

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2018.10.024

基于应变能和隶属度的结构损伤识别研究^①

郭惠勇^{1,2}, 王志华^{1,2}

1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045

摘要: 为了解决测量噪声等引起的损伤识别结果不确定问题, 提出了一种基于模态应变能和隶属度的损伤识别方法. 首先描述了云模型的基本理论及其数字特征; 然后给出了基于模态应变能的计算公式及其损伤指标, 即模态应变能耗散率指标和模态应变能等效指标, 并将两种指标作为云模型的相关参数; 最后对逆向云发生器和云模型数字特征估计值进行了分析, 并基于隶属度函数等量优化原则提出了一种应变能隶属云损伤识别方法, 并利用了 Udwadia 方法来模拟产生随机试验测量数据, 采用了多次测量产生的不确定数据进行了损伤识别研究. 数值算例结果表明, 提出的应变能隶属云方法可以较好地处理测量噪声引起的不确定问题, 其对含噪数据的识别结果明显优于单纯的模态应变能耗散率指标和模态应变能等效指标.

关键词: 损伤识别; 云模型; 隶属度; 噪声; 应变能

中图分类号: TB123

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2018)10-0153-09

近半个世纪以来, 工程结构得到了迅猛的发展, 而随着工程结构的修建与使用, 结构的损伤检测和识别逐渐成为研究的热点. 结构损伤会导致结构的局部刚度下降和模态参数发生变化, 并会引起结构的动力响应发生改变. 因此, 目前国内外学者基于结构的模态参数或者动力学响应的变化进行了大量的损伤识别研究. Koh 等^[1]利用模态相关性对悬索桥进行了损伤检测, Stubbs 和 Osegueda^[2]将结构频率用结构的刚度和质量来表示, 并利用结构损伤前后频率敏感性矩阵和刚度敏感性矩阵的广义逆构造损伤识别指标, 以此来进行损伤的定位以及定量. 刘济科等^[3]提出了一种利用残余力向量进行结构损伤识别的两步法, 通过计算结构单元的损伤定位标准值和最佳逼近向量法进行损伤的识别和定位. Seyedpoor^[4]也提出了一种两阶段的检测结构损伤的方法, 该方法利用了基于粒子群优化和模态应变能. 郭惠勇等^[5]则提出一种基于频率信息和模态应变能的输电塔损伤识别方法. 姜绍飞等^[6]将 BP 神经网络与 D-S 证据理论结合起来对结构进行损伤识别, 并验证了该方法的有效性. 王乐等^[7]提出了一种基于互相关函数幅值向量的结构损伤定位研究方法, 但其抗噪能力有待提高. 由于测量噪声等各种不确定性因素的影响, 基于确定性的损伤识别方法难于表述或处理实际结构的不确定性问题, 故本文拟采用可以处理不确定问题的云模型进行损伤识别. 云模型是李德毅院士基于概率论和模糊数学理论建立的用于处理定性概念和定量概念的转换模型^[8-10], 它可以处理不确定问题, 构成定量概念与定性概念之间的映射, 实现不确定性的传递. 近年来云模型被广泛地应用在智能控制、数据挖掘以及图像处理等领域^[11-12], 但在土木工程损伤领域应用较少, 具有广泛的研究价值. 故本文提出了一种云模型隶属度和应变能相结合的方法, 以解决损伤识别结果的不确定问题.

① 收稿日期: 2018-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578094, 51468058).

作者简介: 郭惠勇(1971-), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事结构损伤识别、工程结构优化的研究.

1 云模型和云发生器

云模型是一个处理事物的不确定度,对定性概念和定量数值进行不确定转化的模型,它能够同时反映事物的两种不确定性,即模糊性和随机性,也能够反映模糊性和随机性之间的相互关联,建立定性和定量之间的映射.云模型定义描述如下:假定 U 是一个用精确数值表示的定量论域, C 为论域上的定性概念,对于论域中任一元素 x ,且 x 为定性概念 C 的一次随机实现,就有 x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$. 对于每一个这样的 x ,称为一个云滴,表示为 $\text{drop}(x, \mu(x))$, x 在论域 U 上的分布就称为云^[9]. 在云模型中,使用期望 Ex ,熵 En ,以及超熵 He 3 个数字特征来描述信息的不确定性.期望描述的就是云重心所在的位置,熵反映了云滴的离散程度,超熵是对熵不确定性的度量,这一数字特征体现了在定量论域 U 上对该定性概念 C 有贡献的所有点的不确定性的聚集程度,反映了确定度随机性的大小.云的 3 个数字特征如图 1 所示.

