

D-S 证据理论的改进算法及其在导墙结构 损伤定位中的应用验证

李德春¹, 练继建¹, 苏芳², 李成业³

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;
2. 天津市水务局农田水利处, 天津 300074; 3. 水利部建设管理与质量安全中心, 北京 100038)

摘要:针对 D-S 证据理论组合规则存在的不足, 根据导墙结构在水流荷载作用下的振动特性建立多种损伤定位指标, 应用损伤前、后的实测响应分别计算各指标的识别结果, 对结构的损伤位置进行初步判断, 利用 D-S 证据理论的改进算法对各指标的识别结果进行融合计算, 得出结构的损伤位置。模型试验结果表明: D-S 证据理论的改进算法能够利用较少的证据获得正确的辨识结果, 避免了单一指标由于传感器自身条件、噪声等因素所引起的错误判断, 有效地降低了错误证据对最终融合结果的影响, 适用于导墙结构的损伤定位研究。

关键词:导墙; D-S 证据理论; 损伤定位指标; 融合计算; 信任函数

中图分类号:TV65 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)01-0078-07

An improved method based on D-S evidence theory and its verification in damage location for guide wall structure//LI Dechun¹, LIAN Jijian¹, SU Fang², LI Chengye³ (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Agricultural Water Conservancy Department of Tianjin Water Authority, Tianjin 300074, China; 3. The Construction Management and Quality Safety Center of Ministry of Water Resource, Beijing 100038, China)

Abstract: Due to some deficiencies in the combination rule of D-S evidence theory, some dynamic signatures for damage location are determined according to the vibration characteristics of guide wall structure induced by flood discharge. The responses measured from health state and damage state are utilized to respectively calculate these dynamic signatures, which are applied to preliminary judgment of damage location. And the identification results are regarded as evidences for fusion decision to decide the damage location by using the improved D-S evidence theory. The results demonstrate that the accurate decision can be obtained based on few evidences by utilizing the method proposed, the errors originated from sensor and noise are avoided, and the influence on final fusion decision of the wrong evidence is effectively reduced. The method based on dynamic signatures and improved D-S evidence theory is applicable to damage localization.

Key words: guide wall; D-S evidence theory; signatures for damage location; fusion decision; belief function

在长期泄水过程中, 导墙结构常常受水流脉动压力的作用而出现疲劳破坏。国内外已有多起导墙振动和破坏的工程实例, 如美国德克萨斯卡那坝隔水墙由于剧烈的侧向振动, 使得隔水墙和底板的连接处发生断裂^[1]; 美国纳佛角坝导墙由于振动发生疲劳破坏, 沿导墙根部出现疲劳裂缝, 导墙内的钢筋出现了折断或弯曲^[2]; 我国也有万安水电站导墙倒塌的实例。为了保证水电站的安全运营, 需对导墙结构进行定期的损伤检测, 及早发现损伤并采取相

应的措施。对于泄流激励下的导墙结构, 损伤是否发生往往很容易做出判断^[3], 最困难也是最核心的是损伤定位和损伤程度识别, 而损伤定位又是损伤程度识别的基础。常用的基于振动的损伤定位指标包括模态置信度、曲率模态、柔度曲率等, 以及由这些指标衍生出其他一系列损伤定位指标, 这些指标都能够一定条件下判断出结构的损伤位置^[4-10]。受传感器的自身原因、工作条件、背景噪声以及分析方法的精度等影响, 仅应用单一的损伤定位指标容

基金项目: 国家自然科学基金(51209158); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB035905-1); 天津市应用基础及前沿技术研究计划(12JCQNJC04600)

作者简介: 李德春(1984—), 男, 河南开封人, 博士研究生, 主要从事水工结构损伤识别与评估技术研究。E-mail: lidc@mot.gov.cn

易产生错误的定位结果,因此亟需提出一种基于多损伤定位指标与融合决策相结合的方法进行泄流结构的损伤定位研究。本文在分析总结各种损伤定位指标的基础上,结合改进的 D-S 证据理论对各指标的计算结果进行融合计算,最后精确地给出导墙结构的损伤位置,并将该方法应用到一个泄流激励下导墙结构的损伤模型试验中。

1 结构损伤定位指标

1.1 基于时间序列的损伤定位指标

取结构无损状态下相同长度的两段振动数据,以其中一段作为基准数据,另一段作为检验数据,分别建立 ARMA 模型,对应的参考模式向量分别为 Φ_B 和 Φ_T ;取未知状态下相同时段内结构振动响应,求出对应的参考模式向量记为 Φ_D 。结构不同状态之间的差别可以用参考模式向量之间的距离来反映,而向量之间的距离可以用欧氏距离来表示,即 $L(\Phi_T, \Phi_B)$ 表示 Φ_T 和 Φ_B 之间的欧氏距离, $L(\Phi_D, \Phi_B)$ 表示 Φ_D 和 Φ_B 之间的欧氏距离,则损伤定位指标 $F^{[11]}$ 可以表示为

