

文章编号: 1000-4750(2012)12-0316-06

结构损伤与荷载共同识别的研究

张青霞^{1,3,4}, 段忠东^{2,3}, Łukasz Jankowski⁴

(1. 大连民族学院土木建筑工程学院, 大连 116600; 2. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 深圳 518055;

3. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090; 4. 波兰科学院基础技术研究所智能技术部, 02-106, 华沙)

摘 要: 针对结构中同时存在未知损伤和荷载的情况, 基于虚拟变形法(VDM)发展一种两者共同识别的时域方法。VDM方法利用虚拟变形模拟结构损伤, 可快速计算模型改变后的响应。该文首先结合有限元理论把VDM方法拓展到具有多个单元变形的结构中; 然后考虑结构存在未知荷载时, 利用未损伤理论模型同时识别荷载和虚拟变形, 继而由虚拟变形和单元实际变形的关系来识别判断损伤类型和识别损伤大小; 最后通过一个悬臂梁的试验进行方法验证, 试验中未知荷载和损伤(包括其类型和大小)均能够被有效识别, 并利用提出的移动时间窗和荷载形函数方法实现损伤与荷载的在线识别。

关键词: 结构健康监测; 虚拟变形法(VDM); 荷载识别; 损伤识别; 荷载形函数

中图分类号: TU311.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.05.0275

THE STUDY ON SIMULTANEOUS IDENTIFICATION OF STRUCTURAL DAMAGES AND LOADS

ZHANG Qing-xia^{1,3,4}, DUAN Zhong-dong^{2,3}, Łukasz JANKOWSKI⁴

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China;

2. Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China;

3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

4. Smart-Tech Centre, Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, 02-106, Warsaw, Poland)

Abstract: Unknown structural damages and loads usually coexistent together. Aiming at this problem, this paper develops a practical method in a time domain for their coexistent identification based on Virtual Distortion Method (VDM). In VDM, virtual distortions are introduced to simulate structural damages, and responses of the damaged structure can be estimated quickly. This article firstly extends VDM into real structures with multiple element distortions using finite element theory, and then unknown loads and virtual distortions are reconstructed simultaneously via the measurements and an intact structural model. Then the damage extent and type are recovered by a relation between the virtual and actual distortions. A damaged cantilever aluminum beam is used in the experimental verification. Both load and damage (extent and type) are successfully identified. The identification is performed off-line as well as online by the application of a moving time window and a load shape function.

Key words: structural health monitoring; virtual distortion method; load identification; damage identification; load shape function

收稿日期: 2011-05-05; 修改日期: 2011-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(50579008, 51108066); 波兰科学家 TEAM 基金项目(TEAM/2008-1/4);

欧洲地区发展基金项目(POIG0101.02-00-013/08-00)

通讯作者: 张青霞(1981—), 女, 河南人, 讲师, 博士, 从事结构健康检测研究(E-mail: zhangqingxia_hit@hotmail.com).

作者简介: 段忠东(1968—), 男, 湖南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构健康监测、风工程等研究(E-mail: duanzd@hit.edu.cn);

Łukasz Jankowski(1975—), 男, 波兰人, 助理教授, 博士, 从事智能系统、结构健康监测等研究(E-mail: ljank@ippt.gov.pl).

结构的外部激励和损伤是结构健康监测中的两个重要因素。近年来,国内外学者在荷载识别或损伤识别方面已经做了大量研究并提出较多有效的方法。在实际应用中,结构未知荷载和未知损伤常常是共存的,并且一起影响结构的动态行为。然而对于二者的共同识别的研究还比较少。

目前荷载识别方法大多数是在时域^[1]或频域^[2]内进行的,属于离线识别。在线的荷载识别方法一般为观测器技术(observer techniques)^[3]、逆结构滤波法(ISF)^[4]或卡尔曼滤波法^[5]等。所有这些方法都基于已有的结构模型,识别精度受结构模型的精度影响。