2 模态应变能损伤指标

2.1 模态应变能

模态应变能可以较好地反映结构的损伤信息,其对损伤的敏感性要好于单纯的模态振型方法.结构的第 j 个单元和第 i 阶模态在损伤前后的模态应变能如下:

$$\begin{aligned} M_{\text{MSE } ij}^u &= \frac{1}{2} \Phi_i^T K_j \Phi_i \\ M_{\text{MSE } ij}^d &= \frac{1}{2} \Phi_i^{dT} K_j \Phi_i^d \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $M_{\text{MSE } ij}^u$ 和 $M_{\text{MSE } ij}^d$ 分别是未损伤和损伤后的模态应变能; Φ_i 和 Φ_i^d 是未损伤和损伤后的第 i 阶振型; K_j 是 j 个单元的刚度矩阵.当选取 m 阶振型时,第 j 个单元的模态应变能如下:

$$\begin{aligned} M_{\text{MSE } j}^u &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \Phi_i^T K_j \Phi_i \\ M_{\text{MSE } j}^d &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \Phi_i^{dT} K_j \Phi_i^d \end{aligned} \quad (2)$$

利用损伤前后的模态应变能可以求解相应的损伤位置等识别指标.

2.2 模态应变能耗散率指标

结构的损伤也可以看作是能量耗散的过程,刘晖等^[13]利用模态应变能耗散率和变化率相等的原理推导出一种损伤指标,即应变能耗散率指标 (Modal strain energy dissipation ratio index, MSE DRI),用 $M_{\text{MSE DRI}}$ 表示,该指标具有一定的损伤定位能力.第 j 个单元的模态应变能耗散率指标表达如下^[13]

$$M_{\text{MSE DRI } j} = \frac{|M_{\text{MSE } j}^d - M_{\text{MSE } j}^u|}{|M_{\text{MSE } j}^d - M_{\text{MSE } j}^u| + M_{\text{MSE } j}^u} \quad (3)$$

2.3 模态应变能等效指标

郭惠勇等^[14]则借鉴了应变能耗散率指标,推导出应变能等效方程,并利用结构损伤对模态应变能变化趋势的影响,从等效方程中提取了一种模态应变能等效指标 (Modal strain energy equivalence index, MSE EI),用 $M_{\text{MSE EI}}$ 表示,具体如下:

$$M_{\text{MSE EI } j} = \frac{M_{\text{MSE } j}^d - \sqrt{M_{\text{MSE } j}^u \times M_{\text{MSE } j}^d}}{M_{\text{MSE } j}^d} \quad (4)$$

通过大量的算例分析,发现应变能耗散率指标的值往往高于真实的损伤值,而应变能等效指标的识别结果

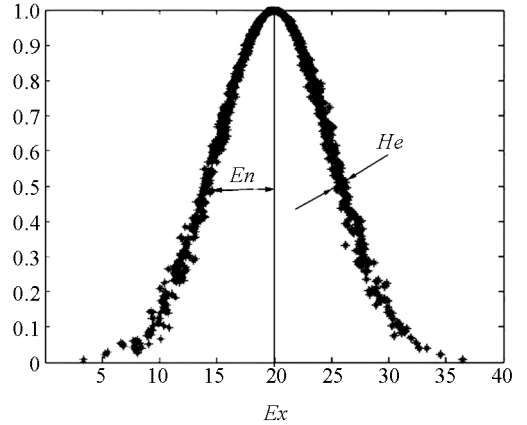


图 1 云的数字特征

虽相对较好, 但是其值往往低于真实值, 故两者指标具有联合应用的潜力. 另外, 单纯的两种应变能指标都无法处理不确定损伤问题, 故本研究将两种指标和云模型理论相结合, 以进行不确定损伤识别研究.

3 基于应变能隶属云的损伤识别

3.1 云发生器

在损伤识别的实际应用中, 由于频率和振型等测量数据不可避免地会受到测量噪声的干扰, 从而使相应的识别结果产生较大的误差, 并难于判断识别结果的可靠性. 因此, 单纯的应变能损伤指标方法难于应用于噪声等引起的损伤识别不确定问题, 故本研究将利用云模型方法来处理噪声等引起的不确定问题, 并将应变能作为损伤识别的相关动力参数. 云发生器是云的生成算法, 可对随机采样数据进行处理.

云发生器可分为正向云发生器和逆向云发生器, 由定性概念向定量数值进行转化的发生器称为正向云发生器, 反之, 称为逆向云发生器. 正向云发生器是通过输入云模型的 3 个数字特征值, 在发生器内生成满足条件的云滴, 云滴数量达到一定程度时构成云; 逆向云发生器是通过输入一定数量的云滴, 来得到云的 3 个数字特征值. 从正向云发生器和逆向云发生器的概念中可以知道它们互为逆过程.

正向云发生器的具体算法为:

- 根据云的 3 个数字特征 (Ex, En, He) 生成以 Ex 为期望, En 为标准差的正态随机数 x_r ;
- 生成以 En 为期望值、 He 为标准差的正态随机数 En' ;
- 计算 $\mu_r = \exp[-(x_r - Ex)^2 / (2En'^2)]$, x_r, μ_r 生成云滴;
- 重复以上步骤, 直至生成 N 个云滴为止.