$$F = \frac{L(\Phi_D, \Phi_B)}{L(\Phi_T, \Phi_B)} \quad (1)$$

如果结构没有发生损伤,各个位置的 F 值等于 1;当某部位发生损伤时,其对应的 F 值将大于 1。

1.2 实测响应标准差的变化率

周先雁等^[12]定义结构实测响应标准差的变化率 R_r 为

$$R_r = \frac{\sigma_{D,r} - \sigma_{U,r}}{\sigma_{U,r}} \quad (r = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: r 为测点; $\sigma_{U,r}$ 为无损状态下结构振动响应的标准差; $\sigma_{D,r}$ 为未知状态下结构振动响应的标准差。

1.3 坐标模态确认准则

基于相关性原理,坐标模态确认准则 L_r 为

$$L_r = \frac{(\sum_{j=1}^m |\Psi_{U,r,j} \Psi_{D,r,j}|)^2}{\sum_{j=1}^m (\Psi_{U,r,j})^2 \sum_{j=1}^m (\Psi_{D,r,j})^2} \quad (3)$$

式中: j 为实测模态的阶数; $\Psi_{U,r,j}$ 和 $\Psi_{D,r,j}$ 分别为结构上 r 测点在无损和未知状态下第 j 阶应变模态振型。

1.4 基于模态振型与固有频率的损伤组合指标

1.4.1 模态振型与固有频率平方比的变化量

归一化的模态振型与固有频率平方比的变化量 $M_{r,j}^{[13-14]}$ 为

$$M_{r,j} = \frac{D_{r,j}}{\sum_{r=1}^n D_{r,j}} \quad (4)$$

其中 $D_{r,j} = \frac{|\Psi_{U,r,j}|}{f_{U,j}^2} - \frac{|\Psi_{D,r,j}|}{f_{D,j}^2}$ 式中 $f_{U,j}$ 和 $f_{D,j}$ 分别为结构在无损和未知状态下的固有频率。

1.4.2 模态变化与固有频率平方变化比

归一化的模态变化与固有频率平方变化比 $N_{r,j}$ 为

$$N_{r,j} = \frac{S_{r,j}}{\sum_{j=1}^m |S_{r,j}|} \quad (5)$$

其中

$$S_{r,j} = \frac{\Psi_{U,r,j} - \Psi_{D,r,j}}{f_{U,j}^2 - f_{D,j}^2}$$

1.5 基于模态曲率的损伤识别指标

1.5.1 位移曲率模态振型

根据损伤前后位移曲率模态振型的突变可以识别结构的局部损伤,利用中心差分公式计算的位移曲率模态振型 $\varphi''_{r,j}^{[15]}$ 为

$$\varphi''_{r,j} = \frac{\varphi_{r+1,j} - 2\varphi_{r,j} + \varphi_{r-1,j}}{h^2} \quad (6)$$

式中: $\varphi_{r,j}$ 为 r 测点的第 j 阶位移模态振型; $\varphi_{r-1,j}$ 和 $\varphi_{r+1,j}$ 分别为相邻测点的第 j 阶位移模态振型; h 为相邻两测点间的距离。

1.5.2 位移振型差值曲率

结构的位移振型差值曲率在损伤位置处存在较大值。令结构损伤前后位移振型系数分别为 $\varphi_{U,r,j}$ 和 $\varphi_{D,r,j}$,则 r 测点的位移振型差值为

$$\delta\varphi_{r,j} = \varphi_{U,r,j} - \varphi_{D,r,j}$$

位移振型差值曲率为

$$\delta\varphi''_{r,j} = \frac{\delta\varphi_{r+1,j} - 2\delta\varphi_{r,j} + \delta\varphi_{r-1,j}}{h^2} \quad (7)$$

式中 $\delta\varphi_{r-1,j}$ 、 $\delta\varphi_{r+1,j}$ 分别为 $r-1$ 、 $r+1$ 测点的位移振型差值。

1.5.3 应变曲率模态振型变化量

李德葆等^[15]提出的应变曲率模态振型表达式为

$$\varphi_{r,j} = \frac{\Psi_{r+1,j} - 2\Psi_{r,j} + \Psi_{r-1,j}}{h^2} \quad (8)$$

式中 $\varphi_{r,j}$ 为 r 测点第 j 阶应变曲率模态振型; $\Psi_{r-1,j}$ 、 $\Psi_{r,j}$ 、 $\Psi_{r+1,j}$ 分别为 $r-1$ 、 r 、 $r+1$ 测点第 j 阶应变模态振型。则 r 测点第 j 阶应变曲率模态振型的变化量 $\delta_{r,j}$ 为

$$\delta_{r,j} = \varphi_{D,r,j} - \varphi_{U,r,j} \quad (9)$$

式中: $\varphi_{D,r,j}$ 和 $\varphi_{U,r,j}$ 分别为未知和无损状态下 r 测点第 j 阶应变曲率模态振型。 $\delta_{r,j}$ 值最大的测点即为最可能发生损伤的位置。

