

基于频率和模态的变电构架损伤识别研究

林刚, 韦文兵, 冯晓东

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 变电构架是变电站配电装置场地的重要构筑物, 其安全可靠性与变电站密切相关。文章基于频率和模态推导了变电构架结构损失识别理论模型, 且通过部分频率和模态片段来进行损伤识别, 提高了灵敏度; 利用传感器的先验信息, 发展了一种测量点优化选择算法, 以保证损伤参数识别过程的适定性。用交替进行测量点优化选择、参数识别和误差更新操作来最大限度地减少先验信息不准确所带来的识别误差对损伤识别结果的影响, 尽量提高损伤识别的精度。

关键词: 变电构架; 频率; 模态; 损伤识别

中图分类号: TM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)02-0067-05

Research on Damage Detection Method for Substation Gantry Structures Based on Natural Frequencies and Mode Shapes

LIN Gang, WEI Wenbing, FENG Xiaodong

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Gantry Structures are very important devices whose safety is closely related to substation. A theoretical model for detecting gantry structures' damage based on natural frequencies and mode shapes has been proposed in the present paper. In order to improve sensitivity, partial frequencies and mode shapes have been chosen to detect damage, also a measurement point selection algorithm is developed by using the *prior* information of sensors to solve ill-posed problem in damage identification. The optimal measurement selection algorithm, parameter identification algorithm and error updating algorithm are alternately conducted to estimate the uncertainty of the prior information of sensors, which are used to improve to the precision of identification result.

Key words: substation gantry structures; frequencies; mode Shapes; damage detection

变电构架是变电站配电装置场地的重要构筑物, 其安全可靠性与变电站密切相关。在构架的设计、制作、运输和安装过程中, 构架都可能发生损伤和破坏, 构架不可避免受到机械损伤, 存在初始凹陷损伤和防腐层局部破坏构件锈蚀的情况。在复杂和恶劣的自然环境作用下, 构件锈蚀可能迅速扩大, 导致构架承载力发生变化, 对变电站运行造成安全隐患。同时, 在极端天气冰、风荷载的循环作用下, 构架可能出现新的损伤和损伤的扩大积累, 影响结构的维护年限和使用年限。由于构架常年带电运行, 且检修维护难度大, 不可能经常停电进行

检修, 因此需要有效的检测构架的腐蚀程度、监测构架的损伤累计过程, 评定和预测结构的安全性和可靠性, 以及对构架进行维修加固。智能电网是当今世界电力系统发展变革的最新动向, 得到了国内外以及社会各界的高度重视。

智能电网一个重要意义, 就是要求配合低碳经济、高效、安全可靠的需要, 提高电网的抗灾能力。智能变电站是智能电网重要组成部分, 通过对变电构架进行安全智能监测和安全评估, 为决策系统提供依据数据, 是保证电网变电环节安全的重要手段, 符合智能电网、变电站发展的要求。

变电构架是一种典型的刚架结构。这类结构的频率和模态有可能只通过环境激励获得, 而频率和模态中又隐含了结构的刚度和质量信息, 因此可以采用频率和模态来识别结构的刚度变化以间接地反

收稿日期: 2015-05-01

作者简介: 林刚(1983), 男, 湖南常德人, 高级工程师, 博士, 主要从事特高压输电试验研究的工作(e-mail) lingang@gedi.m.cn。

映结构的损伤情况,从而达到健康监测的目的。由于这种损伤识别问题是一种典型的反问题^[1-2],因此必须仔细研究算法的灵敏度和抗干扰性能,才有可能保证损伤识别结果的可靠性。

使用反问题方法根据固有频率的改变进行损伤识别的尝试可以追溯到1978年Adams等人的工作^[3],他们通过任意两阶频率差的比值来确定损伤的位置。但是,由损伤带来的固有频率的变化很容易被测量误差所掩盖,所以大多数相关研究往往仅限于数值模拟,或仅在理想的实验室环境中进行,应用于实际结构时仍存在很多困难^[4-6]。比如Farrar等人在1994年对I-40桥的研究工作中发现,在一根整体刚度变为原先79%的桥上的测得的固有频率几乎没有变化^[7]。