逆向云发生器则可以利用采样的样本云滴估计相应的数字特征. 由统计理论, 可根据采样数据 x_r 计算样本统计值:

样本均值

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N x_r \quad (5)$$

一阶样本绝对中心矩

$$D = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N |x_r - \bar{X}| \quad (6)$$

样本方差

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{r=1}^N (x_r - \bar{X})^2 \quad (7)$$

则由云模型理论可得出以下期望、熵和超熵的估计值:

$$\hat{Ex} = \bar{X} \quad (8)$$

$$\hat{En} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N |x_r - \hat{Ex}| \quad (9)$$

$$\hat{He} = \sqrt{|S^2 - \hat{En}^2|} \quad (10)$$

基于逆向云发生器和云模型数字特性估计公式(8)–(10), 本文提出了一种可处理不确定问题的损伤识别方法, 即隶属度损伤识别法.

3.2 基于应变能隶属云的损伤识别

由于测量噪声等的干扰, 在实际工程中测量数据往往具有不确定性^[15], 在数值仿真中, 可以借助特定的方法来模拟数据的不确定性, 本文借助 Udwardia^[16]提出的方法来模拟试验测量数据, 具体如下:

$$\Phi_{ki}(\text{exp}) = \Phi_{ki}(\text{cal}) \cdot (1 + NR \cdot \xi) \quad (11)$$

式中, $\Phi_{ki}(\text{exp})$ 是第 i 阶模态第 k 位的模拟试验测量数据, $\Phi_{ki}(\text{cal})$ 是第 i 阶模态第 k 位的理论计算值, NR 是噪声水平, ξ 是标准正态分布的随机数, 每次运行将会产生不同的随机数, 从而使模拟测量数据具有不确定性.

对于不确定数据, 本文通过将两种应变能损伤指标和逆向云发生器相结合, 并借助多次测量数据和云的数字特征, 基于隶属度等量优化原则建立了损伤识别方法, 进行损伤识别和判定. 具体方法如下:

1) 进行多次测量, 获取受随机测量噪声影响的多组不确定模态数据:

2) 利用多组模态数据联合计算相应的模态应变能耗散率指标和模态应变能等效指标数据值, 由于每组模态数据可同时获取两种应变能指标值, 故数据量翻倍. 从而可以构造出包含 $2N$ 个云滴的群;

3) 计算所有云滴的数字特征估计值, 即期望、熵和超熵, 并利用下式计算所有云滴的隶属度估计值, 这样, 每个指标值及其隶属度值可组成一个云滴, 共有 $2N$ 个云滴.

$$\hat{\mu}_r = \exp[-(x_r - E\hat{x})^2 / (2E\hat{n}^2)] \quad (12)$$

4) 按照隶属度较高的原则进行选取, 选取隶属度较高的 N 个云滴作为优化后的云滴群, 并淘汰隶属度较低云滴.

5) 重新计算优化选取后的云滴群的数字特征估计值, 并利用最终期望和熵的估计值进行损伤位置的识别.

本文主要是利用应变能耗散率指标值往往高于真实的损伤值, 而应变能等效指标值往往低于真实值的特点, 利用隶属度函数将二者有机结合, 并借助云模型处理不确定问题的能力进行损伤识别, 故将其称为应变能隶属云(Strain energy membership cloud, SEMC)方法.

4 数值算例

考虑如图 2 所示的一个二维桁架结构, 该桁架结构是损伤识别常用的典型结构. 其基本参数包括: 杆件长度 $l=1\text{m}$, 弹性模量 $E=7.2 \times 10^4 \text{ MPa}$, 杆件截面面积 $A=0.001 \text{ m}^2$, 材料密度 $\rho=2800 \text{ kg/m}^3$. 该二维桁架结构的有限元模型总共包含 31 个杆单元, 其中共有 14 个节点, 28 个自由度. 考虑到约束之后, 该有限元模型的实际自由度是 25. 杆件单元的损伤会引起其刚度的降低, 故将杆件损伤度考虑为其刚度的降低程度. 这里主要考虑两种多损伤工况, 第一种工况, 单元 11 和 24 发生损伤, 刚度分别降低 25% 和 20%; 第二种工况, 单元 2、8、21 发生损伤, 刚度分别降低 30%, 20% 和 30%.

由于实际应用中测量噪声是不可避免的, 故测试的模态数据必须考虑随机测量噪声等引起的干扰. 在数值仿真时, 人工噪声应添加到模态数据中, 这里采用 Udawadia^[16] 提出的方法来模拟试验测量数据, 考虑了 3% 的噪声水平, 采用带噪声的模拟试验测量数据计算相应的模态应变能. 为了获取相应的云模型数字特征, 20 次随机测量试验数据被应用去识别结构的损伤, 由于加噪后结构可能会出现个别噪声敏感单元, 对噪声敏感单元采用异常值过滤方法进行消减, 消减系数为 0.5. 本文主要采用了前三阶模态进行损伤识别研究.