损伤结构的响应受外部激励和损伤共同影响。基于振动信息的识别方法^[6]一部分需要已知激励信息;其他如基于模态或时间序列的方法虽然不需要确切的激励历程,但局限于特殊的激励状态,比如环境激励。未知荷载和未知损伤共存时,单独识别荷载或损伤往往比较困难。目前研究较多采用两步迭代法进行二者的同时识别^[7-8],即每次迭代中分别对荷载和损伤先后进行迭代修正。Zhang 等^[9]利用切比雪夫多项式表示未知荷载,把识别荷载等效为识别多项式系数,识别中能够对二者同时进行迭代修正。基于虚拟变形法(Virtual Distortion Method, VDM)^[10],Zhang 等^[11]利用虚拟变形模拟损伤,借助未损伤结构利用实测损伤结构响应识别荷载和虚拟变形,然后利用识别的应力-应变关系识别损伤,包括损伤类型和大小。

文献[11]仅考虑了具有单个变形的单元。本文在此基础上把该方法拓展到具有多个单元变形的实际结构中,推导相应的单元总变形、虚拟变形和损伤因子之间的关系,继而进行荷载和损伤(类型和大小)的共同识别。通过一个悬臂梁试验验证了所提方法的有效性,利用移动时间窗技术^[13]进行荷载和损伤的在线识别。

1 虚拟变形法

虚拟变形法(VDM)是一种结构快速重分析方法,被广泛应用在结构的静态分析、动态分析中^[10]。该方法通过引入虚拟变形模拟结构参数的变化。虚拟变形是施加在原始未损伤结构中相关单元上的额外变形,使损伤结构的响应等价于原始未损伤结构在相同外部激励下的响应和在虚拟变形作用下的响应的叠加。

为表述简单起见,这里损伤只考虑结构单元刚度的折减。不过该方法可以简单拓展到其他损伤形式,如质量变化、材料的塑性屈服等^[1,10]。VDM 方法要求满足小变形假定。

1.1 虚拟变形和损伤

令 μ_i 表示第 i 个单元的刚度折减,即局部坐标系下损伤结构的单元刚度矩阵 $\tilde{\mathbf{K}}_i$ 与初始结构的刚度矩阵 \mathbf{K}_i 的比例关系:

$$\tilde{\mathbf{K}}_i = \mu_i \mathbf{K}_i \quad (1)$$

设 $\mathbf{f}(t)$ 为作用在损伤结构上的外部激励,结合式(1),损伤结构的运动方程可以表示为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \sum_i \mathbf{L}_i^T (\mathbf{K}_i - (1 - \mu_i)\mathbf{K}_i) \mathbf{u}_i(t) = \mathbf{f}(t) \quad (2)$$

式中: \mathbf{L}_i 是第 i 个单元由整体到局部的转换矩阵; \mathbf{u} 是结点位移; $\mathbf{u}_i(t) = \mathbf{L}_i \mathbf{u}(t)$ 是第 i 个单元的局部结点位移向量。把式(2)中方程左端变化的项移到方程右端,可以得到:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \sum_i \mathbf{L}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{u}_i(t) = \mathbf{f}(t) + \sum_i (1 - \mu_i) \mathbf{L}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{L}_i \mathbf{u}_i(t) \quad (3)$$

式(3)是未损伤结构的运动方程,定义 $(1 - \mu_i) \mathbf{L}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{L}_i \mathbf{u}_i(t)$ 为第 i 个单元上的虚拟力。由式(3)可以看出,损伤结构的响应等于未损伤结构在相同外部激励 $\mathbf{f}(t)$ 和在一定虚拟力作用下响应的线性叠加。该虚拟力作用在相应的损伤单元的结点自由度上,与结构的响应和损伤大小相耦合。

在 VDM 中,虚拟力与施加在未损伤结构上的虚拟变形等效。有限元模型的单元变形的数目和形式通过对它的刚度矩阵 \mathbf{K}_i 的特征值分解可以确定。 \mathbf{K}_i 是半正定型矩阵,故有两类特征向量:1) 单位变形向量,对应正特征值;2) 单位刚体运动向量,对应零特征值。以一个平面梁单元为例,它的局部刚度矩阵有 3 个正特征值,因此有 3 个变形向量:轴向变形、纯弯曲变形和弯剪变形,如图 1 所示。

