

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.184

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于关联模态云推理算法的 输电塔结构损伤识别

郭惠勇, 何清林

(重庆大学土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:为了解决输电塔等工程结构在不确定因素干扰下的损伤识别问题,提出了一种基于关联模态的云推理算法。建立残余力基本方程,并分析了基于残余力向量的损伤识别原理;提出了基于残余力的云推理算法,给出了云模型的数字特征,分析了前件云发生器和后件云发生器,给出了基于灰云模型的定性规则库建立方法,并利用云规则组成了相应的云推理系统。考虑到残余力法易受测量噪声等不确定因素干扰的弱点,进一步提出了关联模态云推理算法,以提高损伤识别的精度和可靠性,并采用输电塔结构模型进行了损伤识别研究。数值计算结果表明,关联模态云推理算法可以较好地识别出结构损伤,其识别效果明显优于残余力向量法和残余力云推理算法。

关键词:损伤识别;残余力;云推理;模态;云模型

中图分类号: TU392.6; TM753

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2020)02-0135-08

Damage identification of transmission tower based on associated mode cloud reasoning algorithm

Guo Huiyong, He Qingling

(School of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In order to identify the damage of transmission tower and other engineering structures under the influence of uncertain factors, a cloud reasoning algorithm based on associated mode is presented. Firstly, residual force equation is established and damage identification principle based on residual force vector is analyzed. Then, a cloud reasoning algorithm based on residual force is proposed. Numerical characteristics of cloud model are given, front cloud generator and rear cloud generator are analyzed, qualitative rules based on gray cloud model are proposed, and corresponding cloud reasoning system is composed by using cloud rules. Finally, given the drawback that residual force is susceptible to uncertain factors such as measurement noise, a cloud reasoning algorithm based on associated mode is presented to enhance the identification accuracy and reliability. And a transmission tower structure is applied to damage identification. The simulation results indicate that the cloud reasoning algorithm based on associated mode

收稿日期: 2019-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(51578094)

作者简介: 郭惠勇(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构损伤识别研究, E-mail: guohy@cqu.edu.cn.

Received: 2019-07-13

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51578094)

Author brief: Guo Huiyong (1971-), professor, doctoral supervisor, main research interests: structural damage identification, E-mail: guohy@cqu.edu.cn.

can well identify structural damage, and the identification results of the proposed algorithm are obviously superior to those of residual force vector method and the cloud reasoning algorithm based on residual force.

Keywords: damage identification; residual force; cloud reasoning; mode; cloud model

随着经济的发展和电力需求的日益增长,中国已建成多条特高压输电线路。输电塔是输电线路的重要组成部分,其在服役期间常会受到雨雪的腐蚀以及风致荷载的疲劳作用,从而造成结构的损伤和承载力下降,最终可能导致倒塌等严重事故,故有必要对输电塔等工程结构进行健康监测和损伤识别研究^[1]。结构的损伤会降低结构的刚度等物理量,导致结构的动力特性也随之变化。因此,许多研究者利用损伤前后的动力特性参数进行损伤识别。常见的动力特性参数包括频率、振型、曲率模态、应变能、频率响应函数、柔度矩阵、残余力等^[2-4]。频率识别技术虽然较为简单,但结构的固有频率对局部小损伤的灵敏度不高,而且其他原因也可能导致频率变化。例如 Aktan 等^[5]的研究表明,结构在未损伤时,温度的改变也会导致频率产生大约 5% 的变化。结构的振型和曲率模态对损伤较为敏感^[6],但高阶振型难以获取,在测量误差干扰下识别精度也难以保证。基于模态应变能和柔度矩阵的损伤识别方法,其实质依然是利用结构的模态参数为主构造相应的应变能和柔度矩阵进行损伤识别,但其对结构的高阶模态数据依赖性较小,可以利用较少的模态阶数得到较好的近似结果^[7-8]。残余力向量法是直接利用结构的刚度矩阵、质量矩阵建立运动方程,并利用残余力向量与各杆件刚度变化量的对应关系进行损伤识别^[9]。蔡小双等^[10]将残余力向量法成功应用于桁架结构的损伤识别研究,并取得较好的识别效果。由于残余力向量法仅需要获取结构的一阶模态数据,并具有概念明确,简单快捷等优点,故具有一定的工程应用研究价值。

输电塔是复杂的三维杆件结构,其损伤识别较为困难。近年来,吴秀峰等^[11]基于柔度理论构建了柔度曲率指标和曲率差指标,对某一酒杯型输电塔进行了损伤识别研究。霍林生等^[12]则提出了基于互相关函数幅值和支持向量机相结合的损伤识别法,对一输电塔的损伤进行了检测研究。由于输电塔损伤识别不仅会受到数量众多的杆件影响,而且还会受到测量噪声等不确定因素干扰,采用传统的方法难以进行具有可靠性的损伤识别。笔者提出一种基于关联模态的云推理算法,并通过算例分析对