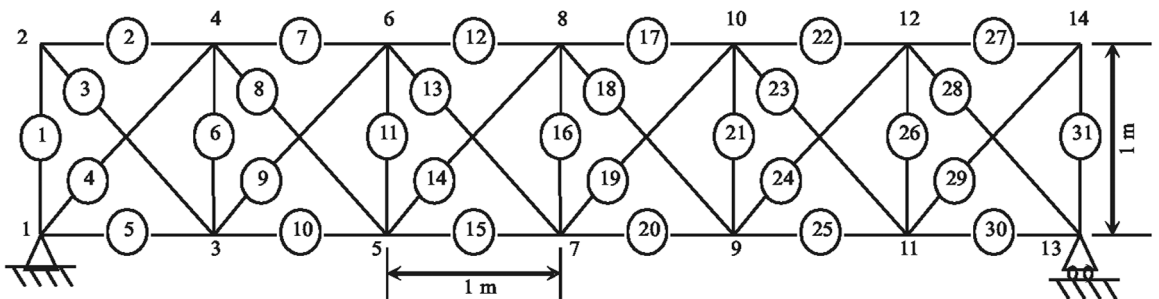


图 2 二维桁架结构

4.1 例 1

单元 11 和 24 均发生损伤, 刚度分别降低 25% 和 20%. 为了进行对比, 也分别利用随机测量数据对模态应变能耗散率指标和模态应变能等效指标进行了计算, 并结合云模型计算了相应的数字特征. 模态应变能耗散率指标 MSEDRI、模态应变能等效指标 MSEEI 和应变能隶属云方法的损伤识别结果如图 3—图 5 所示, 这些图是含有均值和误差熵的识别结果影响图, 图中的损伤系数表示损伤的程度, 如 0.2 表示 20%

损伤. 在测量误差引起的不确定因素干扰下, 从图 3 可以观察到, 一些非损伤单元的误差干扰已经超过了真实损伤单元 11 和 24 的均值, 故 MSEDRI 方法的识别效果不太好. 从图 4 也可以发现, 非损伤单元的误差干扰也已经超过了真实损伤单元 11 和 24 的均值, 故 MSEEI 方法的不确定识别效果也不好. 从图 5 可以观察到, 应变能隶属云方法的识别效果相对较好, 即使考虑测量误差的影响, 其非损伤单元的误差干扰明显低于真实损伤单元 11 和 24 的均值, 故应变能隶属云方法可以较好地识别出真实的损伤单元, 其抗噪声干扰的能力较强.

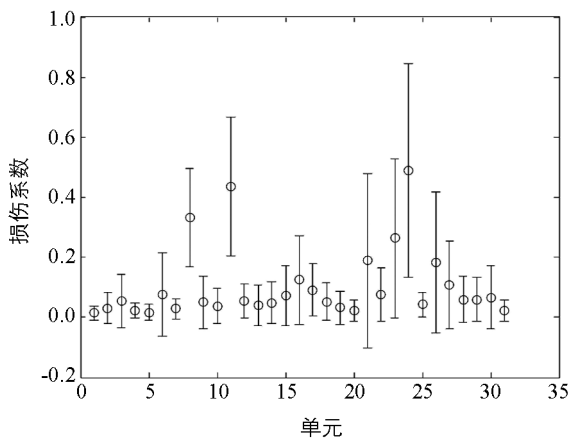


图 3 例 1 的 MSEDRI 均值和熵的损伤识别结果

损伤单元采用 3 种方法计算的隶属度如图 6—

图 8 所示. 图 6 为 MSEDRI 方法的各个云滴的隶属度云图, 从图中可以看出其云滴分布集中度较散, 总体隶属度不高. 图 7 为 MSEEI 方法的各个云滴的隶属度云图, 其云滴分布较为集中, 略优于 MSEDRI 方法, 但总体隶属度仍不高. 图 8 为应变能隶属云的隶属度云图, 其总体的隶属度值明显高于 MSEDRI 方法和 MSEEI 方法, 且集中度也较好, 说明所建议的应变能隶属云方法可以较好地处理结构受测量噪声干扰的问题.