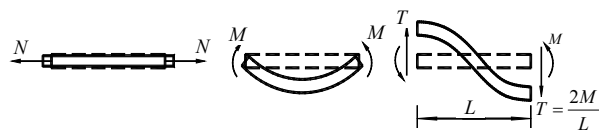


图 1 平面梁单元的 3 个基本变形

Fig.1 Three distortion states of a 2D beam element

矩阵 \mathbf{K}_i 可以由其正特征值 λ_{ij} 和对应的特征向量 φ_{ij} 表示为:

$$\mathbf{K}_i = \sum_j \lambda_{ij} \varphi_{ij} \varphi_{ij}^T \quad (4)$$

式中, φ_{ij} 是第 i 个单元的第 j 个单位变形。单元 i 产生变形 φ_{ij} 等价于在局部坐标系下施加相应的单元结点虚拟力:

$$\mathbf{n}_{ij} = \mathbf{K}_i \varphi_{ij} = \lambda_{ij} \varphi_{ij} \quad (5)$$

根据式(4)、式(5), 与结点位移 \mathbf{u}_i 对应的第 i 个单元上的结点力可以由单元结点虚拟力 \mathbf{n}_{ij} 的线性组合表示:

$$\mathbf{K}_i \mathbf{u}_i(t) = \sum_j \kappa_{ij}(t) \mathbf{n}_{ij} \quad (6)$$

式中组合系数:

$$\kappa_{ij}(t) = \varphi_{ij}^T \mathbf{u}_i(t) \quad (7)$$

为第 i 个单元的第 j 个变形大小。由式(3)、式(6)可以得到:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \sum_{i,j} \kappa_{ij}(t) \mathbf{L}_i^T \mathbf{n}_{ij} = \mathbf{f}(t) + \sum_{i,j} \kappa_{ij}^0(t) \mathbf{L}_i^T \mathbf{n}_{ij} \quad (8)$$

式中, $\kappa_{ij}^0(t)$ 是施加在未损伤结构中第 i 个单元上的第 j 个虚拟变形:

$$\kappa_{ij}^0(t) = (1 - \mu_i) \kappa_{ij}(t) \quad (9)$$

注意到虚拟变形与结构损伤及单元总变形相耦合, 如果已知虚拟变形 $\kappa_{ij}^0(t)$ 和总变形 $\kappa_{ij}(t)$, 则损伤因子 μ_i 由式(9)可以得到。

1.2 损伤结构的响应

式(3)或式(8)表明: 利用 VDM, 外部激励下损伤结构在第 α 个传感器的响应 $y_\alpha(t)$ 可以由两部分叠加表示, 即未损伤结构在相同激励下的线性响应 $y_\alpha^L(t)$ 和在虚拟变形作用下产生的响应:

$$y_\alpha(t) = y_\alpha^L(t) + \sum_{i,j} \int_0^t D_{\alpha ij}^\kappa(t-\tau) \kappa_{ij}^0(\tau) d\tau \quad (10)$$

式中 $D_{\alpha ij}^\kappa(t)$ 是未损伤结构的相关脉冲响应函数, 为在第 i 个单元上施加第 j 个单位脉冲变形产生的第 α 个传感器位置的响应。实际中, 并非单元的所有变形都能被激励起来, 因此未被激励起的变形对应的虚拟变形在式(8)和式(10)中可以忽略, 从而在分析中减少计算工作。

2 荷载和损伤识别

2.1 未知激励下损伤结构的响应

若激励 $f(t)$ 未知, 假定结构初始状态为零(非零初始状态将在 2.3 节中讨论), 式(10)损伤结构的响应可以扩展为:

$$y_\alpha(t) = \sum_i \int_0^t D_{\alpha i}^f(t-\tau) f_i(\tau) d\tau +$$

$$\sum_{i,j} \int_0^t D_{\alpha ij}^\kappa(t-\tau) \kappa_{ij}^0(\tau) d\tau \quad (11)$$

式中, $D_{\alpha i}^f(t)$ 为未损伤结构的测点 α 和荷载 $f_i(t)$ 之间的脉冲响应函数。实际应用中, 所用测量的数据往往是离散的, 相应地, 式(11)的离散化形式为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{D}^f \mathbf{f} + \mathbf{D}^\kappa \boldsymbol{\kappa}^0 = [\mathbf{D}^f \quad \mathbf{D}^\kappa] \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \boldsymbol{\kappa}^0 \end{bmatrix} = \mathbf{D} \mathbf{z} \quad (12)$$

式中, 向量 \mathbf{z} 包含所有的未知荷载和虚拟变形的时间历程。向量 \mathbf{z} 的元素按各未知变量的时间历程依次排列, 对应的矩阵 \mathbf{D} 是由多个子矩阵组成的分块矩阵, 每个子矩阵是由相应测点的脉冲响应函数构成的 Toeplitz 矩阵。