输电塔的损伤识别进行分析。

1 残余力向量法

1.1 残余力方程

一个 n 自由度系统的振动微分方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为结构的 n 阶质量、阻尼、刚度矩阵; \mathbf{F} 为激励荷载; $\ddot{\mathbf{x}}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}$ 、 \mathbf{x} 分别是结构的加速度、速度和位移。忽略阻尼后的特征方程为

$$(\mathbf{K} - \lambda_j \mathbf{M})\boldsymbol{\varphi}_j = 0 \quad (2)$$

式中: λ_j 、 $\boldsymbol{\varphi}_j$ 是结构的第 j 阶特征值和特征向量。结构损伤会引起如下物理量变化

$$\mathbf{K}_d = \mathbf{K}_u - \Delta\mathbf{K}, \mathbf{M}_d = \mathbf{M}_u - \Delta\mathbf{M} \quad (3)$$

式中: \mathbf{K}_u 、 \mathbf{M}_u 、 \mathbf{K}_d 、 \mathbf{M}_d 分别是损伤前后的刚度和质量矩阵; $\Delta\mathbf{K}$ 、 $\Delta\mathbf{M}$ 则是相应的刚度和质量矩阵的变化量。损伤后的特征方程为

$$(\mathbf{K}_d - \lambda_{dj} \mathbf{M}_d)\boldsymbol{\varphi}_{dj} = 0 \quad (4)$$

式中: λ_{dj} 、 $\boldsymbol{\varphi}_{dj}$ 是损伤后的第 j 阶特征值和特征向量。

将式(3)代入式(4),可得

$$(\mathbf{K}_u - \lambda_{dj} \mathbf{M}_u)\boldsymbol{\varphi}_{dj} = (\Delta\mathbf{K} - \lambda_{dj} \Delta\mathbf{M})\boldsymbol{\varphi}_{dj} \quad (5)$$

令 $\mathbf{R}_j = (\mathbf{K}_u - \lambda_{dj} \mathbf{M}_u)\boldsymbol{\varphi}_{dj}$, 以及考虑裂缝等损伤对于刚度有显著影响,但对于质量影响很小,故可忽略 $\Delta\mathbf{M}$ 项,则式(5)可简化为^[9-10]

$$\Delta\mathbf{K}\boldsymbol{\varphi}_{dj} = \mathbf{R}_j \quad (6)$$

式中: \mathbf{R}_j 是残余力向量,该项与损伤引起的刚度变化量密切相关。

1.2 基于残余力的损伤识别

多自由度桁架结构的整体刚度矩阵 \mathbf{K} 及其刚度变化矩阵 $\Delta\mathbf{K}$ 可分解为^[9-10]

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^T; \Delta\mathbf{K} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{P}\mathbf{A}^T \quad (7)$$

式中:对角阵 $\mathbf{P} = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_m)$; 对角阵 $\Delta\mathbf{P} = \text{diag}(\Delta k_1, \Delta k_2, \dots, \Delta k_m)$; k_i 和 Δk_i 是第 i 根杆的轴向刚度和刚度变化量; m 是杆件总数; \mathbf{A} 是 $n \times m$ 阶刚度联系矩阵。由于 $\Delta\mathbf{P}$ 是对角矩阵,利用式(7)可将 $\Delta\mathbf{K}$ 的元素表示为 $\Delta\mathbf{K}_{ij} =$

$$[A_{i1}A_{j1}, A_{i2}A_{j2}, \dots, A_{im}A_{jm}][\Delta k_1, \Delta k_2, \dots, \Delta k_m]^T \quad (8)$$

利用刚度矩阵 \mathbf{K} 中元素对第 η 个单元的敏感性分析可得

$$\Delta K_{ij} = \frac{\partial K_{ij}}{\partial k_{\eta}} (\Delta k_{ij}) \quad (\eta = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

并利用式(8),可得

$$A_{\eta} A_{j\eta} = \frac{\partial K_{ij}}{\partial k_{\eta}} \quad (\eta = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

利用式(10)可求得刚度联系矩阵 \mathbf{A} 。令矩阵 \mathbf{A} 的第 i 列表达为向量 \mathbf{a}_i ,则公式(8)可整合为

$$\Delta \mathbf{K} = \sum_{i=1}^m \Delta k_i \mathbf{a}_i \mathbf{a}_i^T \quad (11)$$