人们也尝试了用模态来辨识结构的损伤,较为典型的基于结构模态的损伤识别方法是分别用MAC(Model assurance criterion)^[8]和COMAC^[9]指标来进行指示和定位结构损伤的方法。但是和频率一样,模态仍然是结构的一种整体信息,它对局部的损伤不十分敏感,因此在不可避免的测量噪声的干扰下,很难得到理想的损伤识别效果^[4-5]。

虽然频率和模态对局部损伤不敏感,但是它们在工程中便于测量,而且几乎是唯一可以用于结构在线损伤识别的测量信息,因此人们还是不断研究基于它们的损伤识别方法^[10]。不过,为了保证损伤识别的精度,需要在空间上引入一些局部信息,而不是直接比较损伤前后的频率和振型。在这类方法中,振型曲率、柔度矩阵、模态应变能、柔度曲率的方法是比较有代表性的^[6,11-13]。不过这些方法往往要求在结构上密布传感器,因此影响了其工程实用性。

综上,使用频率和模态进行损伤识别已经研究了多年,主要的困难在于实际测量中的精度较好的低价频率对结构损伤不敏感,而对损伤较敏感的高阶模态又难以准确地获得。这些困难最终表现为损伤参数识别过程的不适定性,因此需要采取一些特殊的方法来保证损伤识别结果的可靠性。

1 基于部分频率和模态的损伤识别算法

1.1 参数识别问题的提法

在诸多参数识别方法中,最常用的莫过于基于贝叶斯(Bayes)估计法。通过给定不同的先验信息,

贝叶斯估计可退化为很多不同类型的参数估计方法,比如最大似然(Maximum Likelihood)估计法、加权最小二乘(Weighted Least Square)法、常规最小二乘(Least Square)法等。其中,常规最小二乘法由于不需要任何先验信息和经验参数,而且推导和实现都很简便,因此往往成为进行参数识别的首选。为了提高损伤识别的灵敏度,本章将给出一套基于结构的部分频率和模态片段的常规最小二乘法的参数识别方法。

在忽略阻尼的情况下,描述一个结构的动力学有限元格式可表达为:

$$K(p)X(p) - [\lambda(p)]^2 M(p)X(p) = 0 \quad (1)$$

式中: λ 为结构的任一阶圆频率; X 为对应的模态; K 为结构刚度阵; M 为结构质量阵;参数 p (通常选择的参数为弹性模量 E 、泊松比 ν 、密度 ρ 、截面积 A 等)用于反映结构的损伤情况。

如果要求在有限元模型中实际传感器的布置位置上给定一个节点。这样可以通过一个选择矩阵 S ,从模型的计算结果中提取出与实际传感器对应的计算值,由此即可定义频率和模态的残差:

$$R(p) = \begin{bmatrix} \bar{\lambda} \\ \bar{X} \end{bmatrix} - S \begin{bmatrix} \lambda(p) \\ X(p) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\bar{\lambda}$ 和 \bar{X} 分别是传感器测量得到的频率和模态。按照常规最小二乘法的步骤,可以将损伤参数 p 的识别问题归结为一个优化问题:

$$\arg \min_p \Gamma(p) = R^T \cdot R$$

s. t.

$$\begin{aligned} K(p)X(p) - [\lambda(p)]^2 M(p)X(p) &= 0 \\ p &\in D_p \end{aligned} \quad (3)$$

式中: D_p 是参数的可行域。

上述问题可以用高斯牛顿法迭代求解:

$$\begin{aligned} p^{(k)} &= p^{(k-1)} + \Delta p \\ &= p^{(k-1)} - [2(J^{(k-1)})J^{(k-1)}]^{-1}(J^{(k-1)})^T R^{(k-1)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: J 为频率和模态对参数 p 求导所得的雅可比矩阵,可以采用解析法或差分法求解, $J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda}{\partial p} & \frac{\partial X}{\partial p} \end{bmatrix}^T$ 。