1.5.4 应变振型差值曲率

结构无损和未知状态下 r 测点第 j 阶应变模态

振型为 $\Psi_{U, r, j}$ 和 $\Psi_{D, r, j}$, 则应变振型差值曲率 $\Delta\Phi_{r, j}$ 为

$$\Delta\Phi_{r, j} = \frac{\Delta\Psi_{r, j+1} - 2\Delta\Psi_{r, j} + \Delta\Psi_{r, j-1}}{h^2} \quad (10)$$

其中 $\Delta\Psi_{r, j} = |\Psi_{D, r, j} - \Psi_{U, r, j}|$
 $\Delta\Phi_{r, j}$ 值最大的测点即为最可能发生损伤的位置。

1.6 基于应变模态差的损伤定位指标

归一化的应变模态差 $\Delta\Psi_{r, j}^*$ 为

$$\Delta\Psi_{r, j}^* = \frac{\Delta\Psi_{r, j}}{\sqrt{\sum_{r=1}^n (\Delta\Psi_{r, j})^2}} \quad (11)$$

2 改进的 D-S 证据理论

2.1 基本概念

D-S 证据理论是融合决策级数据的常用方法^[16-17]。设 Ω 是辨识框架, 领域内所有命题都可以用 Ω 的子集来表示, 幂集 2^Ω 包含 Ω 的所有子集和空集 $\emptyset$ 。若 A 为 Ω 中的一个元素, 基本概率分配函数 m 是定义在 2^Ω 到 $[0, 1]$ 的一个映射, 且满足

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ 0 \leq m(A) \leq 1 \quad \forall A \subseteq \Omega \\ \sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中 $m(A)$ 为基本概率数, 表示对 A 的精确信任。

信任函数 Bel 的定义如下: $2^\Omega \rightarrow [0, 1]$, 且有

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad \forall A \subseteq \Omega \quad (13)$$

式中 $\text{Bel}(A)$ 为事件 A 的信任值, 表示证据对 A 为真的信任程度。

设 Bel_1 和 Bel_2 是 Ω 上的两个信任函数, m_1 和 m_2 分别是其对应的基本概率分配函数, 元素分别为 $A_i (i=1, 2, \dots, k)$ 和 $B_j (j=1, 2, \dots, l)$, 冲突因子 k 为

$$k = \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j) \quad (14)$$

定义函数 $M: 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$ 是 m_1 和 m_2 合成后的可信度:

$$M(A) = \begin{cases} 0 & A = \emptyset \\ (1-k)^{-1} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j) & A \neq \emptyset \end{cases} \quad (15)$$

对于 n 个概率分配函数的融合可以通过两两融合进行, 最终的融合结果与融合的顺序无关。

2.2 改进方法

在 D-S 证据理论组合规则中, k 是一个用于衡量融合的各个证据之间冲突程度的系数, k 越大则冲突程度越高。当 $k=1$ 时证据无法合成, 当 $k \rightarrow 1$ 时, 对高冲突证据合成会得到有悖常理的结果。在实际损伤定位研究中, 由于指标本身的特性或者由

于测量噪声的影响, 使得各指标之间计算结果存在较大的偏差。因此, 欲将 D-S 证据理论应用到损伤定位过程中, 需要对其组合规则进行一定的改进^[18]。假设 Ω 为一包含 N 个两两不同的命题的完备的辨识框架, Bel_i 是一个信任函数, m_i 是其对应的基本概率分配函数, 且满足

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{2^N} m_i(A_j) = 1 \\ m_i(A_j) \geq 0 \end{cases} \quad A_j \subseteq \Omega \quad (16)$$

式中: $m_i (i=1, 2, \dots, U)$ 为用于损伤定位的指标识别结果, U 为指标数; A_j 为所有可能出现损伤的位置。

若 m_1 和 m_2 是 Ω 上的两个基本概率分配函数, 则 m_1 和 m_2 的 Jousselme 距离 $d(m_1, m_2)$ ^[19] 可以表示为

$$d(m_1, m_2) = \sqrt{\frac{1}{2}(\langle m_1, m_1 \rangle + \langle m_2, m_2 \rangle - 2\langle m_1, m_2 \rangle)} \quad (17)$$

其中 $\langle m_1, m_1 \rangle = \sum_{i=1}^{2^N} \sum_{j=1}^{2^N} m_1(A_i) m_2(A_j) \frac{|A_i \cap A_j|}{|A_i \cup A_j|}$