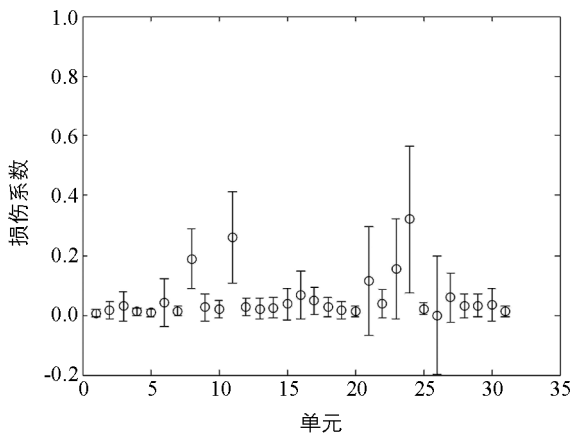


图 4 例 1 的 MSEEI 均值和熵的损伤识别结果

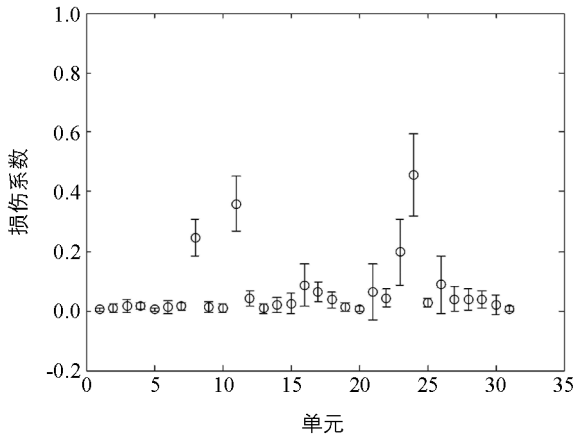
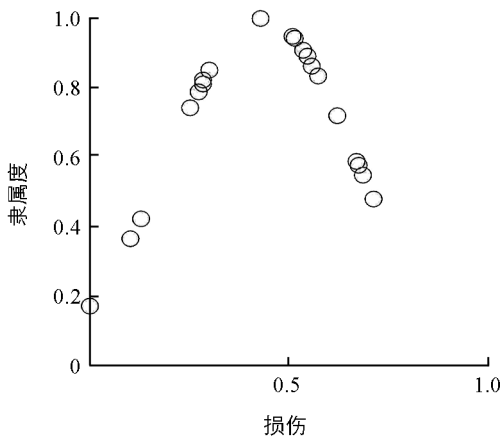
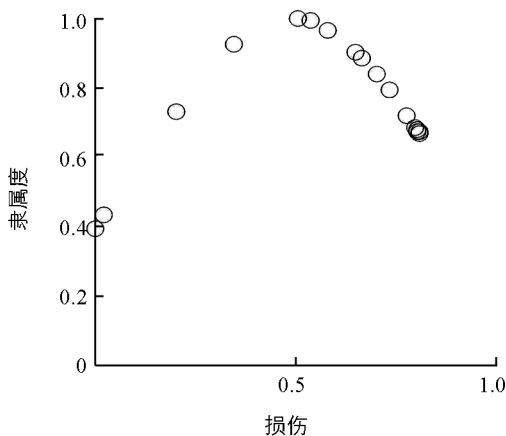