上式的收敛条件可定义为两次迭代之间频率或模态的相对变化量小于某给定值,或者是参数的最大相对变化小于某给定值。

1.2 测量误差的定义

模态可以按照不同的归一化方式描述, 其本身只反映相对大小而不反映绝对值。如果模态出现等大的相对偏差, 最终获得的模态与原模态是相同的, 也即传感器相同的相对误差对模态的测量没有影响。因此, 一般意义上的误差定义对于模态是不合适的。对于模态, 由于其没有绝对大小的概念, 因此定义其绝对误差是不合理的。这里, 定义模态的相对误差为:

$$\alpha = \frac{\|\bar{X} - X^*\|_2}{\|X^*\|_2} = \|\bar{X} - X^*\|_2 \quad (5)$$

式中: \bar{X} 为传感器测量得到的长归一化后的模态; X^* 为真实的归一化后的模态。

对于频率则沿用传统定义, 即频率的绝对误差为频率的测量值减去误差值, 其相对误差为绝对误差与真实值的比。

按照式(5)给出的误差定义, 在每个测量点上的偏差由于不能是固定百分比的偏差, 因此我们假设在每个测量点上有相同大小的系统偏差。由此可得:

$$\bar{X} = \frac{X^* + \Delta}{\|X^* + \Delta\|_2} \quad (6)$$

式中: Δ 是使得 α 达到给定值的一个常数。

对于实际的情况, X^* 是未知的, 而 \bar{X} 是已知的。这样需要由 \bar{X} 反求 X^* 。我们知道若 \bar{X} 是由式(6)获得的, 那么 $\exists c \in \mathbf{R}$, 使得 $X^* = c\bar{X} - \Delta$ 。由 X^* 的模长为 1 可得:

$$\begin{aligned} & (c\bar{X} - \Delta)^T (c\bar{X} - \Delta) \\ &= \bar{X}^T \bar{X} c^2 - 2\Delta^T \bar{X} c + \Delta^T \Delta \\ &= c^2 - 2\Delta^T \bar{X} c + \Delta^2 = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: Δ 为每个元素均为 Δ 的与 \bar{X} 相同维数的向量。

$$\begin{aligned} & (\bar{X} - X^*)^T (\bar{X} - X^*) \\ &= \bar{X}^T \bar{X} - 2X^{*T} \bar{X} + X^{*T} X^* \\ &= 2 - 2(c\bar{X} - \Delta)^T \bar{X} \\ &= 2 - 2c + 2\Delta^T \bar{X} = \alpha \end{aligned} \quad (8)$$

联立式(7)和(8)可解得 Δ 和 c , 这样就可以求得 $X^* = c\bar{X} - \Delta$ 了。

2 针对频率和模态的测量点优化选择

2.1 测量点优化选择的基础

测量点优化选择是一个典型的组合优化问题, 然而在解决组合优化问题之前, 必须可以对测量点

组合的优劣进行评价。下面就给定一个评价各测量点组合优劣的标准, 其基本思路来源于对第二章最小二乘法误差上界的估计。

首先, 令测量值的绝对误差为 ε , 则

$$\begin{bmatrix} \bar{\lambda} \\ \bar{X} \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \lambda^* \\ X^* \end{bmatrix} + \varepsilon \quad (9)$$

式中: λ^* 、 X^* 为结构的真实频率和模态。由于参数识别过程实际上是对真实值, 而不是测量值进行的(测量值由于带有误差而一般不符合力学模型)。因此, 识别过程的残差向量 R 同时是参数和绝对误差的函数。于是, 定义第 k 次参数估计的偏差。

$$h^{(k)} = p^{(k)} - p^* \quad (10)$$

式中: p^* 为结构的真实参数。将式(4)定义的迭代关系记为 $p^{(k)} = G(p^{(k-1)}, \varepsilon)$ 代入式(10), 并以 $(p^*, 0)$ 为起点, 使用中值定理可得:

$$\begin{aligned} h^{(k)} &= G(p^{(k-1)}, \varepsilon) - p^* \\ &= \frac{\partial G(p_1, \varepsilon_1)}{\partial p} h^{(k-1)} + \frac{\partial G(p_2, \varepsilon_2)}{\partial \varepsilon} \varepsilon \end{aligned} \quad (11)$$

式中: (p_1, ε_1) 和 (p_2, ε_2) 分别是介于 $(p^*, 0)$ 和 $(p^{(k-1)}, \varepsilon)$ 的一点。

为了方便下面的推导, 定义:

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{\partial G(p_1, \varepsilon_1)}{\partial p}, A = \frac{\partial G(p_2, \varepsilon_2)}{\partial \varepsilon} \varepsilon \\ L_\Omega &= \max(\|\Omega\|), L_A = \max(\|A\|) \end{aligned} \quad (12)$$

于是有:

$$\begin{aligned} \|h^{(k)}\| &\leq L_\Omega \|h^{(k-1)}\| + L_A \leq L_\Omega (L_\Omega \|h^{(k-2)}\| + L_A) \\ &+ L_A \leq L_\Omega^k \|h^{(0)}\| + (1 + L_\Omega + L_\Omega^2 + \dots + L_\Omega^{k-2}) L_A \end{aligned} \quad (13)$$

若 $L_\Omega < 1$, 则:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|h^{(k)}\| \leq \frac{L_A}{1 - L_\Omega} \quad (14)$$

这样, 在 $L_\Omega < 1$ 的条件下, 就可以使用误差上界作为评价测量点组合的优劣程度的标准。而且 L_Ω 越小, 迭代算法的收敛速度也越快。

上述误差上界估计过程中, 需要给定 L_Ω 和 L_A , 这可以通过将(11)式中的 (p_1, ε_1) 和 (p_2, ε_2) 设为 $(p^*, 0)$ 完成, 这实际上是在 $(p^*, 0)$ 展开 $h^{(k)}$ 并略去高阶项的结果。

2.2 测量点优化算法的实现

在诸多测量点优化算法中, 最简单的是每次增加或减少一个点, 以获得最优的测量点组合。这一

算法虽然效率很高,但是由于局部最优组合的存在,往往不能获得理想的测量点组合。而现代启发式算法虽然声称可以获得“全局”最优解,但是由于这些方法中的参数难以确定,而且计算时间往往很长,在实际的参数识别中也不便使用。我们在针对多传感器的参数识别问题上,做过深入的研究,提出了一套行之有效的启发式优化算法。在大多数情况下,这一算法可以相对高效地获得较为理想的测量点组合,并经过了大量数值算例和实验数据的测试。这里将沿用该启发式优化算法,同时在算法结构中加入误差更新的步骤,试图使算法可以找出更合理的测量点优化组合,获得更良好的参数识别结果。

测量点优化算法的基本操作是局部搜索算法,但若仅使用这些局部搜索技术往往优化过程很快地陷入局部最优解。

在进行局部搜索之前需要对测量点集合进行适当的划分,在没有特殊的先验信息的条件下,没有理由将更多的传感器分给某个子集。因此,将总的测量点平均划分是最为合理的选择。设频率和各阶模态的测量点总数为 N_m , 需要识别的参数个数为 N_p , 那么将初始的传感器集合划分为 $N_s = \left\lceil \frac{N_m}{N_p} \right\rceil$ 个子集合, 其中 $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算符。这样可知除最后一个子集合外, 其他子集合的测量点个数均为 N_p , 最后一个子集合的个数则小于等于 N_p 。顺序计算各个子集合的 L_Ω 和偏差 B , 将 $L_\Omega < 1$ 的集合中偏差 B 最小的一个记为最优集合 S_{best} 。这样就完成了测量点集合的划分工作。

3 变电构架损伤识别验证算例

3.1 换流变小母线架构验证算例

这一部分过程与上例类似, 故主要说明操作步骤。本算例采用换流变小母线架构, 为了简化, 没有考虑顶端的锥形结构。基本尺寸为: 两个相邻塔身中线之间的间距为 10.5 m; 塔身梯形段顶面距离地面 12 m, 梯形段底面边长 3 m, 宽 1.5 m; 竖直线段最高位置距地面 21 m, 截面边长为 1.5 m; 连接两个塔身的连接段截面边长 1.5 m, 两端各自向塔身外侧延伸 5.5 m。其基本结构可以参照图 1 中的有限元模型。