式中 $\langle m_1, m_2 \rangle$ 为 m_1 和 m_2 之间的内积。

实际上, 由于受传感器的自身条件、噪声以及指标识别精度的影响, 每个指标的识别结果在最终决策中所起的作用不同, 即在决策中应被赋予不同的权重系数。将每个指标的识别结果看成是一条证据, 计算各个证据的平均值并定义为平均证据。如果一个证据与平均证据之间的 Jousselme 距离较小, 则认为该证据被其他大多数证据所支持, 即该证据比较可信, 其权重也较大, 它对最终融合结论的影响也较大; 反之, 如果一个证据与平均证据的 Jousselme 距离较大, 则该证据的可信度较低, 应赋予相对较小的权重系数, 以减弱其对决策结果可能带来的负面影响。因此, 本文改进 D-S 证据理论组合规则的基本思路是: 通过每个证据与平均证据的 Jousselme 距离来判断证据的可信度, 引入权重系数, 对各证据进行加权平均, 再利用 Murphy^[20] 提出的改进方法进行融合, 具体步骤为:

a. 假设有 U 组用于识别损伤位置的指标, 每个指标的识别结果为 $m_i(A_j)$, 计算各组识别结果的均值 M :

$$M = \sum_{i=1}^U m_i(A_j)$$

b. 计算各组指标的识别结果与均值的 Jousselme 距离 D_i :

$$D_i = d(m_i, M) = \sqrt{\frac{1}{2}(\langle m_i, m_i \rangle + \langle M, M \rangle - 2\langle m_i, M \rangle)}$$

c. 若 D_i 值较大, 则认为该证据不可靠, 其信任

度也较低;相反, D_i 值越小,则该证据的信任度越高。定义信任度函数 T_i :

$$T_i = \frac{1}{D_i}$$

d. 对信任度函数 T_i 进行归一化处理,得到各指标识别结果应分配到的权值 ω_i :

$$\omega_i = \frac{T_i}{\sum_{i=1}^U T_i}$$

可以看出 $\sum_{i=1}^U \omega_i = 1$ 。

e. 对各指标的识别结果进行加权平均:

$$m^*(A_j) = \sum_{i=1}^U \omega_i m_i(A_j)$$

f. 根据 Murphy^[20] 提出的方法,融合加权平均后的证据 $m^*(A_j)$,由于系统有 U 个指标,因此加权平均证据组合 $U-1$ 次。

3 导墙结构损伤模型试验

3.1 模型试验

为了验证本文的改进算法,进行了导墙结构损伤模型试验,如图 1 所示。试验在一水槽中进行,水槽上游侧与一水箱连接,通过水泵保持水箱内的水位恒定;水槽左右两侧均布置有机玻璃导墙,分别与侧壁形成 5 cm、6 cm 的空腔,用以安装传感器、布设连接线,右导墙 0 点位置处留有安放试件的缺口;槽内靠近上游侧布置一实用堰,水槽最右端设置控制

阀门,通过它可以在水槽内形成水跃,并调控水跃发生的位置。试件材料采用加重橡胶,其尺寸为 6.2 cm×4 cm×50 cm,密度为 2 400 kg/m³,弹性模量为 125 MPa。定义原点下游顺水流方向为 x 方向,垂直水流方向为 y 方向,试件高度方向为 z 方向。试件固定在原点位置,底部与水槽底板固结。此时试件的一阶和二阶模态振型均为 y 、 z 向,固有频率分别为 5.885 Hz 和 35.893 Hz。在距底部 2.5 cm、10 cm、17.5 cm、25 cm、32.5 cm、40 cm 位置处依次布置了 $C_1 \sim C_6$ 共 6 个应变片测点,用以测量试件的应变响应时程,应变信号由 DASP 系统采集和输出。试验时,保持上游水位稳定,通过控制下游阀门,调整水槽内水跃发生的位置和形式,待每个工况的水跃稳定后,采集试件应变响应信号,采样时间 60 s,采样频率取 200 Hz。

损伤模型试验工况如表 1 所示,各工况的上、下游水位均相同,水跃发生的位置相同,因此试件所受的水流荷载具有相同的特性。表 1 中工况 1 为无损伤状态的基准工况。

表 1 损伤模型试验工况

工况	损伤位置	损伤深度/cm	跃首位置/cm	试件处水深/cm
1	无损伤	无损伤	-30	11.5
2	无损伤	无损伤	-30	11.5
3	D	1	-30	11.5
4	D	2	-30	11.5

3.2 结果分析

以工况 1 无损伤状态的实测数据为基准数据,分别计算工况 2、3、4 的实测数据与基准数据的 F 值,如图 2 所示。从图 2 可以看出,工况 2 各测点的 F 值均在 1 左右,说明工况 2 条件下结构没有出现损伤;而工况 3、工况 4 在 C_2 、 C_3 测点均出现了较大的 F 值,工况 3 的计算结果显示 C_3 测点出现损伤的可能性最大,产生了错误的判断结果。说明在损伤较小的情况下,由于噪声的影响,仅依据 F 指标可能出现误判。