2.2 荷载和虚拟变形的离线识别

由式(11)或式(12)知, 荷载和损伤信息与结构响应相对应。因此, 未知荷载与损伤可以由实测结构响应确定, 也就是最小化未知荷载和虚拟变形作用下的结构计算响应 \mathbf{y} 与实测结构响应 \mathbf{y}^M 间的距离, 即求解式:

$$\mathbf{y}^M = \mathbf{D} \mathbf{z} \quad (13)$$

为保障解的唯一性, 需要独立测点(传感器)的数目至少等于未知荷载和损伤单元的相关虚拟变形的数目。实际中, 为限制所必须的传感器数目, 需要预先知道或假定荷载和损伤可能存在的位置。

式(13)中系数矩阵 \mathbf{D} 的维数与测量时间步成正比, 当采样频率高或测量时间较长时, 矩阵 \mathbf{D} 的维数较大, 导致式(13)求解困难。故可采用有限的基函数来逼近未知荷载和虚拟变形, 以减少计算量。这里采用荷载形函数^[14], 求解式(13)转化为解方程:

$$\mathbf{y}^M \approx \mathbf{D} \mathbf{N} \mathbf{a} \quad (14)$$

式中, $\mathbf{z} \approx \mathbf{N} \mathbf{a}$, \mathbf{N} 是荷载形函数矩阵。形函数的未知系数 \mathbf{a} 远小于未知变量 \mathbf{z} 的数目。

此外, 由于矩阵 \mathbf{D} 的结构, 式(13)或式(14)可能是病态的, 求解时需要合适的正则化技术。式(13)可以通过共轭梯度法(CGLS)快速计算。其他正则化方法如奇异值截断分解(TSVD)和 Tikhonov 方法等^[13]。本文利用式(14)进行识别, 其维数远小于式(13), 因此采用更简单直接的 TSVD 方法。

2.3 荷载和虚拟变形的在线识别

荷载和损伤共同识别的主要任务是求解式(13)或式(14), 本质上是计算离散的反卷积。识别的精度和计算量主要取决于系数矩阵 \mathbf{D} 或系数矩阵 $\mathbf{D} \mathbf{N}$ 的维数。当测量时间长时, 这 2 个矩阵均会很大,

从而直接求解耗时并且计算困难。此外,式(13)或式(14)只能用于离线识别。采用移动时间窗技术^[11]能够克服这些不足并实现在线识别。

式(11)为零初始状态下损伤结构的响应表达式,类似地第 n 个时间窗内结构的响应 $y_\alpha^{(n)}(t)$ 可以表示为:

$$y_\alpha^{(n)}(t) = \bar{y}_\alpha^{(n)}(t) + \sum_i \int_0^t D_{\alpha i}^f(t-\tau) f_i(\tau) d\tau + \sum_{i,j} \int_0^t D_{\alpha ij}^\kappa(t-\tau) \kappa_{ij}^0(\tau) d\tau \quad (15)$$

式(15)表明,该窗内的结构响应由两部分组成:该窗的初始状态引起的未损伤结构的自由振动 $\bar{y}_\alpha^{(n)}(t)$ 和当前窗内未知激励引起的强迫振动。因此,该时间窗内的未知数通过离散的表达式(16)可以得到:

$$\mathbf{y}^{M(n)} - \bar{\mathbf{y}}^{(n)} = \mathbf{B}^{(n)} \mathbf{z}^{(n)} \quad (16)$$

式中,矩阵 $\mathbf{B}^{(n)}$ 是矩阵 \mathbf{D} 或矩阵 \mathbf{DN} 的缩减形式,其维数大小由第 n 个时间窗的长度决定。与式(13)或式(14)相比,式(16)中的方程组明显变小,计算容易。

每个时间窗的初始状态和由其引起的自由振动根据已识别的上一个时间窗内的荷载和变容易得到。这样,利用移动时间窗依次逐段地识别分析时间内的所有未知荷载和虚拟变形,以及每个窗内对应的结构损伤,从而实现荷载损伤的在线识别。

在线识别时,需要利用上一个窗的识别结果获取当前窗的结构初始状态,因此易累积前面的识别误差。在实际中,测量噪声的影响比较大。此外,每段内采用的实测信号比较短,故与长信号相比对噪声更敏感。实际应用中为提高识别精度,提高方法对噪声的鲁棒性,建议方法应用中采用以下 2 个步骤:

1) 各窗内采用形函数方法进行识别,能进一步降低计算量,而且能改善反问题的病态性,计算中削减少数几个奇异值就能够保证解的识别精度。

2) 外部激励从非零值开始,也就是突然作用在结构上,易激起结构的高频振动。反问题求解中,高频成分对病态性的影响很大^[13]。因此,每个窗内把待识别的荷载和虚拟变形等效为两部分:① 加权后的上个窗内重叠的荷载和虚拟变形的时间历程,② 从零开始的时间历程。第二部分由式(15)识别,其中初始响应 $\bar{y}_\alpha^{(n)}(t)$ 由当前窗的初始状态和

加权后的上一个窗内重叠的荷载和虚拟变形的时间历程一起产生。

2.4 损伤识别

根据式(13)、式(14)离线或式(16)在线识别的荷载和虚拟变形,可以计算相应的结构响应及损伤单元的总变形(式(7))。继而通过式(9)识别结构损伤,即:

$$\mu_i(t) = \frac{\kappa_{ij}(t) - \kappa_{ij}^0(t)}{\kappa_{ij}(t)} \quad (17)$$

根据计算的虚拟变形和单元总变形,可以绘制关系曲线 $[\kappa_{ij}(t) - \kappa_{ij}^0(t)] \sim \kappa_{ij}(t)$ 。该曲线可揭示损伤的类型,如曲线为线性函数表明损伤为常数,双折线函数则表明损伤随变形发生变化(如呼吸裂纹模型^[14])。判定损伤类型后,拟合该关系曲线可以计算损伤大小。

3 试验验证

3.1 试验模型

试验装置如图 2 所示。试件为一个悬臂铝梁,固定端夹在一个稳定框架上。试件长 136.15cm,矩形截面 2.7cm×0.31cm。弹性模量 70GPa,密度为 2700kg/m³。在靠近试件固定端、沿梁长 10.23cm 做均匀等深的切口来模拟损伤,如图 2,使损伤部位的刚度减少到原刚度的 42%,而保持试件质量基本不变。

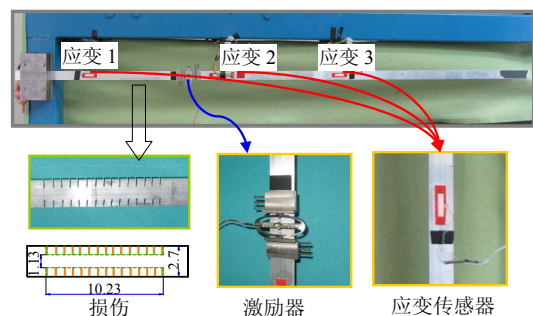


图 2 试验装置

Fig.2 Experimental setup

3.2 激励和结构响应

如图 2 所示,在梁上固定压电激励器 APA(Amplified Piezo Actuator),对试件施加一个纯弯矩激励。设计的激励信号借助 PC 计算机由数据采集系统 LabVIEW 以电信号的形式施加在试件上。基于压电活性材料的伸缩原理,激励器 APA 通过施加位移来施加荷载。激励引起的结构动态响应利用贴在梁上的 3 个 PVDF 压电应变片测量,记为传

传感器 S1~传感器 S3。施加的激励信号和结构的振动信号由数据采集系统 LabVIEW 获取并储存在 PC 计算机中。另外，应变传感器和激励信号分别通过 Brüel&Kjaer 电荷放大器和功率放大器被放大。