3.1.1 有限元模型

选择单元类型为 BEAM 188, 选择 Material

Models 为线弹性模型, 弹性模量设为 210 GPa, 泊松比设为 0.3, 密度设为 7840 kg/m^3 , 为简单起见, 截面选择 160 mm × 12 mm 的等边角钢。输入 172 个节点的坐标信息, 并连接成梁单元, 完全固定结构与地面的连接处, 即可得到图 2 所示的有限元模型。本例将结构区域分为 10 块进行分析以获得 10 组独立的材料参数(图 2)。

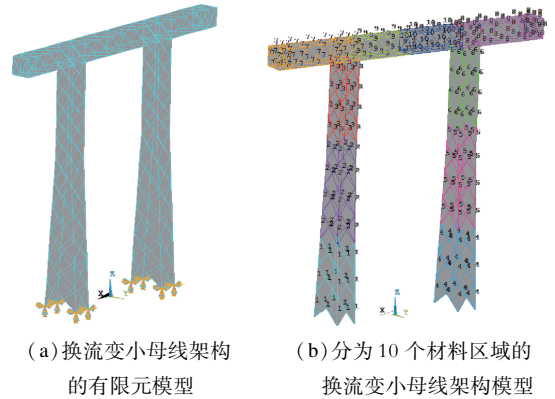


图 1 母线架构模型

Fig. 1 Structure Model of Bus Gantry

3.1.2 结构损伤的模拟

损伤单独分成一个区, 将结构剩余的部分分为另一个区, 来模拟一处损伤, 本例的损伤取在第 2 个材料区域中的一部分梁上(图 3)。损伤位置处的弹性模量取为 200 GPa, 相对于结构的其它位置而言有 10 GPa 的刚度下降。

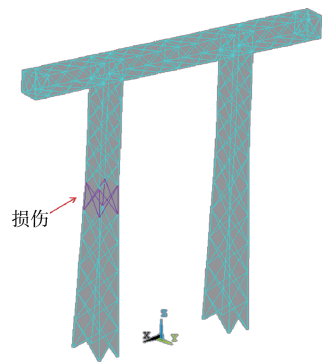


图 2 在第 2 个材料区域上模拟 1 处损伤

Fig. 2 Simulate a Damage in the Second Material Area

对该受损的有限元模型进行 5 阶模态分析, 可以得到 5 个频率信息和各个节点的振型信息。最终沿着塔高方向和水平连接段的水平方向取定 34 个测量点, 只考虑前三阶模态, 并且结合健康结构的振型, 每阶模态上只考虑幅值最大的方向上的振型

表 1 小母线架构模型的反分析结果对比

Table 1 Comparison of the Inverse Analysis Results for the Bus Gantry Structure Model

Pa

| 材料 | 不含误差(准确值) | 含误差无测点优化 | 含误差测点优化 |
|-------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| MAT1 | 2.104 401 189 529 096 E11 | 2.110 449 657 375 540 E11 | 2.114 735 476 973 902 E11 |
| MAT2 | 2.071 654 021 869 394 E11 | 2.104 905 116 704 007 E11 | 2.099 838 123 595 917 E11 |
| MAT3 | 2.092 667 396 976 364 E11 | 2.120 289 718 764 360 E11 | 2.123 711 490 224 055 E11 |
| MAT4 | 2.099 418727 871 864 E11 | 2.105 409 670 067 899 E11 | 2.106831 082 268 535 E11 |
| MAT5 | 2.101 080 273 653 748 E11 | 2.135 042 380 365 279 E11 | 2.133 999 226 136 260 E11 |
| MAT6 | 2.096 677 672 172 117 E11 | 2.123 652 034 400 748 E11 | 2.120 900 792 685 104 E11 |
| MAT7 | 2.122 851 731 522 664 E11 | 2.183 646 858 130 161 E11 | 2.142 129 245 057 792 E11 |
| MAT8 | 2.101 874 479 682 159 E11 | 2.163473 451 908 610 E11 | 2.127 792 964 706 251 E11 |
| MAT9 | 2.102 708 386 520 458 E11 | 2.113 102 694 833 759 E11 | 2.135 540 610 243 975 E11 |
| MAT10 | 2.095 631 155 032 205 E11 | 2.105 087 972 894 423 E11 | 2.117 279 043 486 575 E11 |