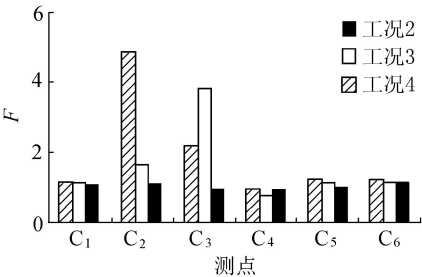


图 2 各工况的 F 值

图 3 给出了各工况的实测应变响应标准差,可以看出,应变对结构的损伤非常敏感,并且可以用应

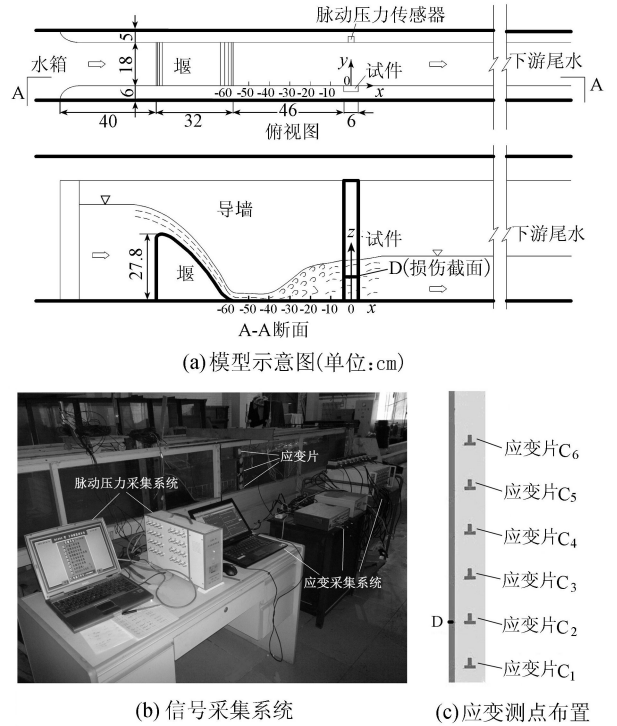


图 1 导墙结构损伤模型试验装置

变标准差相对变化量来判别结构损伤的发生以及损伤发生的部位。将各工况下实测的前两阶振型系数进行归一化处理,分别计算工况 2、3、4 与工况 1 的 L_r 值,如图 4 所示。无损伤状态下的 L_r 值基本在 1 附近,损伤发生后, L_r 值在损伤位置处有明显的降低,随着损伤程度的增加,降低越明显。

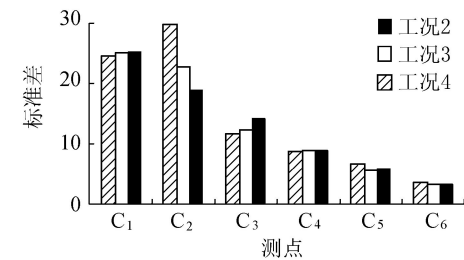


图 3 各工况的应变响应标准差

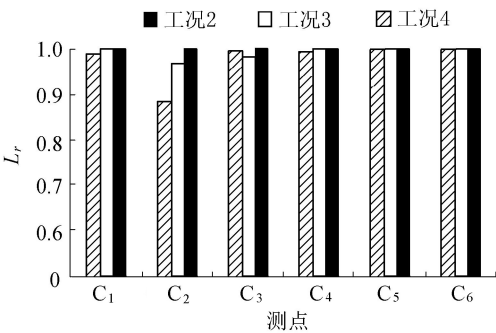


图 4 各工况下 6 个测点的 L_r 值

图 5 ~ 9 分别给出了损伤工况下的 $\Delta\Psi_{r,j}^*$ 、 $M_{r,j}$ 、 $N_{r,j}$ 、 $\delta_{r,j}$ 、 $\Delta\Phi_{r,j}$ 等指标的一阶和二阶结果,可以看出,各指标均能识别出结构的损伤位置,随着损伤程度的增加,识别结果越精确,同时高阶模态的识别精度要高于低阶模态。