图 5 例 1 的应变能隶属云均值和熵的损伤识别结果



(a) 单元 11



(b) 单元 24

图 6 例 1 的 MSEDRI 隶属云图

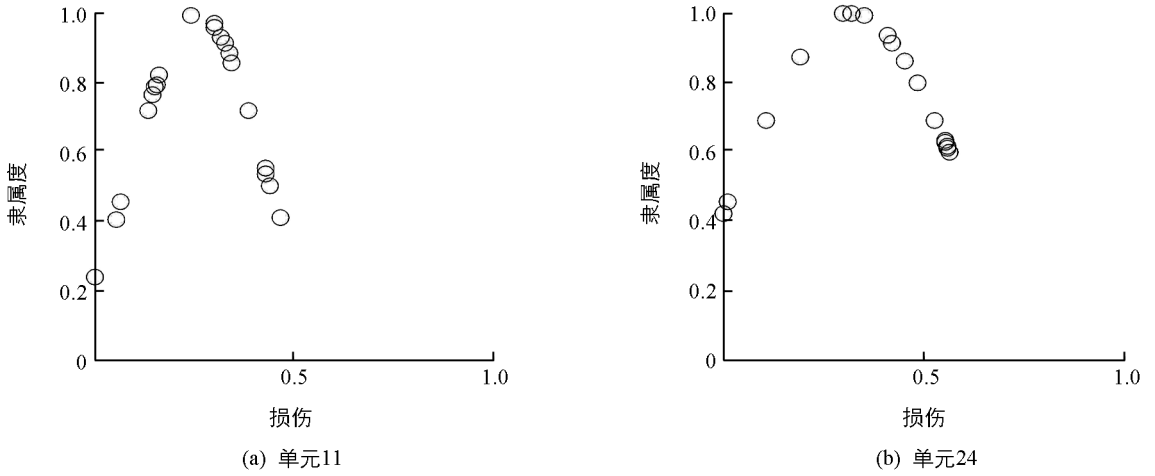


图 7 例 1 的 MSEEI 隶属云图

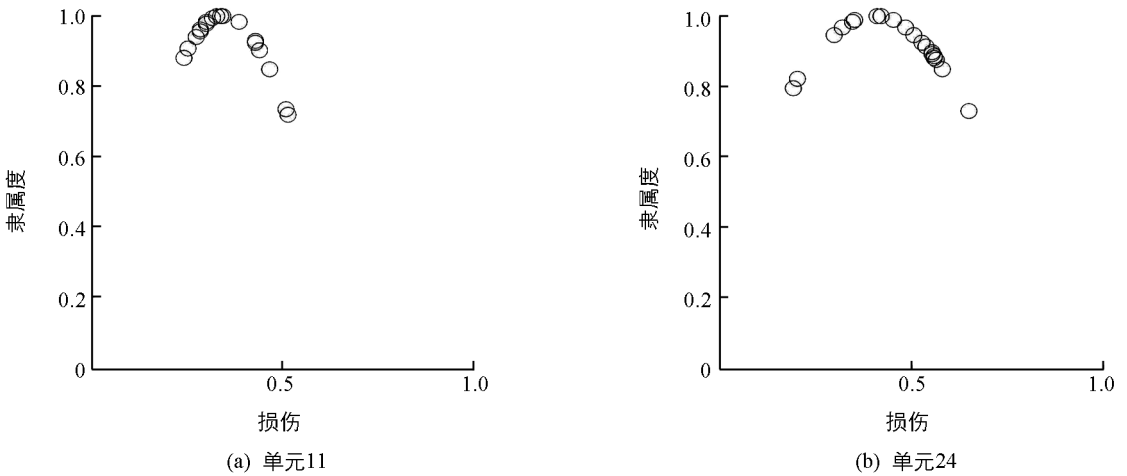


图 8 例 1 的应变能隶属云的云图

4.2 例 2

单元 2、8、21 发生损伤，刚度分别降低 30%，20%和 30%。采用随机测量数据，分别对模态应变能耗散率指标、模态应变能等效指标和应变能隶属云方法进行了计算。MSEDRI、MSEEI 和应变能隶属云方法的损伤识别结果如图 9—图 11 所示，在测量误差引起的不确定因素干扰下，从图 9 可以观察到，一些非损伤单元的误差干扰已经超过了真实损伤单元 2、8、21 的均值，故 MSEDRI 方法的识别效果仍不太好。从图 10 可以发现，个别非损伤单元的误差干扰也已经超过了真实损伤单元的均值，故 MSEEI 方法对不确定问题的识别效果也不太好。从图 11 可以观察到，应变能隶属云方法的识别效果相对较好，即使考虑测量误差的影响，其非损伤单元的误差干扰明显低于真实损伤单元 2、8、21 的均值，故应变能隶属云方法可以较好地识别出真实的损伤单元，其抗噪声干扰的能力较强。

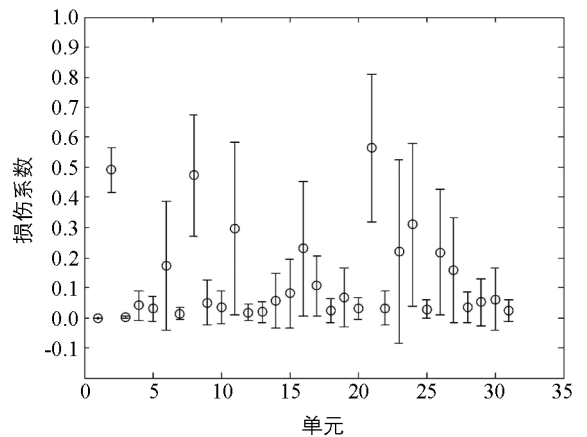


图 9 例 2 的 MSEDRI 均值和熵的损伤识别结果

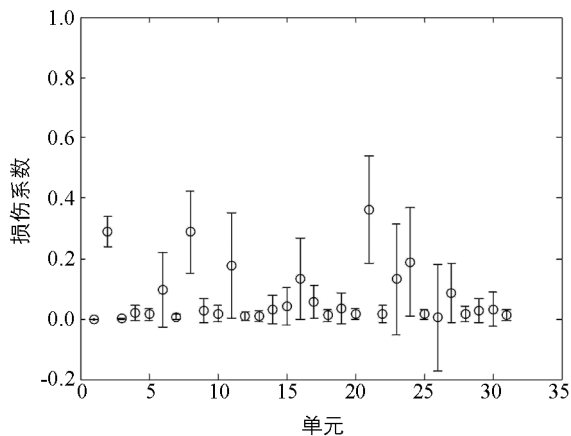


图 10 例 2 的 MSEEI 均值和熵的损伤识别结果

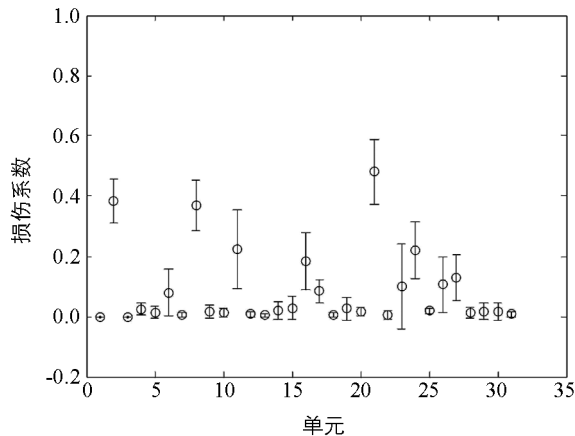


图 11 例 2 的应变能隶属云均值和熵的损伤识别结果

损伤单元采用 3 种方法计算时的隶属度如图 12—图 14 所示. 图 12 为 MSEDRI 方法的各个云滴的隶属度云图, 从图中可以看出其云滴分布集中度相对较低, 总体隶属度不高. 图 13 为 MSEEI 方法各个云滴的隶属度云图, 其云滴分布较为集中, 略优于 MSEDRI 方法, 但总体隶属度仍不高. 图 14 为应变能隶属云的隶属度云图, 其总体的隶属度值明显高于 MSEDRI 方法和 MSEEI 方法, 且集中度也较好. 说明所建议的应变能隶属云方法可以较好地处理结构受测量噪声干扰引起的不确定问题.

