

# 基于D-S证据理论的动静指标融合的结构损伤识别方法研究

李海瑞<sup>1</sup> 李决龙<sup>2</sup> 邢建春<sup>1</sup>

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院 江苏 南京 210007;  
2. 海后军港机场营房部 北京 100841)

**摘要:** 针对大型土木结构健康监测系统,为了提高结构损伤识别的正确率,提出了一种基于D-S证据理论的动静指标融合的结构损伤识别方法。根据结构静态测试和动态测试得到的响应,分别构造用于结构损伤识别的静态指标和动态指标,然后将二者在基于D-S证据理论基础上进行数据融合,最后对结构的损伤作出识别。新方法充分融合了静态响应和动态响应中包含的结构损伤信息,具有抗干扰能力强、识别精度高等优点,较之单独使用静态和动态信息进行损伤识别更具优势。为了验证文中所提方法的有效性和可行性,对一个简支梁进行单损伤和多损伤模拟研究,同时考虑环境噪声影响,并与单一指标识别结果进行对比,结果表明所提方法有效且识别精度较高。

**关键词:** 数据融合; D-S证据理论; 动态指标; 静态指标; 模态应变能; 静态曲率置信因子

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1008-1933(2013)02-111-05

## The research on structural damage identification using the fusion of static and dynamic indicators based on D-S evidence theory

LI Hairui<sup>1</sup> LI Juelong<sup>2</sup> XING Jianchun<sup>1</sup>

(1. Institute of Engineering Corps, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China;  
2. Naval-port Airport Barracks Department of Navy Logistics, Beijing 100841, China)

**Abstract:** In the large-scale civil structural health monitoring, in order to improve the accuracy of structural damage identification, the method on structural damage identification using the fusion of static and dynamic indicators based on D-S evidence theory is first proposed in this paper. According to the static and dynamic test response of the civil structure, the static and dynamic indicators for structural damage identification are constructed, and then the data fusion based on D-S evidence theory of them will be proceeding, to make the final identification of structural damage. The new methods that fully fused the information on structural damage, which is contained in the static and dynamic response, have the capacity of resisting interference and the high precision of identification, better than separately using static or dynamic information. In order to verify the validity and feasibility of method that is proposed in the paper, a single or multiple damages simulation of a simple beam is conducted, taking into account the impact of environmental noise, and the identification results with single indicator is compared, it showed that the proposed method is effective and have a high degree of accuracy.

**Key words:** data fusion; D-S evidence theory; dynamic indicator; static indicator; modal strain energy; static displacement curvature assurance coefficient

## 0 引言

由于大型土木结构建造得越来越复杂,其自身的安全性和可靠性越来越备受人们的关注。在结构健康监测过程中,其结构自身损伤的识别显得尤为重要。关于结构损伤识别目前主要分为两大类:静

测法和动测法。当然,现在发展起来的一些有关结构损伤的智能检测方法也凸显出其自身的优势。基于静测法主要是根据测得结构的位移和应变等静态数据用于损伤识别<sup>[1-2]</sup>。文献[3]将静态应变变化率作为损伤识别指标,文献[4]是基于静力测量数据的损伤识别研究,文献[5]提出了一种基于静态测试和基频变化的二阶段损伤识别方法。基于动测法主要就是通过动力测试获取结构的模态参数,利用模态参数对结构损伤进行识别。其主要包括模态频率识别法、振型变化率、柔度法、柔度曲率、应变模

收稿日期: 2011-12-08

作者简介: 李海瑞(1987-),男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向: 大型土木结构健康监测。

E-mail: loveme2006lhr@sina.com

态、曲率模态、单元模态应变能和残余力向量等方法。近年来,关于损伤识别的数据融合研究也有一些,文献[6]提出了基于数据融合的结构损伤识别方法,文献[7]通过融合模态指标对钢管混凝土拱桥进行损伤识别,文献[8]基于数据融合和“能量-损伤”提出一种结构多损伤识别的方法。本文针对利用单一指标难以全面反映结构损伤信息的问题,提出了一种基于 D-S 证据理论的动静态指标融合的损伤识别方法。该方法基于 D-S 证据理论融合了反映结构损伤的不同信息源,从而能够对结构损伤作出更精确的识别。通过一个简支梁算例,验证了所提方法的有效性和优越性。