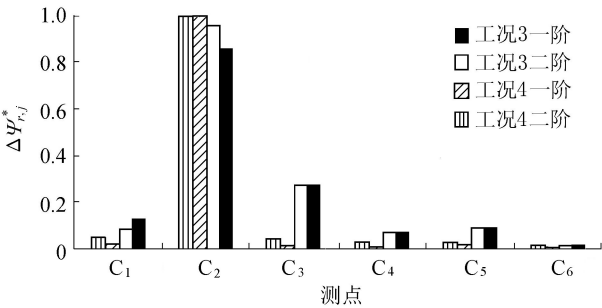


图 5 损伤工况下的 $\Delta\Psi_{r,j}^*$ 值

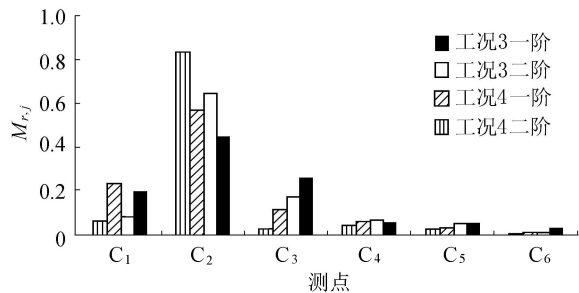


图 6 损伤工况下的 $M_{r,j}$ 值

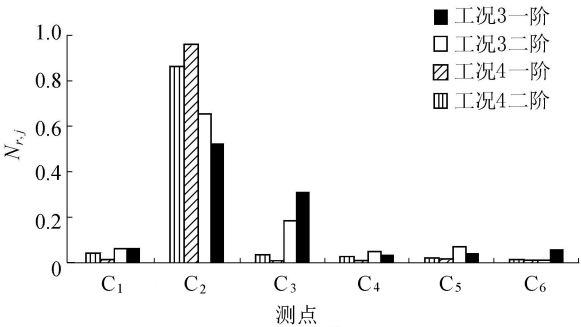


图 7 损伤工况下的 $N_{r,j}$ 值

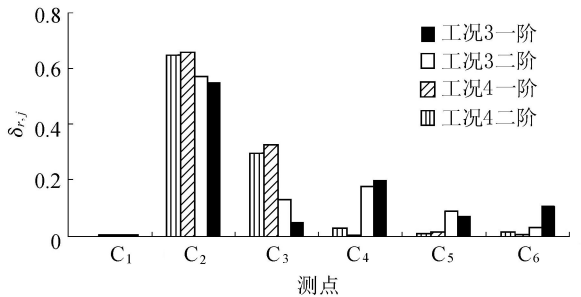


图 8 损伤工况下的 $\delta_{r,j}$ 值

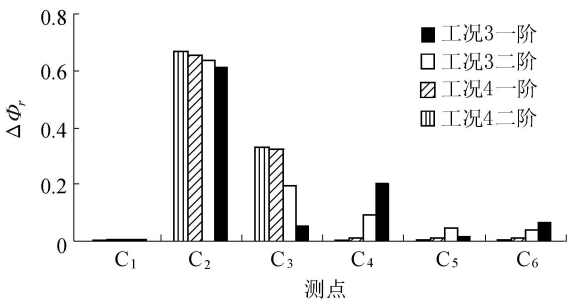


图 9 损伤工况下的 $\Delta\Phi_{r,j}$ 值

3.3 损伤定位

从前文各指标的识别结果可以看出,在损伤程度较小情况(工况 3)下,各指标的识别精度略低,同时 C_3 测点计算的指标值也较大,甚至出现误判现象。在实际工程中,由于受噪声的影响,振型的识别结果往往存在一定的误差,各指标值可能给出不同的损伤位置结果,给最后的综合评判带来一定的困难。

将工况 3 各测点不同指标的识别结果进行标准化处理,得到各测点发生损伤的概率,即将每个测点的识别结果分别除以所有 6 个测点识别结果之和,计算结果如表 2 所示。其中 $\Delta\Psi_{r,j}^*$ 、 $M_{r,j}$ 、 $\delta_{r,j}$ 、 $\Delta\Phi_{r,j}$ 等指标分别取一阶计算的结果。将 P_F 、 P_{R_r} 、 P_{L_r} 、 $P_{\Delta\Psi_{r,1}^*}$ 、 $P_{M_{r,1}}$ 、 $P_{\delta_{r,1}}$ 、 $P_{\Delta\Phi_{r,1}}$ 的计算结果定义为证据理论中的基本概率分配函数,记为 $m_1 \sim m_7$,同时计算各个证据的平均值,定义为平均证据 Q 。

应用本文改进的 D-S 证据理论分别计算不同证据间的融合结果,同时还计算了直接应用 D-S 证据理论以及 Murphy 改进方法的融合结果,如表 3 所

表 2 基于指标识别的各测点损伤概率

测点	P_F	P_{R_r}	P_{L_r}	$P_{\Delta\Psi_{r,1}^*}$	$P_{M_{r,1}}$	$P_{\delta_{r,1}}$	$P_{\Delta\phi_{r,1}}$	平均值
C ₁	0.031 7	0.007 5	0.000 0	0.072 9	0.190 3	0.000 0	0.000 0	0.043 2
C ₂	0.158 7	0.504 2	0.614 4	0.516 0	0.439 8	0.544 6	0.611 3	0.484 1
C ₃	0.689 1	0.325 1	0.324 1	0.301 5	0.254 8	0.048 5	0.054 5	0.285 4
C ₄	0.061 0	0.081 9	0.000 0	0.028 4	0.052 6	0.228 7	0.256 7	0.101 3
C ₅	0.030 6	0.057 9	0.023 0	0.031 4	0.037 1	0.069 7	0.014 2	0.037 7
C ₆	0.028 8	0.023 4	0.038 5	0.049 7	0.025 5	0.108 4	0.063 3	0.048 2