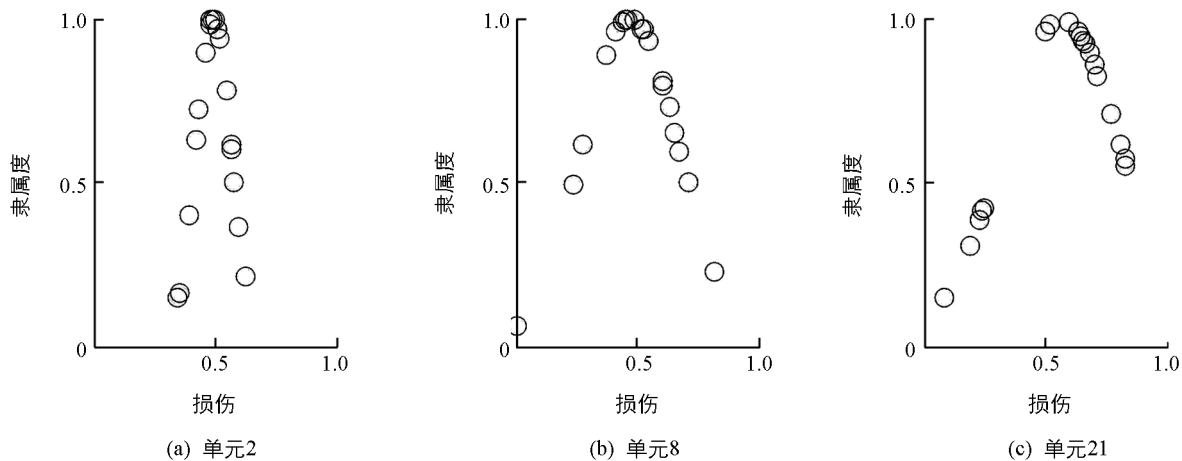


图 12 例 2 的 MSEDRI 隶属云图

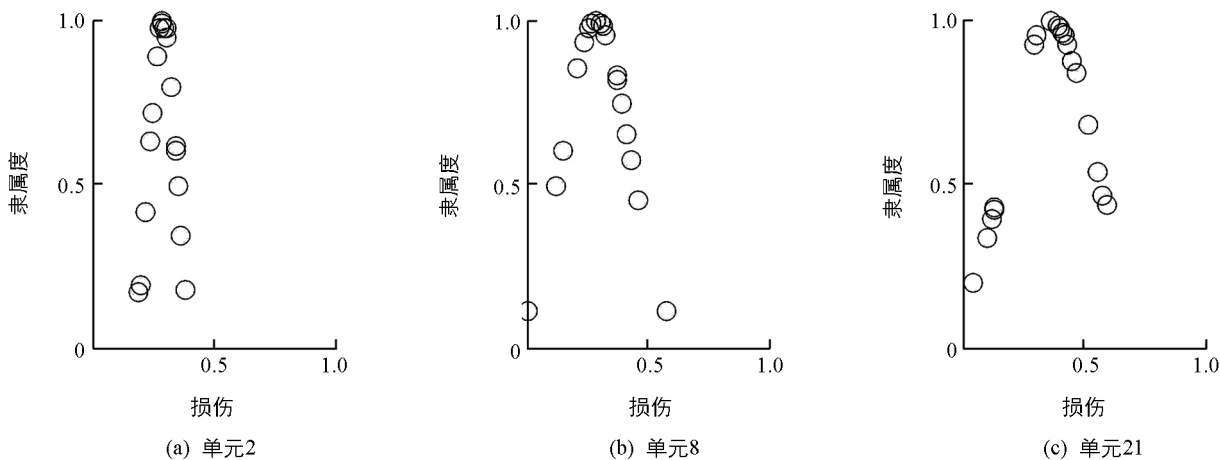


图 13 例 2 的 MSEEI 隶属云图

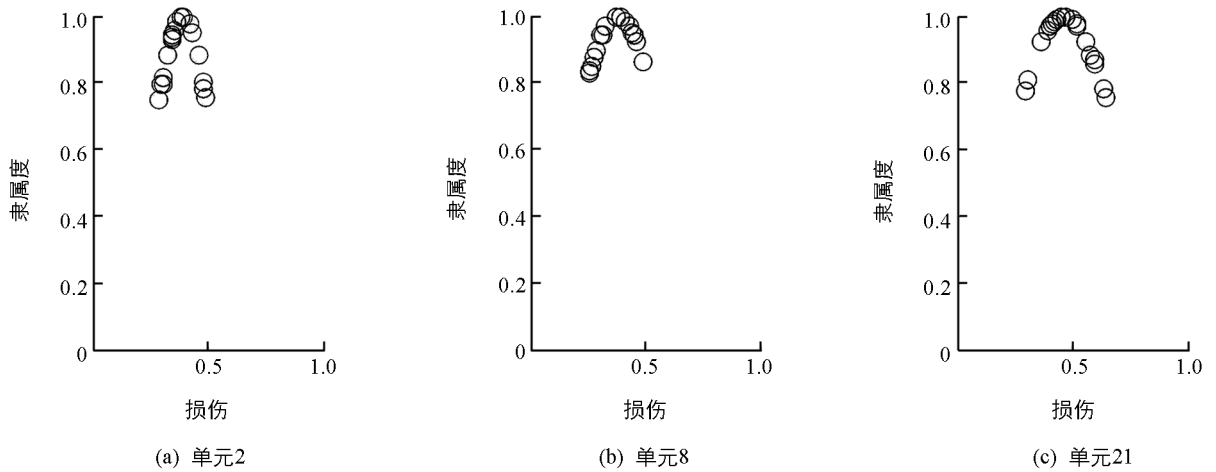


图 14 例 2 的应变能隶属云的云图

从以上两个例子可以观察到,当考虑测量噪声对模态数据产生的不确定影响时,MSEDRI方法和MSEEI方法受测量误差的干扰较大,难于准确识别损伤的位置,而且云滴分布集中度相对较散,总体隶属度不高.而应变能隶属云方法可以较好地处理测量噪声引起的不确定性问题,损伤定位的识别结果更好,而且云滴分布较为集中,总体隶属度相对较高.

5 结 论

本文采用了云模型和模态应变能来处理不确定损伤识别问题,并借鉴逆向云发生器提出了应变能隶属云损伤识别方法.该方法首先基于多次测量数据获取了损伤信息的云滴数据,然后对云滴数据的数字特征进行了提取,并利用相应的期望和熵计算出各个云滴的隶属度,最后采用应变能方法和隶属度优化筛选出优化的云滴,并利用优化数据进行了损伤的定位识别.数值分析结果表明,当考虑测量噪声引起的不确定问题时,MSEDRI方法和MSEEI方法的识别结果不稳定,受噪声干扰较大,而应变能隶属云方法的识别效果相对较好,受噪声干扰较小,其识别效果明显优于MSEDRI方法和MSEEI方法.

参考文献:

- [1] KOH B H, DYKE S J. Structural Health Monitoring for Flexible Bridge Structures Using Correlation and Sensitivity of Modal Data [J]. Computers & Structures, 2007, 85(3-4): 117-130.
- [2] STUBBS N S, OSEGUEDA R A. Global Damage Detection in Solids-Experimental Verification [J]. Modal Analysis, 1990, 5(2): 81-97.
- [3] 刘济科, 杨秋伟. 基于残余力向量的结构损伤识别两步法 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(4): 1-4.
- [4] 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.
- [5] GUO H Y, LI Z L. Two-Stage Multi-Damage Detection Method Based on Energy Balance Equation [J]. Journal of Non-destructive Evaluation, 2011, 30(3): 186-200.
- [6] JIANG S F, ZHANG C M, ZHANG S. Two-Stage Structural Damage Detection Using Fuzzy Neural Networks and Data Fusion Techniques [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(1): 511-519.
- [7] 王 乐, 杨智春, 王 慧, 等. 白噪声激励下的复合材料层合结构损伤检测的内积向量法 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(4): 127-131.
- [8] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器 [J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.
- [9] LI D Y. Uncertainty in Knowledge Representation [J]. Engineering, 2000, 2(10): 73-79.
- [10] LI D Y, LIU C, GAN W. A New Cognitive Model: Cloud Model [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2009, 24(3): 357-375.
- [11] WANG D, ZENG D B, SINHG V P, et al. A Multidimension Cloud Model-Based Approach for Water Quality Assess-