将式(11)代入式(6),化简可得

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{R}_j \quad (12)$$

式中:残余力指标 $\boldsymbol{\gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m]^T$,其第 i 个分量为

$$\gamma_i = \Delta k_i \mathbf{a}_i^T \boldsymbol{\phi}_{aj} \quad (13)$$

利用式(12)和式(13)可求出损伤程度,但由于输电塔结构的自由度 n 与杆件数目 m 往往不一致,刚度联系矩阵 \mathbf{A} 不是正方形,只能采用广义逆等有偏方法求解损伤,以及考虑测量误差等的影响,采用残余力向量法难以准确求解复杂的塔架体系,故进一步采用云推理方法以提高识别可靠性。

2 基于云推理的损伤识别

2.1 云模型

云模型是定性概念和定量数据之间的不确定性转换模型,可有效地处理随机性与模糊性所造成的不确定问题。云模型主要通过 3 个数字特征来反映事物的随机性与模糊性,这 3 个数字特征包含期望 E_x 、熵 En 、超熵 He ^[13]。

期望 E_x :是论域空间中可表示定性概念的值,也是定性概念量化的最典型样本。云滴在论域空间的分布越集中,则表示对该概念的认识越统一,相反,则说明对概念的认识越不稳定。

熵 En :是定性概念不确定性度量,可反映代表定性概念云滴的离散程度,该数字特征由概念的随机性和模糊性共同决定。

超熵 He :是熵的不确定性度量,反映了定量论域上对定性概念有贡献的所有点的不确定性聚集程度。

2.2 基于残余力的云推理

基于残余力指标可以建立相应的残余力云推理算法。目前,并无与此相同的方法,在此基础上,可以进一步提出改进的关联模态云推理算法,以提高损伤识别的可靠性。云推理算法需要利用前件云和

后件云发生器。前件云是利用定量论域中的数值 x 生成相应的确定度,后件云则是利用定量论域中的确定度 μ 生成相应的估计值。

前件云的运行规则为:利用云的数字特征(E_x 、 En 、 He)以及定量论域 U 上特定的数值 x_0 ,首先生成以 En 为期望值、 He 为标准差的正态随机数 En' ;再生成相应的确定度 $\mu_r = \exp[-(x_0 - E_x)^2 / (2En'^2)]$,最后产生云滴 $\text{drop}(x_0, \mu_r)$ 。

后件云的运行规则为:利用云的数字特征和定性概念 C 上的确定度 μ_0 以及所需生成的云滴数,首先生成以 En 为期望值、 He 为标准差的正态随机数 En' ;再生成相应的值 $x_r = E_x \pm En' \sqrt{-2 \ln \mu_0}$,最后产生云滴 $\text{drop}(x_r, \mu_0)$ 。

还需要建立云推理的规则库,具体方法为:首先设立结构的损伤程度区间并确立多个损伤模式,例如,可设立 $[c_1, c_2]$ 、 $[c_2, c_3]$ 、 \dots 、 $[c_l, c_{l+1}]$ 共 l 个损伤模式,其中, c_i 为损伤模式界限值。基于损伤模式的界限值,利用结构有限元模型和界限值对应的残余力指标可建立前件规则库。利用损伤程度区间可建立后件规则库,两种规则库可统一匹配为定性规则库。而规则库的建立均采用灰云模型^[14] 计算。利用界限值可得灰云模型的期望、熵、超熵。则第 i 模式的期望、熵、超熵为

$$E x_i = (c_i + c_{i+1}) / 2 \quad (14)$$

$$E n_i = \frac{c_{i+1} - c_i}{6} \quad (15)$$

$$H e_i = \frac{E n_i}{p} \quad (16)$$

式中: p 是云熵的离散度因子。

最后通过规则发生器,结合定性规则库和云发生器可实现损伤识别过程,并生成云推理系统。具体运行时可利用实际损伤后含不确定噪声干扰的多次测量数据作为输入值,通过云滴化和规则发生器可得到带有确定度信息的云滴作为输出值,得到足够多的云滴之后,再采用精确化方式获得最终输出值。笔者采用的精确化方式为加权平均方法,以输出云推理的计算值,具体为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{f=1}^l x_b^f \mu_f}{\sum_{f=1}^l \mu_f} \quad (17)$$