## 1 基于动静态指标的结构损伤识别方法

结构在服役过程中,不断受到外界环境的侵蚀,其自身健康在不同程度上都会受到损毁。由于结构内部出现损伤,其物理特性和外在表现也会随之变化。通过不同手段获取结构物理特性和外在表现的变化,来获取结构内部的损伤信息,这是结构损伤识别的常用手段。

### 1.1 静态指标识别法

当结构发生损伤时,结构上各点的静态位移、静态应变也将随之发生变化,因此可以通过监测结构的静态参数的变化来对结构的健康状态进行分析和识别。根据灰色系统的相关理论,可以把需要进行内部损伤识别的土木结构看成一个典型的灰色系统。可以通过结构损伤前后其外在宏观位移的关联性分析对结构内部产生的损伤进行定位。在结构中,由于静态测量参数位移对其局部损伤比较敏感,因此当结构上的某一部位发生内部损伤时,由损伤引起该部位附近区域的静态位移、静态应变的变化比其他部位要大得多,反映在结构上该部位的静态位移相关性、静态应变相关性比其他部位要差,故可以通过位移、应变在各部位的相关程度实现对损伤的定位<sup>[9-10]</sup>。通过研究发现,结构的位移曲率比位移本身对结构的损伤更为敏感<sup>[11-13]</sup>,因此可以根据所测结构上各节点的静态位移曲率的相关性大小来对结构的健康状况进行判断。结构损伤时的静态特性表现为局部性,即在结构发生损伤的单元节点的位移曲率变化的程度远大于未受损伤的单元。可以将未受损伤的单元节点位移曲率作为参考节点,将已发生损伤的各单元节点位移曲率作为比较序列,根据各节点的静态位移曲率置信因子的大小来判断结构在损伤前后的位移曲率相关程度,从而可以判断结构在该节点所在的单元是否发生损伤。

定义结构节点的静态位移曲率置信因子( $SDCAC_i$ )<sup>[14]</sup>,即

$$SDCAC_i = \frac{1}{1 + e^{\lambda_i \lambda_i}} \quad (1)$$

$$\text{式中 } \lambda_i = \frac{|\rho_i^{(d)} - \rho_i^{(u)}|}{\max |\rho_i^{(d)} - \rho_i^{(u)}|} \quad (2)$$

$\rho_i^{(d)}$ 、 $\rho_i^{(u)}$  为结构发生损伤前后第  $i$  节点的位移曲率值。其中:

$$\begin{aligned} \rho_i^{(u)} &= (a^{(2)}(u_u(i)) / \Delta x_i) / \Delta x_i \\ &= ((a^{(1)}(u_u(i+1)) - a^{(1)}(u_u(i))) / \Delta x_i) / \Delta x_i a^{(1)}(u_u(i)) \\ &= u_u(i+1) - u_u(i) \\ \rho_i^{(d)} &= (a^{(2)}(u_d(i)) / \Delta x_i) / \Delta x_i \\ &= ((a^{(1)}(u_d(i+1)) - a^{(1)}(u_d(i))) / \Delta x_i) / \Delta x_i a^{(1)}(u_d(i)) \\ &= u_d(i+1) - u_d(i) \quad i=2, \dots, n-1 \end{aligned}$$

式中  $u_u(i)$ 、 $u_d(i)$  为结构损伤前后的第  $i$  节点的位移;  $a^{(1)}(u_u(i))$ 、 $a^{(1)}(u_d(i))$  为结构损伤前后节点  $i$  的位移的一次累减生成;  $a^{(2)}(u_u(i))$ 、 $a^{(2)}(u_d(i))$  为结构损伤前后节点  $i$  的位移的二次累减生成。

