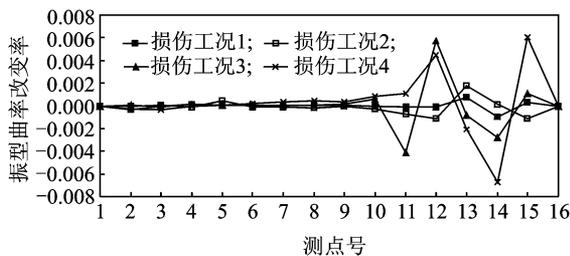
图10 升温40°C时双指标损伤定位效果

引起振型的较大变化^[19]。如图10(b)中,在温度变化下,最大模态位移改变量仅为0.008,远小于损伤引起的改变量。从图9可知,从0°C升温至40°C,第2阶的频率改变量不足3%,故双指标由温度变化引发的改变量较小,不影响指标的损伤定位识别效果。

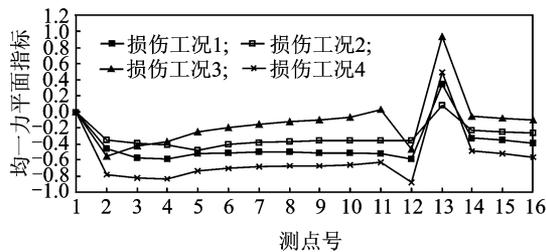
2.6 其他指标的损伤定位效果对比

由文献[11]可知,基于模态振型及其衍生的指标较多,根据文献[11,14]的建议,采用振型曲率改变率和均匀力平面指标对不完备测点下酒杯型输电塔的损伤进行定位,如图11所示。

由图11可知,不管损伤发生在何处,振型曲率改变率和均匀力平面指标均在塔头部分,即刚度突变处附近出现较大变化,且由于该处的影响,这两个指标均不能有效定位除刚度突变点以外各处发生的损伤。这主要是因为绝大多数指标是关于模态振型位移节点的平方或者求导,从数学上可理解为是关于振型的乘方或微分运算。因此,采用乘方形式的指



(a) 振型曲率改变率



(b) 均匀力平面指标

图11 不同指标的损伤定位效果

标对振型微小变化的敏感度更高,采用微分运算的求曲率运算对振型的局部变化更敏感,故乘方和微分运算都对损伤具有显微放大的作用。但对有刚度突变点的大跨越输电塔而言,不管刚度突变点是否发生损伤,损伤都将在该处引发模态振型位移较大的改变,在某些情况下甚至超过发生损伤部位处的模态位移的改变量,故极易在该处引发误报警,进而影响整个塔架结构的损伤定位。

3 结论

1) 基于模态的双指标能够有效地对有刚度突变的酒杯型输电塔的单处及多处损伤进行定位,虽完备测点的效果好于不完备测点,但双指标方法在不完备测点情况下,依然能有效地对各种损伤部位进行定位。

2) 测试噪音对模态双指标定位效果的影响较小,这主要是因为随机子空间法在识别模态参数时能有效剔除测试噪音的影响。

3) 环境温度的变化对双指标的计算值有一定程度的影响,但远小于损伤情况下指标值的变化,不足以影响双指标的损伤定位效果。

参 考 文 献

- [1] 李宏男,白海峰. 高压输电塔-线体系抗灾研究的现状与发展趋势[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 39-46.
Li Hongnan, Bai Haifeng. State-of-the-art review on

- studies of disaster resistance of high-voltage transmission tower-line system[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2): 39-46. (in Chinese)
- [2] Li Hongnan, Shi Wenlong, Wang Guoxin, et al. Simplified models and experimental verification for coupled transmission tower-line system to seismic excitations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 286: 569-585.
- [3] Ronaldo C B, Rosângela S R, Michèle S P. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91:1051-1067.
- [4] Shehata A Y, Damatty A A. Failure analysis of a transmission tower during a microburst[J]. Wind and Structures, 2008, 11(3):193-208.
- [5] Antanas K. Safety of power transmission line structures under wind and ice storms [J]. Engineering Structures, 2006, 28: 682-689.
- [6] Kaminski Jr J, Riera J D, Menezes R C R, et al. Model uncertainty in the assessment of transmission line towers subjected to cable rupture[J]. Engineering Structures, 2008, 30:2935-2944.
- [7] Loredou-Souza A M, Davenport A G. A novel approach for wind tunnel modeling of transmission lines[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89:1017-1029.
- [8] 杨靖波, 李正, 江俊. 输电线路铁塔导线耦合振动动力特性研究[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2): 147-150.
Yang Jingbo, Li Zheng, Jiang Jun. Dynamic Characteristics of wind-induced coupled vibration between conductor and tower of transmission line[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2): 147-150. (in Chinese)
- [9] 赵学风, 段晨东, 刘义艳, 等. 基于小波包变换的支持向量机损伤诊断方法[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2):104-107.
Zhao Xuefeng, Duan Chendong, Liu Yiyan, et al. Diagnosis of structure damage by support vector machine based on wavelet packet transform[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2): 104-107. (in Chinese)
- [10] 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, 23(6):157-162.
Lou Wenjuan, Lin Baolong. Wavelet transform based method for detecting damage location of electricity transmission towers[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(6):157-162. (in Chinese)
- [11] Van Overschee P, De Moor B. Subspace algorithms for the stochastic identification problem[C]//In Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control. Brighton: IEEE Conference Publications, 1991:1321-1326.
- [12] Doebling S W, Farrar C R, Michael B P. A review of damage identification methods that examine changes in dynamic properties[J]. Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2):91-105.
- [13] 何伟, 陈淮, 王博, 等. 运用改进残余力向量法的结构损伤识别研究[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(4): 379-382.
He Wei, Chen Huai, Wang Bo, et al. Structural damage identification by using improved residual force vector[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(4): 379-382. (in Chinese)
- [14] Byeong H K. Local damage detection using modal flexibility[D]. Texas: Texas A & M University, 2004.
- [15] Ndambi J M, Vantomme J, Harri K. Damage assessment in reinforced concrete beams using eigenfrequencies and mode shape derivatives[J]. Engineering Structures, 2002, 24: 501-515.
- [16] Pandey A K, Biswas M, Samman M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145:321-332.
- [17] John G P, Masoud S, Gerhard B. 现代通信系统[M]. 刘树棠, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005:95-107.
- [18] 杨智春, 党晓娟, 王乐, 等. 复合材料结构损伤联合定位法试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(2):115-118.
Yang Zhichun, Dang Xiaojuan, Wang Le, et al. Experimental investigation on a combined damage localization method for composite beams and plates[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(2):115-118. (in Chinese).
- [19] Xia Yong, Hao Hong, Giovanna Z. Long term vibration monitoring of an RC slab: temperature and humidity effect[J]. Engineering Structures, 2006, 28: 441-452.



第一作者简介: 刘纲, 男, 1977年1月生, 副教授。主要研究方向为结构健康监测和减震防灾。曾发表《长期监测中结构温度效应分离的一种新方法》(《工程力学》2010年第27卷第3期)等论文。
E-mail: gliu@cqu.edu.cn