式中: l 为损伤模式数;后件云输出的云滴为 (x_b^f, μ_f) , x_b^f 为第 f 个模式规则被激活后的定量输出值, μ_f 为

其确定度; \bar{x} 为其加权平均后的云推理计算值。

2.3 改进的关联模态云推理

由于残余力向量法采用的是有偏估计进行损伤识别,而基于残余力指标的云推理算法也会受到该有偏估计干扰。在结构较为复杂以及测量噪声的不确定干扰下,基于残余力的识别结果往往会失真,故借鉴残余力向量法,提出了一种基于关联模态的云推理算法。具体是利用残余力向量法中的刚度联系矩阵 \mathbf{A} 构建一种关联模态指标。由于结构损伤前后的刚度联系矩阵不会发生改变,则可建立第 j 阶关联模态指标 T_j

$$T_j = \phi_{dj}^T \mathbf{A} \quad (18)$$

式中:刚度联系矩阵可表示为 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m]$ 的形式,其中 \mathbf{a}_i 为第 i 根杆件的单元刚度联系向量; m 为结构杆件总数。与基于残余力的方法相比,关联模态指标是仅与结构振型相关的参数,通过刚度联系矩阵的转换后则会产生对应杆件的计算值,故可采用关联模态指标作为云推理参数。将残余力指标替换为关联模态指标并重新建立云推理系统,详见图 1,图中的关联模态数据可利用式(18)并结合测量模态数据来获取。主要变化是利用关联模态指标构建前件规则库,利用损伤程度区间模式建立后件规则库,两者匹配组成新的定性规则库,并将测量的模态数据转化为关联模态数据作为输入值。该方法避免了残余力的近似求解问题,故具有更高的可靠性。该方法可简称为关联模态云推理算法。

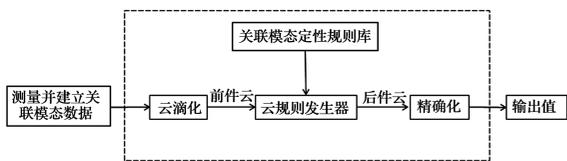


图 1 关联模态云推理系统

Fig. 1 Cloud reasoning System based on associated mode

3 数值计算

输电塔结构如图 2(a)所示,该三维有限元结构模型一共有 116 根杆件、30 个节点。节点理论自由度数为 90,考虑底端的约束,其实际自由度数为 78。杆件尺寸见图 2(b),其结构材料参数信息为:各杆件截面面积为 $A = 0.001 \text{ m}^2$,弹性模量 $E = 7.2 \times 10^{10} \text{ Pa}$,密度 $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$ 。拟采用第 1 阶模态数据进行损伤识别,其中云推理参数为:损伤模式数为 6,界限值为 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6,云熵

的离散度因子 $p = 10$ 。选取离散度因子的数值为 10,该值既可以使云模型的熵具有一定的离散变化性,又能防止过大的变化性使其失去规律性。

由于测量数据常会受到噪声等不确定因素干扰,在数值计算中,需要将人工噪声添加到模态数据中,Udwadia^[15]提出的噪声模拟方法随机性更强,也更接近于真实测量情况。故采用 Udwadia 方法来模拟受噪声干扰的实验测量数据

$$\Phi_{ki}^{(\text{exp})} = \Phi_{ki}^{(\text{cal})} \cdot (1 + \alpha \cdot \xi) \quad (19)$$

式中: $\Phi_{ki}^{(\text{exp})}$ 为第 i 阶模态第 k 位的试验测量数据; $\Phi_{ki}^{(\text{cal})}$ 为第 i 阶模态第 k 位的理论计算值; α 为噪声水平; ξ 为服从标准正态分布的随机数。该噪声模拟方法使每个自由度均有不同的随机数,故具有较强的随机性。笔者仅采用 1 阶模态进行损伤识别研究,考虑到测量噪声等引起的不确定性,采用了 20 次随机测量数据作为云推理的输入值,而对于残余力向量法则采用了 20 次测量的模态均值。具体损伤工况如表 1 所示。

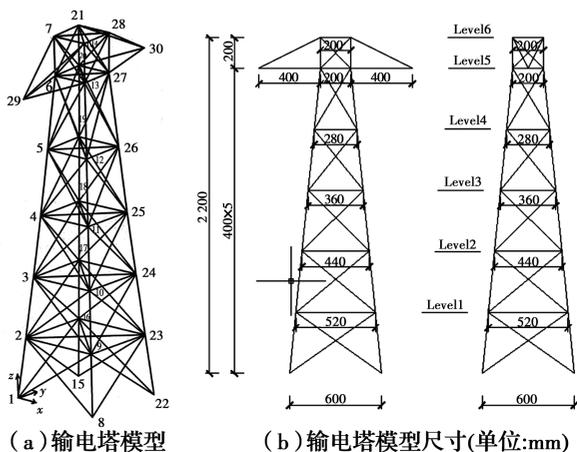


图 2 输电塔模型和尺寸

Fig. 2 Transmission tower model and size

表 1 输电塔结构的损伤工况

Table 1 Damage cases for transmission tower structure

工况 1		工况 2		工况 3	
杆件 (节点号)	损伤程 度/%	杆件 (节点号)	损伤程 度/%	杆件 (节点号)	损伤程 度/%
80 (17, 3)	25	5 (22, 16)	20	10 (3, 9)	20
		83 (25, 18)	25	50 (8, 9)	20
				74 (9, 23)	20