静态位移曲率置信因子( $SDCAC_i$ )反映了结构损伤前后位移曲率的相关程度, $SDCAC_i$  越大,静态位移曲率的相关程度也就越大,则该部位发生损伤的可能性也就越小;反之损伤越大, $SDCAC_i$  也就越小。为了进行动静态数据融合方便,定义  $\overline{SDCAC_i} = 1 - SDCAC_i$ ,且定义单元的  $\overline{SDCAC_i}$  取其两端的平均值。

### 1.2 动态指标识别法

由于大型土木结构比较复杂,所以其损伤识别都是分区域进行的。针对单个区域的损伤识别,采用对结构局部损伤比较敏感的动态指标单元模态应变能。

根据文献[15-16],在本文,选择单元模态应变能的变化率( $MSECR$ )作为结构损伤识别的标识量,其定义如下:

$$MSECR_j^i = \frac{MSE_{ij}^d - MSE_{ij}^u}{MSE_{ij}^u} \quad (3)$$

式中  $MSE_{ij}^u = \Phi_{ui}^T K_j \Phi_{ui}$  为结构损伤前第  $j$  单元关于第  $i$  阶振型的单元模态应变能;  $MSE_{ij}^d = \Phi_{di}^T K_j \Phi_{di}$  为结构损伤后第  $j$  单元关于第  $i$  阶振型的单元模态应变能。

为了降低测试噪声的影响,考虑使用多阶模态振型来对结构的损伤位置进行识别:

$$MSECR_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{MSECR_j^i}{MSECR_{\max}^i} \quad (4)$$

## 2 利用D-S证据理论进行数据融合

### 2.1 数据融合

数据融合就是一种信息处理手段,它充分利用从多个信息源得到数据及其相关信息,以期获得比单个信息源更高的精确度和推论。一个完整的数据融合过程包括原始数据的采集、对原始数据的预处理、特征的提取、利用不同的方法进行融合计算和最终的融合结果的输出。依据提取信息的不同等级,可以把基于目标识别的数据融合分为3个层次:决策级融合、特征级融合、数据级融合。最高级别的决策级融合是将反映环境或目标的各个侧面的不同信息进行有效融合,以获得对目标的准确识别和判断,它具有良好的抗噪性和容错性。

### 2.2 D-S证据理论<sup>[17-18]</sup>

设 $\Theta$ 是一个识别框架。

定义一 基本概率分配: Basic Probability Assignment,简称BPA。在识别框架 $\Theta$ 上的BPA是一个 $2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 的函数 $m$ ,称为mass函数,并且满足 $m(\emptyset) = 0$ ,且 $\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1$ ,其中 $m(A) > 0$ 的 $A$ 称为焦元。

定义二 在识别框架 $\Theta$ 上基于BPA $m$ 的信任函数定义为:

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B)$$

D-S证据合成规则可表述如下:对于 $\forall A \subseteq \Theta$ , $\Theta$ 上的两个mass函数 $m_1$ 、 $m_2$ ,两个信任函数Bel1和Bel2,焦元分别为 $B$ 和 $C$ 。又设:

$$m_1 \otimes m_2(A) = \frac{1}{K} \sum_{B \cap C = A} m_1(B) m_2(C) \quad (5)$$

其中 $K$ 为归一化常数:

$$K = \sum_{B \cap C \neq \emptyset} m_1(B) m_2(C) = 1 - \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) m_2(C) \quad (6)$$

式中 $K$ 的值指出了被组合证据相互冲突的程度。当 $K=0$ 时,表示两个证据完全一致即完全相容,不需要对两个基本概率赋值进行组合。当 $K=1$ 时,表示两个证据完全冲突,不能对两个基本概率赋值进行组合。当 $0 < K < 1$ 时,表示两个证据部分相容,此时可以组合由mass函数确定的两个基本概率赋值。