ment [J]. *Environmental Research*, 2016, 149(8): 113–121.

- [12] 宋远骏, 李德毅, 杨孝宗, 等. 电子产品可靠性的云模型评价方法 [J]. *电子学报*, 2000, 28(12): 74–76.
- [13] 刘 晖, 瞿伟廉, 袁润章. 基于模态应变能耗散率理论的结构损伤识别方法 [J]. *振动与冲击*, 2004, 23(2): 118–121.
- [14] 郭惠勇, 盛 懋. 基于模态应变能的不同损伤指标对比 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(5): 444–450.
- [15] 谢显中, 刘源源, 雷维嘉. 高动态环境下基于数据辅助的稳健信噪比估计 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(8): 174–181.
- [16] UDWADIA F E. Structural Identification and Damage Detection from Noisy Modal Data [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2005, 18(3): 179–187.

Structural Damage Identification Based on Modal Strain Energy and Membership Function

GUO Hui-yong^{1,2}, WANG Zhi-hua^{1,2}

1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education Chongqing University, Chongqing 400045, China

Abstract: The results of damage detection are often uncertain due to measurement noise. In order to solve this problem, a damage detection method based on modal strain energy and membership function is presented in this paper. First, the basic theory and numerical characteristics of cloud model are described. Then, the modal strain energy dissipation ratio index (MSEDRI) and the modal strain energy equivalence index (MSEEI) are analyzed, and the two indexes are considered as identification dynamic parameters. Finally, a backward cloud generator and the numerical characteristic estimation of the cloud model are analyzed, and a strain energy membership cloud (SEMC) method based on modal strain energy and membership function is proposed. Random test data are generated using the Udwadia method, and multiple measurement uncertain data are used to identify structural damage. The simulation results indicate that the proposed SEMC method can solve the uncertain damage problem, and the identification results of the SEMC method are obviously better than those of both modal strain energy dissipation ratio index and modal strain energy equivalence index.

Key words: damage detection; cloud model; degree of membership function; noise; strain energy

责任编辑 汤振金