关联模态云推理算法的具体步骤和过程为:

1) 根据结构的损伤程度区间确立多个损伤模式,设立 $[0, 0.1]$ 、 $[0.1, 0.2]$ 、 \dots 、 $[0.5, 0.6]$ 共 6

个损伤模式,基于损伤模式的界限值,利用结构有限元模型和损伤界限值对应的关联模态界限值可建立前件云规则库。利用损伤模式界限值可建立后件云规则库,均采用灰云模型计算相应的峰值、熵以及超熵。两种规则库可合成关联模态定性规则库。

2)利用实际损伤后含不确定噪声干扰的多次测量数据,结合前件云发生器生成不同损伤模式下的多个云滴的确定度数值,再结合后件云发生器生成不同损伤模式下的多个云滴的损伤生成值,从而构成许多不同的 (x_b, μ) 云滴。

3)进行 6 种模式下云滴的加权计算,每个单元均可以计算出加权值,具体采用式(17)计算每个单元的关联模态云推理计算值并输出结果。

残余力云推理算法的步骤与关联模态云推理算法的步骤类似,只是将关联模态数据替换为残余力数据。残余力向量法可以直接利用式(12)并通过求广义逆获取残余力损伤指标。

3.1 工况 1

工况 1 为单损伤问题,输电塔的 80 号杆件发生 25% 的刚度损伤。采用残余力向量法、残余力云推理算法、关联模态云推理算法进行了损伤识别。残余力向量法的损伤识别结果如图 3 所示,由图 3 可知,当噪声水平 α 为 0 时,残余力向量法可以有效地识别出损伤位置,80 号杆件的损伤计算值高于其他杆件;当噪声水平 α 为 2% 时,残余力向量法的识别结果明显失真,其损伤程度已经超出了正常范围 $[0, 1]$ 。这主要是由于输电塔结构复杂且杆件众多,共有 116 根杆件和 78 个自由度,由于杆件数目和自由度数不一致,则采用式(12)求解时只能采用广义逆求解,而杆件未知量数目远远大于方程数目,则只能采用近似的最小范数求解,笔者又利用了随机性较强的式(19)加噪方式,使每个自由度值受到了不同的随机干扰,故仅 2% 的噪声已经使识别结果完全失真。

基于残余力的云推理识别结果如图 4 所示。由图 4 可知,当噪声水平 α 为 0 时,残余力云推理算法可以有效地识别出损伤位置,80 号杆件的损伤值也明显高于其他杆件;当噪声水平 α 为 2% 时,残余力云推理算法的识别结果虽然没有超出正常范围 $[0, 1]$,但也已无法识别出正确的损伤位置。这主要是由于输电塔杆件数远远大于自由度数,求残余力值时依然需要利用近似的最小范数解,再加上随机

噪声引起的进一步干扰,使损伤识别结果已经完全失去了可靠性。

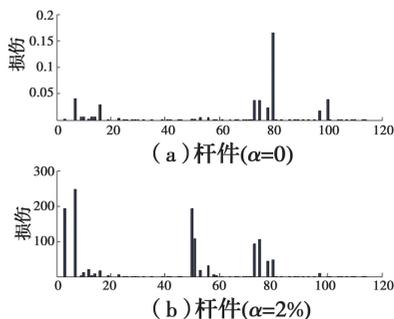


图 3 工况 1 残余力向量法的识别结果

Fig. 3 Identification results of residual force vector method for Case 1

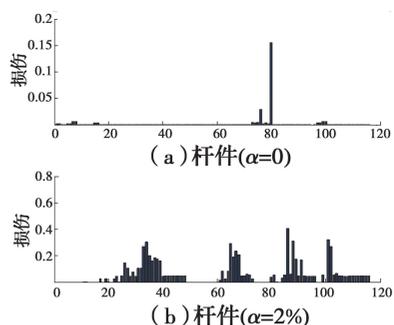


图 4 工况 1 残余力云推理算法的识别结果

Fig. 4 Identification results of cloud reasoning algorithm based on residual force for Case 1