由于D-S证据理论具有直接表达不确定和不知道的能力,这些信息被表示在mass函数中,并在证据合成过程中保留了这些信息,因此在本文中引入D-S证据理论对动静态指标进行数据融合,以便提高损伤识别的准确性。静态损伤指标的大小反映了结构损伤前后静态位移曲率相关程度,其值越大表

明结构的静态位移曲率相关性越小,损伤发生的可能性也就越大;动态损伤指标的大小反映了结构损伤前后单元模态应变能变化的大小,其值越大,损伤发生的可能性也就越大,并且它们的变化范围在 $[0, 1]$ 之间。因此,可以将静态损伤指标和动态损伤指标组成一个识别框架,识别框架内的动静态损伤指标分别为其两个焦元,其基本概率赋值函数由其指标值的大小给出。由前面假设可知,融合后的信任函数值等于重新组合后的mass函数值,并定义融合后的损伤因子 $m$ 的值为损伤指标融合后的信任函数值。

## 3 算例及仿真结果

为了验证本文所提出的关于结构损伤识别的融合方法,在这里以一个算例来说明。图1所示为一个两端固定的梁。梁的几何参数和材料参数如下:长为0.72 m,被划分为12个梁单元,弹性模量 $E$ 为 $7.5 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>,面积 $A$ 为0.001 m<sup>2</sup>,惯性矩 $I$ 为 $7.56 \times 10^{-9}$  m<sup>4</sup>,密度 $\rho$ 为7800 kg/m<sup>3</sup>。对于结构的静态测试分为两种工况,第一种为分别对4和7节点加载 $F=5000$  N,第二种为对10节点加载 $F=5000$  N,为了消除外界干扰, $\overline{SDCAC}$ 取其两者的平均值。对于结构损伤的动态测试分为单损伤和多损伤两种工况,第一种为单损伤工况,分别模拟单元5损伤15%,单元10损伤20%两种情况。第二种工况为多损伤工况,同时模拟单元3、单元7、单元10的损伤分别为15%、30%、50%,结构的损伤由减小受损单元的弹性模量来模拟,并假定振型所受到的随机噪声为3%。具体诊断结果如2~7所示。

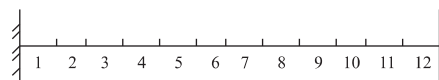


图1 梁单元的有限元模型

Fig. 1 The finite element of beam

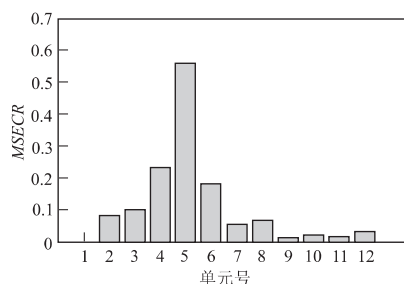
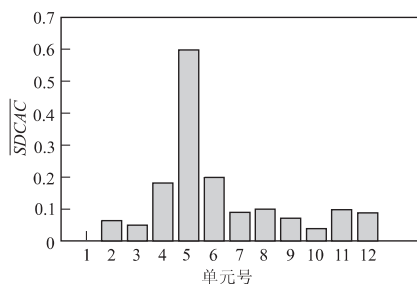
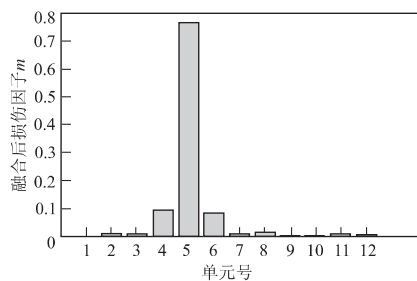
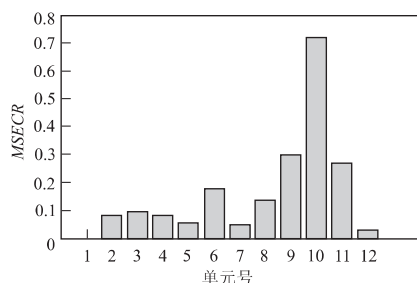
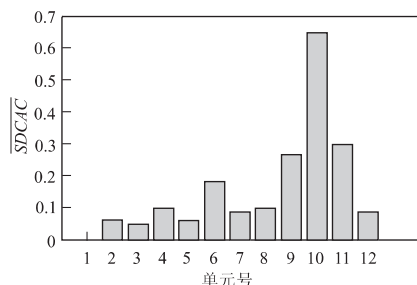
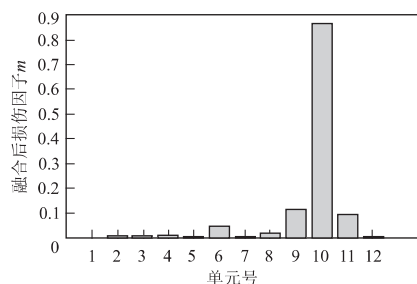