数据,按照本软件的输入格式给出测量数据文件,而且这些数据不带误差的。

3.1.2.1 不含误差情形的损伤检测

启动变电架构损伤检测软件,直接进行不启动测点优化功能的反分析,经过3步迭代即可算得不含误差情形下各材料区域的等效弹性模量(见表1)。由于数据不含有任何误差,该值可视为等效弹性模量的准确值。由表1可知,损伤发生的区域正好是预计的第2个材料区域。

3.1.2.2 含误差情形的损伤检测

通过给测量数据文件施加适当的误差,观察反分析过程的稳定性,并考察测点优化对等效弹性模量辨识结果的影响。

所有频率信息叠加上了0.01 Hz的误差,给每个振型信息叠加了 1×10^{-5} 的误差,然后对振型信息按模态和方向进行了归一化,并与无误差的归一化测量数据相减,得到振型误差。以此归一化后的测量数据文件作为输入,仍然选用同样的ANSYS模型文件,分别按照关闭和开启测点优化进行反分析,考察测点优化的作用,本例在测点优化中将前两阶频率设为信任值。反分析结果与不含误差的损伤检测结果一道列在表1中。

由表1可知,在已给定的误差水平下,含误差无测点优化与含误差测点优化都辨识出MAT2的等效弹性模量辨识结果都是最低的。但两者与准确值之间的偏差相差很大,前者与准确值偏差的无穷范数为 6.16×10^9 ,远大于后者的 2.82×10^9 。可见测点优化对辨识结果有了显著的改善。不过,由于有测量误差的影响,再加之损伤程度较低,从等效刚度辨

识结果中已经很难发现损伤。

以上两个算例验证了本软件的有效性,并且当结构比较复杂时,测点优化功能能够显著地提高检测结果的准确性。

4 结论

本文基于频率和模态推导了变电构架结构的损伤识别的理论模型。且充分考虑了测量误差对损伤识别结果的影响。为了尽量提高损伤识别的精度,我们采取了以下措施:

1)采用部分频率和模态片段来进行损伤识别,提高了灵敏度。

2)采用测量点优化选择算法来保证损伤识别过程的适用性。

3)采用交替进行测量点优化选择、损伤识别和误差更新操作来最大限度地减少先验信息不准确所带来的识别误差。

参考文献:

- [1] 吉洪诺夫,阿尔先宁. 不适定问题的解法[M]. 王秉忱,译. 北京:地质出版社,1979.
- [2] 黄光远,刘小军. 数学物理反问题[M]. 济南:山东科学技术出版社,1993.
- [3] ADAMS R D, CAWLEY P, PYE C J, et al. A Vibration Technique for Non-destructively Assessing The Integrity of Structures. ARChive; Journal of Mechanical Engineering Science 1959-1982, 20(2), 1978: 93-100.
- [4] XIANG Z H, ZHANG Y. Changes of Modal Properties of Simply-supported Plane Beams Due to Damage[J]. Interaction and Multiscale Mechanics, 2009, 2(2): 171-193.

(下转第76页 Continued on Page 76)

参数, 需要通过在不同地区长期监测积累获得, 后续将在本文研究成果的基础上持续开展高塔直击雷监测和人工引雷试验, 以进一步为电网防雷设计和雷电定位系统雷电流遥测结果校正提供参考依据。

参考文献:

- [1] 解广润. 电力系统过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 张义军, 杨少杰, 吕伟涛. 2006-2011年广州人工触发闪电观测试验和应用 [J]. 应用气象学报, 2012, 23(5): 513-522.
ZHANG Yijun, YANG Shaojie, LÜ Weitao. Comprehensive Observation Experiments and Application Study of Artificially Triggered Lightning During 2006-2011 [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(5): 513-522.
- [3] 陈绿文, 张义军, 吕伟涛. 闪电定位资料与人工引雷观测结果的对比分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1896-1902.
CHEN LÜ wen, ZHANG Yijun, LÜ Weitao. Comparative Analysis Between LLS and Observation of Artificial-triggered Lightning [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1896-1902.
- [4] 孙萍, 郑均庆, 吴璞三. 220 kV 新杭线 I 回路 27 年雷电流幅值实测结果的技术分析 [J]. 中国电力, 2006, 39(7): 74-76.
SUN Ping, ZHENG Junqing, WU Pusan. Technical Analysis of Testing Results for Lightning Current Amplitude in 27 Years on 220 kV Xin-Hang No. 1 Line [J]. Electric Power, 2006, 39(7): 74-76.
- [5] 陈水明, 何金良, 曾嵘. 输电线路雷电防护技术研究(一): 雷电参数 [J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2903-2909.
CHEN Shuiming, HE Jinliang, ZENG Rong. Lightning Protection Study of Transmission Line, Part I: Lightning Parameters [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2903-2909.