基于关联模态的云推理识别结果如图 5 所示。由图 5 可知,当噪声水平 α 为 0 时,关联模态云推理算法可以较好地检测出损伤位置,80 号杆件的计算结果也明显高于其他杆件;当噪声水平 α 为 2% 时,关联模态云推理算法依然具有较好的损伤识别能力,80 号杆件的损伤指标仍明显高于其他杆件;故继续增大噪声水平到 4%,此时,关联模态云推理算法仍具有一定的损伤识别能力,但杆件 2 和 6 的计算值已经具有了一定的干扰影响。当噪声水平继续增大时,可能会进一步影响关联模态云推理算法的损伤识别结果。在实际应用中,可以通过选取精度较高的传感器来防止噪声水平过大引起的问题。关联模态法避开了求解残余力的最小范数法,利用了简单的关联模态数据直接进行云推理计算,故具有更好的抗噪能力。

3.2 工况 2

工况 2 为双损伤问题,结构的 5 和 83 号杆件分别有 20% 和 25% 的损伤。依然采用残余力向量法、

残余力云推理算法、关联模态云推理算法进行损伤识别。残余力向量法的损伤识别结果如图6所示。由图6可知,当噪声水平 α 为0时,残余力向量法可以识别出杆件83,而对杆件5的识别效果不明显;当噪声水平 α 为2%时,残余力向量法的识别结果明显失真,其损伤程度已经超出了正常范围 $[0,1]$ 。说明对于复杂的三维输电塔结构,残余力向量法即使在不考虑测量误差的前提下,其对于多损伤的识别效果依然欠佳,而在考虑测量噪声时,其识别结果明显失真。

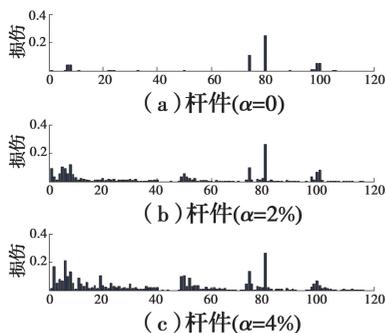


图5 工况1关联模态云推理算法的识别结果

Fig. 5 Identification results of cloud reasoning algorithm based on associated mode for Case 1

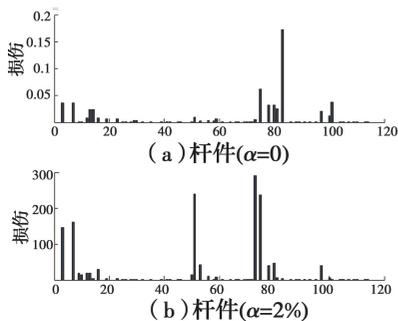


图6 工况2残余力向量法的识别结果

Fig. 6 Identification results of residual force vector method for Case 2

基于残余力的云推理识别结果如图7所示。由图7可知,当噪声水平 α 为0时,残余力云推理算法可以识别出杆件83,而对杆件5的识别效果不明显;当噪声水平 α 为2%时,残余力云推理算法的识别结果虽然没有超出正常范围 $[0,1]$,但明显地失去了损伤识别能力。说明基于残余力指标的云推理算法和残余力向量法具有一定的相关性,都难以对复杂杆件结构进行损伤识别,特别是当塔架结构的杆件数远远大于自由度时,求残余力值需要利用近似的最小范数解,再加上随机噪声引起的不确定干

扰,故识别结果已完全失去可靠性。

基于关联模态的云推理识别结果如图8所示。由图8可知,当噪声水平 α 为0时,关联模态云推理算法可以较好地检测出损伤位置,杆件5和83的计算结果明显高于其他杆件;当噪声水平 α 为2%时,关联模态云推理算法依然具有较好的损伤识别能力,杆件5和83的损伤计算值仍明显高于其他杆件;当噪声水平 α 为4%时,关联模态云推理算法仍具有一定的损伤识别能力,但杆件4、6、7、51等的计算值已经具有了一定的干扰影响。故基于关联模态的云推理算法具有一定的抗噪能力。

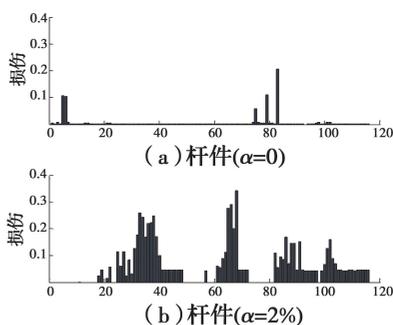


图7 工况2残余力云推理算法的识别结果

Fig. 7 Identification results of cloud reasoning algorithm based on residual force for Case 2

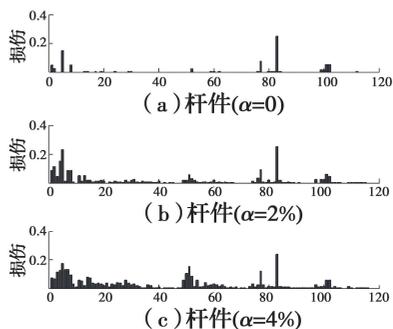


图8 工况2关联模态云推理算法的识别结果

Fig. 8 Identification results of cloud reasoning algorithm based on associated mode for Case 2