图2 单元5损伤15%时MSECR变化情况

Fig. 2 The changes about MSECR when damaged at No. 5 element of severity=15%

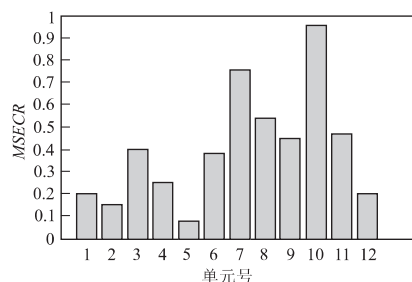
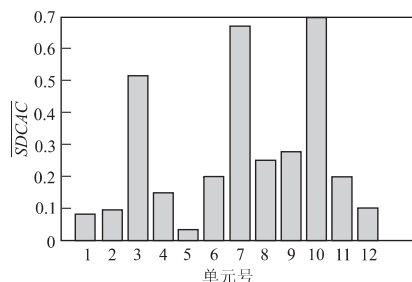
图3 单元5 损伤15%时  $\overline{SDCAC}$  变化情况Fig.3 The changes about  $\overline{SDCAC}$  when damaged at No.5 element of severity-15%图4 单元5 损伤15%时融合后因子  $m$  变化情况Fig.4 The changes about  $m$  when damaged at No.5 element of severity-15%图5 单元10 损伤20%时  $MSECR$  变化情况Fig.5 The changes about  $MSECR$  when damaged at No.10 element of severity-20%图6 单元10 损伤20%时  $\overline{SDCAC}$  变化情况Fig.6 The changes about  $\overline{SDCAC}$  when damaged at No.10 element of severity-20%

由图2、3、5、6 诊断结果可以看出,通过  $\overline{SDCAC}$  和  $MSECR$  也能对结构的单损伤进行准确识别,但识别精度不高,图4、7 为利用融合指标进行单损伤识别的结果,通过对比可以发现,利用融合指标进行

图7 单元10 损伤20%时融合后因子  $m$  变化情况Fig.7 The changes about  $m$  when damaged at No.10 element of severity-20%

识别,大大提高了损伤识别的精度,且明显优于单一指标识别的结果。

图8、9 为单独利用  $\overline{SDCAC}$  和  $MSECR$  对结构损伤定位和识别的结果,从图中可以看出,对多损伤状况来说,识别结果并不是太理想。图10 为利用融合指标识别的结果,从对比中可以得到,融合后的损伤诊断指标更能凸显损伤的位置,即使在环境干扰下也能精确地识别出损伤的位置,具有良好的抗噪性。数据融合利用了关于目标或环境的多方面的信息源,从而能对待识别的目标给出更为全面的评价和判断。通过文中所提的基于 D-S 证据理论融合后的结果,可以看出它明显优于单一指标的识别结果。

图8 单元3、单元7、单元10 损伤分别为15%、30%、50%时  $MSECR$  变化情况Fig.8 The changes about  $MSECR$  when damaged at No.3、7、10 element of severity-15%、30%、50%图9 单元3、单元7、单元10 损伤分别为15%、30%、50%时  $\overline{SDCAC}$  变化情况Fig.9 The changes about  $\overline{SDCAC}$  when damaged at No.3、7、10 element of severity-15%、30%、50%