表 3 各种融合方法的计算结果

方法	测点	$m_1\oplus m_2$	$m_1\oplus m_2\oplus m_3$	$m_1\oplus m_2\oplus m_3\oplus m_4$	$m_1\oplus m_2\oplus m_3\oplus m_4\oplus m_5$	$m_1\oplus m_2\oplus m_3\oplus m_4\oplus m_5\oplus m_6$	$m_1\oplus m_2\oplus m_3\oplus m_4\oplus m_5\oplus m_6\oplus m_7$
D-S 证据理论	C ₁	0.000 8	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	C ₂	0.256 6	0.403 2	0.535 5	0.662 4	0.941 2	0.967 7
	C ₃	0.718 4	0.595 5	0.462 1	0.331 2	0.041 9	0.003 8
	C ₄	0.016 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	C ₅	0.005 7	0.000 3	2.70×10^{-5}	2.82×10^{-6}	5.13×10^{-7}	1.22×10^{-8}
	C ₆	0.002 2	0.000 2	2.72×10^{-5}	1.95×10^{-6}	5.52×10^{-7}	5.88×10^{-8}
Murphy 改进方法	C ₁	0.001 0	1.34×10^{-5}	8.97×10^{-6}	3.16×10^{-5}	1.48×10^{-6}	4.34×10^{-8}
	C ₂	0.292 8	0.464 3	0.587 4	0.693 2	0.888 2	0.964 8
	C ₃	0.685 3	0.534 1	0.410 7	0.304 7	0.104 1	0.023 8
	C ₄	0.013 6	0.000 7	4.89×10^{-5}	7.02×10^{-6}	1.66×10^{-5}	1.70×10^{-5}
	C ₅	0.005 2	0.000 3	2.37×10^{-5}	2.36×10^{-6}	4.69×10^{-7}	1.67×10^{-8}
	C ₆	0.001 8	0.000 2	2.21×10^{-5}	1.57×10^{-6}	8.24×10^{-7}	9.39×10^{-8}
改进的 D-S 证据理论	C ₁	0.001 0	5.99×10^{-6}	8.64×10^{-6}	2.21×10^{-5}	1.10×10^{-6}	5.17×10^{-8}
	C ₂	0.292 8	0.620 8	0.789 1	0.871 3	0.944 4	0.975 9
	C ₃	0.685 3	0.377 5	0.209 4	0.127 1	0.051 5	0.017 2
	C ₄	0.013 6	0.000 8	5.61×10^{-5}	6.68×10^{-6}	3.18×10^{-6}	1.79×10^{-6}
	C ₅	0.005 2	0.000 4	3.13×10^{-5}	2.77×10^{-6}	3.66×10^{-7}	2.20×10^{-8}
	C ₆	0.001 8	0.000 1	2.04×10^{-5}	1.48×10^{-6}	2.14×10^{-7}	2.31×10^{-8}

示。从计算结果可以看出,D-S 证据理论需要至少 4 条以上的证据才能使得正确的判断结果超过 50%。Murphy 改进方法没有考虑证据之间的相关性,在系统收集到 4 个证据时,其才能识别出损伤位置,并且 C₂、C₃测点出现损伤的概率相差不多,给判断增加了一定的难度。应用本文改进的 D-S 证据理论,只需前 3 条证据即可给出正确的识别结果,有效地降低了错误证据对最终融合结果的影响,使得在证据较少情况下就能使结果收敛为正确的目标。

4 结 论

- a. 在各损伤定位指标中,基于时间序列和标准差的指标能够直接利用结构上各测点的应变响应定位结构的损伤,但是在识别精度较低、小损伤的情况下容易出现误判断;基于应变模态的各损伤定位指标能够识别出结构的损伤位置,同时高阶模态的识别精度要高于低阶模态。
- b. 各损伤定位指标的识别精度受测试条件、噪声水平以及模态识别方法的影响较大,不同的损伤定位指标结果之间难免存在一定的冲突,给结构的损伤定位带来一定的困难。本文改进的 D-S 证据理论充分考虑了各证据之间的相互关联性,将各指标

的识别结果进行融合决策。

c. 试验证明,改进的 D-S 证据理论可以有效地处理证据存在冲突的情况,且具有较快的收敛速度,提高了在证据冲突时融合结果的可靠性和合理性,适用于水流荷载作用下导墙、桥墩等结构的损伤定位研究。

参考文献:

[1] BERRYHILL B H. Experience with prototype energy dissipater [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1963, 89(3):181-201.

[2] FALVEY H T. Hydraulic model studies of the modified outlet works stilling basin, Navajo Dam, Cororado River Storage Project, New Mexico [R]. Denver Colorado: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Office of Chief Engineering, 1967.