- [6] 陈家宏, 张勤, 冯万兴. 中国电网雷电定位系统与雷电监测网 [J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 425-431.
CHEN Jiahong, ZHANG Qin, FENG Wanxing. Lightning location System and Lightning Detection Network of China Power Grid [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 425-431.
- [7] 孙伟忠, 周文俊, 马仪. 基于雷电流测量的线路雷击类型判断方法 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 33-35.
SUN Weizhong, ZHOU Wenjun, MA Yi. The Lightning Type Judgment of Transmission Lines Based on Lightning Current Measurement [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(6): 33-35.
- [8] 樊灵孟, 何宏明, 钟定珠. 人工引雷试验中雷电流测量分析 [J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 50-52.
FAN Lingmeng, HE Hongming, ZHONG Dingzhu. Analysis of The Measurement of Artificial Triggered Lightning Current [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4): 50-52.
- [9] 樊灵孟, 李志峰, 何宏明. 雷电定位系统定位误差分析 [J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 61-63.
FAN Lingmeng, LI Zhifeng, HE Hongming. Analysis of Location Error of Guangdong Lightning Location System [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7): 61-63.
- [10] 陈绿文, 黄智慧, 禹继. 一次人工触发闪电事件的定位误差分析 [J]. 广东气象, 2010, 32(1): 15-21.
CHEN LÜwen, HUANG Zhihui, YU Ji. Analysis of Location Errors for One Artificially-triggered Lightning [J]. Guangdong Meteorology, 2010, 32(1): 15-21.
- [11] 南方电网科学研究院有限责任公司. 雷电流测量及对比研究 [R]. 广州: 南方电网科学研究院有限责任公司, 2013.
- [12] 马仪, 周文俊, 孙伟忠. 雷电流传感器罗氏线圈的研制及测试 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 39-41.
MA Yi, ZHOU Wenjun, SUN Weizhong. Development and Test of Rogowski Coil in Lightning Current Transducer [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(6): 39-41.

(责任编辑 高春萌)

(上接第 71 页 Continued from Page 71)

- [5] 李毅谦, 向志海, 岑章志. 关于悬臂梁振动特性的损伤灵敏度的研究 [J]. 工程力学, 2009, 25(12): 17-23.
- [6] FAN W, QIAO P. Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study [J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10(1): 83-111.
- [7] FARRAR C R, JAUREGUI D A. Comparative Study of Damage Identification Algorithms Applied to a Bridge: I. Experiment [J]. Smart Materials and Structures, 1998(7): 704-719.
- [8] ALLEMANG R J, BROWN D L. Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis [C]. Proceedings of the First International Modal Analysis Conference, Society for Experimental Mechanics, Orlando, 1982: 110-116.
- [9] LIEVEN N A J, EWINS D J. Spatial Correlation of Modespaces: the Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC) [C]. Proceedings of the 6th International Modal Analysis Conference

Society for Experimental Mechanics, Kissimmee, 1988: 1063-1070.

- [10] FARRAR C R, JAMES I G H. System Identification From Ambient Vibration Measurements on a Bridge [J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 205(1): 1-18.
- [11] ALVANDI A, CREMONA C. Assessment of Vibration-based Damage Identification Techniques [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006(292): 179-202.
- [12] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B. A summary Review of Vibration-based Damage Identification Methods [J]. Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2): 91-105.
- [13] FARRAR C R. Vibration-based Structural Damage Identification [J]. Philosophical Transactions of The Royal Society: Mathematical, Physical & Engineering Sciences, 2001, 359(1778): 131-149.

(责任编辑 郑文棠)