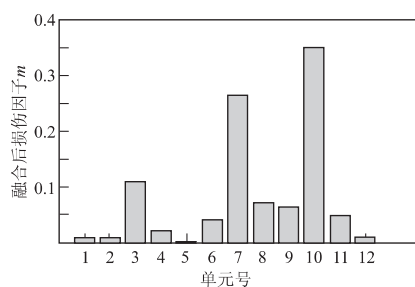


图10 单元3、单元7、单元10损伤分别为15%、30%、50%时融合损伤因子 $m$ 变化情况

Fig.10 The changes about  $m$  when damaged at No.3、7、10 element of severity-15%、30%、50%

## 4 结 论

本文基于D-S证据理论提出了一种融合动静态指标的结构损伤识别方法,算例仿真表明:

1) 融合后的损伤识别指标在对结构损伤识别时明显优于利用单一损伤指标识别的结果,尤其是在多损伤工况下;

2) 通过数据融合大大提高了损伤识别指标在结构损伤识别中的容错性和对环境噪声的抗干扰能力;

3) 算例仿真表明了所提出方法的有效性和在噪声中识别的精确性。

## 参 考 文 献:

- [1] 陈孝珍,赵冰.基于静力测量数据的桥梁结构损伤定位研究[J].三峡大学学报,2006,28(5):404-408.
- [2] 崔飞,袁万城,史家钧.基于静态应变及位移模态测量的结构损伤识别方法[J].同济大学学报,2000,28(1):5-8.
- [3] 基宫亚峰,程永春,焦峪波.基于静力应变及遗传优化神经网络的城市立交桥损伤识别[J].吉林大学学报,2011,41(9):164-169.

- [4] 刘殿忠,霍旭薪,吴学韬,等.桁架结构的静力损伤识别[J].吉林建筑工程学院学报,2010,20(6):10-13.
- [5] 张伟.结合静力测试与基频变化的PSO二阶段结构损伤识别[J].科学技术与工程,2011,11(23):5584-5587.
- [6] 刘涛,李爱群,缪长青,等.基于数据融合的结构损伤识别方法研究[J].工程力学,2008,25(1):16-21.
- [7] 姜绍飞,胡春明.基于模态指标与数据融合的钢管混凝土拱桥损伤识别[J].振动与冲击,2009,28(2):91-95.
- [8] 焦莉,李宏男,张海,等.基于数据融合和“能量-损伤”的结构多损伤模式识别[J].振动与冲击,2010,29(8):120-123.
- [9] Chen Xiaozhen, Zhu Hongping, Chen Chuanyao. Structural damage identification using test static data based on grey system theory[J]. Journal of Zhejiang University: Science, 2005, 6 A(80):790-796.
- [10] 陈孝珍,朱宏平,陈传尧.灰色相关性分析结构静力损伤识别中的应用[J].力学与实践,2005,27(3):60-64.
- [11] 禹丹江,陈淮.桥梁损伤检测的曲率模态法探讨[J].郑州大学学报,2002,23(3):104-106.
- [12] 张开鹏,吴代华,李卓球.基于有限元法的结构损伤同伦延拓识别法[J].武汉理工大学学报,2004,26(10):31-34.
- [13] 郑明刚.曲率模态在桥梁状态检测中的应用[J].振动与冲击,2000,20(2):81-83.
- [14] 朱宏平.结构损伤检测的智能方法[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [15] 郑飞,许金余,颜祥程.利用单元模态应变能法的地下框架结构损伤诊断[J].振动、测试与诊断,2010,30(6):642-645.
- [16] 史治宇,罗绍湘,张令弥.结构破损定位的单元模态应变能变化率法[J].振动工程学报,1998,11(3):356-360.
- [17] Vicene Torra. A New Combination Function in Evidence Theory[J]. International journal of intelligence systems,1995,10(1):1021-1033.
- [18] Du W J, Xie W X. Evidence combination methods in D-S evidence theory[J]. Systems Engineering and Electronics,1999,21(12):92-94.