[3] 陈继建,李松辉. 基于支持向量机及模态参数识别的导墙结构损伤诊断研究[J]. 水利学报, 2008, 39(6):652-657. (LIAN Jijian, LI Songhui. Damage diagnosis of spillway guide wall based on support vector machine and modal parameter identification [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6):652-657. (in Chinese))

[4] MOSAVI A A, DICKEY D, SERACINO R, et al. Identifying damage locations under ambient vibrations

- utilizing vector autoregressive models and mahalanobis distances[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 26: 254-267.
- [5] ISMAIL Z, ABDUL R H, ABDUL R A G. Determination of damage location in RC beams using mode shape derivatives [J]. Engineering Structures, 2006, 28 (11): 1566-1573.
- [6] YAN Y J, CHENG L, WU Z Y, et al. Development in vibration-based structural damage detection technique [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21 (5): 2198-2211.
- [7] 张清华, 李乔, 唐亮. 基于损伤敏感指标的斜拉桥结构损伤定位研究[J]. 工程力学, 2008, 25 (5): 163-169. (ZHANG Qinghua, LI Qiao, TANG Liang. Study on structural damage location identification by damage indices for cable-stayed bridges [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (5): 163-169. (in Chinese))
- [8] 赵永辉, 邹经湘. 利用 ARMAX 模型识别结构模态参数 [J]. 振动与冲击, 2000, 19 (1): 34-36. (ZHAO Yonghui, ZOU Jingxiang. Identification of modal parameters for structure using ARMAX model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19 (1): 34-36. (in Chinese))
- [9] 杨秋伟. 基于振动的结构损伤识别方法研究进展[J]. 振动与冲击, 2007, 26 (10): 86-91. (YANG Qiuwei. A review of vibration-based structural damage identification methods [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26 (10): 86-91. (in Chinese))
- [10] 李火坤, 练继建, 杨敏, 等. 强震后基于泄流激励的映秀湾水电站拦河闸动态检测与损伤评估研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29 (9): 64-68. (LI Huokun, LIAN Jijian, YANG Min, et al. Dynamic detection and damage evaluation of Yingxiuwan hadropower station sluice under flood discharge excitation after strong seismic shock [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29 (9): 64-68. (in Chinese))
- [11] 刘越. 震后桥梁结构的时域损伤识别[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [12] 周先雁, 沈蒲生. 用应变模态对混凝土结构进行损伤识别的研究 [J]. 湖南大学学报, 1997, 24 (5): 69-74. (ZHOU Xianyan, SHEN Pusheng. Study of damage assessment of concrete structures by strain model method [J]. Journal of Hunan University, 1997, 24 (5): 69-74. (in Chinese))
- [13] 董晓马, 王忠辉. 损伤定位中应变模态指标的改进研究 [J]. 河南科学, 2008, 26 (7): 833-835. (DONG Xiaoma, WANG Zhonghui. Study on strain modal index improving in damage location [J]. Henan Science, 2008, 26 (7): 833-835. (in Chinese))
- [14] 滕海文, 霍达, 姜雪峰, 等. 结构损伤位置识别的组合指标法 [J]. 北京工业大学学报, 2007, 33 (5): 493-497. (TENG Haiwen, HUO Da, JIANG Xuefeng, et al. Combination index of damage locating detection for structures [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33 (5): 493-497. (in Chinese))
- [15] 李德葆, 诸葛鸿程, 王波, 等. 实验应变模态分析原理和方法 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1990, 30 (2): 105-112. (LI Debao, ZHUGE Hongcheng, WANG Bo, et al. On the principle and technique of experimental strain modal analysis [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1990, 30 (2): 105-112. (in Chinese))
- [16] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping [J]. Annual Math Statist, 1967, 38 (4): 325-339.
- [17] SHAFER G. A mathematical theory of evidence [M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [18] 邓勇, 施文康, 朱振福. 一种有效处理冲突证据的组合方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23 (1): 27-32. (DENG Yong, SHI Wenkang, ZHU Zhenfu. Efficient combination approach of conflict evidence [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 23 (1): 27-32. (in Chinese))
- [19] JOUSSEIME A L, GRENIER D, BOSSE E. A new distance between two bodies of evidence [J]. Information Fusion, 2001, 2 (1): 91-101.
- [20] MURPHY C K. Combining belief functions when evidence conflicts [J]. Decision Support Systems, 2000, 29 (1): 1-9.

(收稿日期: 2014-08-05 编辑: 周红梅)

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63, CN32-1117/TV, ISSN1000-1980, 双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是 CSCD 核心期刊、全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 核心期刊、全国水利系统优秀期刊, 主要刊登水文水资源及环境、水利水电工程、土木工程、港口航道及海洋工程、机电及信息工程等学科方面的科研成果和学术论文, 可供相关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

《河海大学学报(自然科学版)》逢单月出版, 国内外公开发行, 每期定价 15 元, 全年 6 期共计 90 元, 邮发代号 28-63, 欢迎广大读者通过全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系。编辑部地址: 210098 南京市西康路 1 号《河海大学学报(自然科学版)》编辑部; 电话: 025-83786343; E-mail: xb@hhu.edu.cn。