3.3 工况3

工况3为三损伤问题,杆件10、50、74均发生20%的损伤。依然采用3种方法进行损伤识别,残余力向量法的损伤识别结果如图9所示,由图9可知,当噪声水平 α 为0时,残余力向量法的识别效果欠佳,虽可以识别出杆件10和50,而对杆件74无法识别,并错误地识别出杆件73;当噪声水平 α 为2%时,残余力向量法的识别结果明显失真,其损伤程度已经超出正常范围 $[0,1]$ 。说明对于复杂的三维输

电塔结构,残余力向量法即使在不考虑测量误差的前提下,其对于多损伤的识别效果依然欠佳,而在考虑测量噪声时,其识别结果明显失真。

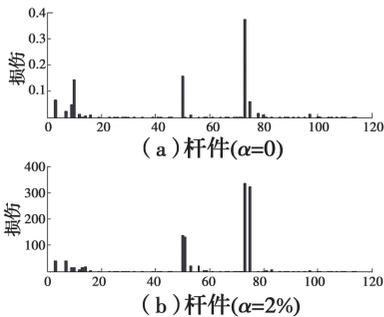


图 9 工况 3 残余力向量法的识别结果

Fig. 9 Identification results of residual force vector method for Case 3

基于残余力的云推理算法的识别结果如图 10 所示。由图 10 可知,当噪声水平 α 为 0 时,残余力云推理算法的识别效果欠佳,其明显对杆件 73 和 98 产生了误识别现象;当噪声水平 α 为 2% 时,残余力云推理算法的识别结果虽然没有超出正常范围 $[0, 1]$,但明显地失去了损伤识别能力。说明基于残余力指标的云推理方法对于复杂塔架结构的识别效果欠佳,在考虑测量噪声时,识别结果已经完全失真。

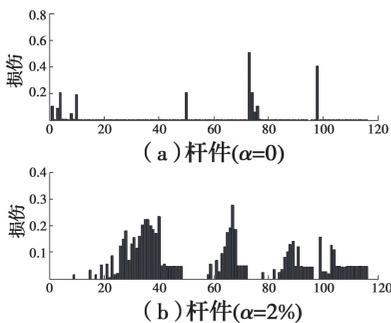


图 10 工况 3 残余力云推理算法的识别结果

Fig. 10 Identification results of cloud reasoning algorithm based on residual force for Case 3

基于关联模态的云推理识别结果如图 11 所示。由图 11 可知,当噪声水平 α 为 0 时,关联模态云推理算法可以较好地识别出损伤位置,杆件 10、50、74 的计算结果明显高于其他杆件;当噪声水平 α 为 2% 时,关联模态云推理算法依然具有较好的损伤识别能力,实际损伤杆件的计算值依然高于其他杆件;当噪声水平提高为 4% 时,关联模态云推理算法仍具有一定的损伤识别能力,但是,杆件 8 等的计算值已经具有了一定的干扰影响。故基于关联模态的云推

理算法具有更好的损伤识别能力。由于求解残余力时需要利用最小范数法,该方法对测量噪声干扰较为敏感,故基于残余力的损伤识别方法抗噪能力相对较低,而关联模态方法避开了求解残余力的最小范数法,直接利用了简单的关联模态数据进行云推理计算,故具有更好的抗噪能力。

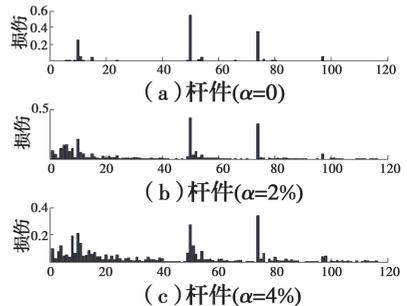


图 11 工况 3 关联模态云推理算法的识别结果

Fig. 11 Identification results of cloud reasoning algorithm based on associated mode for Case 3

由以上 3 个损伤工况可知,当不考虑测量噪声时,残余力向量法和残余力云推理算法对于单损伤的识别效果较好,对于多损伤情况则识别效果欠佳。当考虑测量噪声时,残余力向量法和残余力云推理算法已经完全失真。说明对于输电塔这类复杂的三维塔架结构,在残余力的近似计算和测量噪声的双重影响下,基于残余力的相关方法已经丧失了损伤识别能力。而建议的关联模态云推理算法,即使在测量噪声的干扰下,也具有一定的损伤识别效果。由于在工程实际中,测量噪声等干扰引起的数据不确定问题是不可避免的,特别是对三维复杂结构的影响更大,故有必要发展对于较复杂结构具有更好抗噪性能的损伤识别技术。相对于残余力向量法和残余力云推理算法,建议的关联模态云推理算法具有相对较好的抗噪能力和损伤识别效果。

4 结论

提出了一种关联模态云推理算法以解决三维塔架结构在测量噪声等不确定因素干扰下的损伤识别问题。首先描述了残余力方程以及基于残余力向量的损伤识别理论;然后基于残余力指标提出了不确定云推理算法,描述了云模型的数字特征,建议了适用于损伤识别领域的前件云发生器、后件云发生器、规则发生器和基于残余力指标的定性规则库;最后提出了一种基于关联模态的云推理算法,并建立了相应的定性规则库和云推理系统。通过数值仿真和理论分析,可得出以下结论:

1)对于输电塔等三维塔架结构,残余力向量法和残余力云推理算法的识别效果欠佳。这主要是由于该类结构的杆件数较多且往往大于节点自由度数目,使该类方法难以求出精确解,在进一步的不确定噪声干扰下,识别结果就会失真。

2)关联模态云推理算法具有较好的识别效果,即使在测量噪声干扰下,也具有一定的损伤识别能力。

笔者主要是提出了一种测量噪声干扰下的损伤定位方法,如需进行损伤程度分析,可以采用该方法与遗传算法等相结合的二阶段方法,在第1阶段采用该方法进行较为准确的损伤定位,在第2阶段采用模态数据和遗传算法等相结合,可以对已经识别出的损伤单元进行二次定量分析。该研究的重点是如何在测量噪声环境下进行较为准确的损伤定位。

参考文献:

- [1] CHENG X X, DONG J, HAN X L, et al. Structural health monitoring-oriented finite-element model for a large transmission tower [J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2018, 16(1):79-92.
- [2] DAS S, SAHA P, PATRO S K. Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: A review [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2016, 6(3):477-507.
- [3] LAM H F, YANG J H. Bayesian structural damage detection of steel towers using measured modal parameters [J]. *Earthquakes and Structures*, 2015, 8(4):935-956.
- [4] LI P J, XU D W, ZHANG J. Probability-based structural health monitoring through Markov chain Monte Carlo sampling [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2016, 16(7):1550039.
- [5] AKTAN A E, LEE K L, CHUNTAVAN C, et al. Modal testing for structural identification and condition assessment of constructed facilities [C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1994:462-468.
- [6] PERERA R, TORRES R. Structural damage detection via modal data with genetic algorithms [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(9):1491-1501.
- [7] SEYEDPOOR S M. A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2012, 47(1):1-8.
- [8] 曹晖, 张新亮, 李英民. 利用模态柔度曲率差识别框架的损伤 [J]. *振动与冲击*, 2007, 26(6):116-120, 124, 188.
CAO H, ZHANG X L, LI Y M. Damage evaluation of frames by modal flexibility curvature [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(6):116-120, 124, 188. (in Chinese)
- [9] KAHL K, SIRKIS J S. Damage detection in beam structures using subspace rotation algorithm with strain data [J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(12):2609-2614.
- [10] 蔡小双, 纪国宜. 基于残余力向量法的桁架结构损伤识别 [J]. *工业建筑*, 2013, 43(Sup1):211-213.
CAI X S, JI G Y. A damaged identification method of truss structures [J]. *Industrial Construction*, 2013, 43(Sup1):211-213. (in Chinese)
- [11] 吴秀峰, 常青. 柔度曲率法在输电塔损伤识别中的应用 [J]. *噪声与振动控制*, 2016, 36(4):174-177, 205.
WU X F, CHANG Q. Application of flexibility curvature method in damage detection of transmission towers [J]. *Noise and Vibration Control*, 2016, 36(4):174-177, 205. (in Chinese)
- [12] 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, 627.
HUO L S, LI X, LI H N, et al. Damage identification of transmission tower based on cross correlation functions amplitude and support vector machine [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(3):495-500, 627. (in Chinese)
- [13] WANG D, ZENG D B, SINGH V P, et al. A multidimension cloud model-based approach for water quality assessment [J]. *Environmental Research*, 2016, 149:113-121.
- [14] 王洪利, 冯玉强. 基于灰云的改进白化模型及其在灰色决策中应用 [J]. *黑龙江大学自然科学学报*, 2006, 23(6):740-745, 750.
WANG H L, FENG Y Q. Ablation model based on the improved gray cloud and its applicant in the gray decision [J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2006, 23(6):740-745, 750. (in Chinese)
- [15] UDWADIA F E. Structural identification and damage detection from noisy modal data [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2005, 18(3):179-187.