试验中设计的激励如图 3(a)所示。为保证测量信号中含有必需的结构响应信息，采样频率为 2500Hz，对应的测点传感器的响应见图 3(b)。

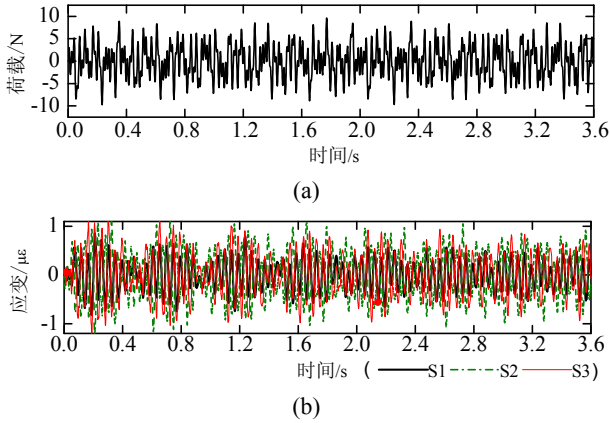


图 3 实测荷载和结构响应

Fig.3 Measured excitation and the corresponding structural responses

3.3 荷载与损伤识别

建立未损伤结构的理论有限元模型，把损伤部分作为一个单元。因为试件细长，在建立有限元模型时考虑重力的影响，以及固定在梁上的压电激励器和应变传感器的影响。根据前面分析，一个平面梁单元有三个虚拟变形。但是这里在弯矩激励下，结构主要发生弯曲变形，其余两个变形在分析中可以忽略。因此只需识别两个未知变量：一个外部激励和一个虚拟弯曲变形。为保证解的唯一性，要求传感器的数目至少为 2 个。

利用移动时间窗进行识别。每个窗取 400 个时间步，相邻窗重叠 200 步。分析 8800 步，即 3.52s，共采用 43 个时间窗。各窗内利用 42 个形函数基来逼近各未知数的时间历程，然后通过式(16)识别未知荷载和虚拟变形。分别采用 2 个和 3 个传感器进行识别，识别的荷载见图 4。

以测点 S1 和测点 S3 识别的结果为例，对应损伤单元的虚拟变形和单元总变形间的关系曲线 $[\kappa_{ij}^0(t) - \kappa_{ij}^0(t)] \sim \kappa_{ij}^0(t)$ 如图 5 所示。曲线近似为线性函数，表明损伤为常数，这里体现为单元刚度的常数折减；曲线的斜率接近单元的实际损伤大小。根据式(17)通过最小二乘法拟合曲线计算各窗内的损伤因子，如图 6，从而实现损伤的在线监测。

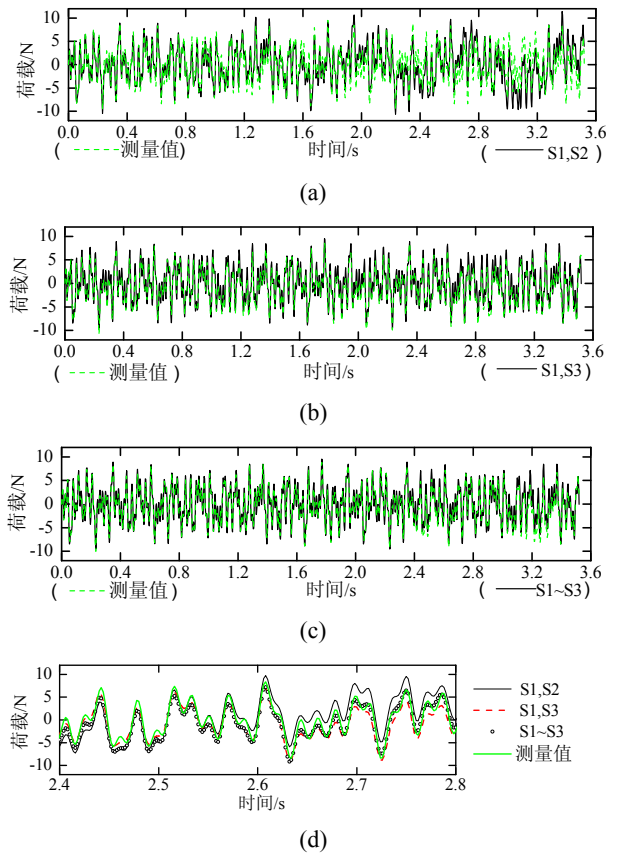


图 4 荷载识别结果

Fig.4 Identification of external excitation

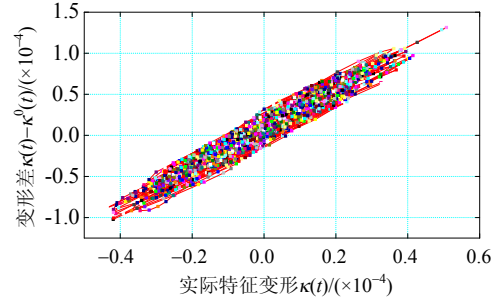


图 5 识别的损伤单元的虚拟变形和总变形间的关系曲线

Fig.5 Identified relation curve between the virtual distortion and the total distortion of the damaged element

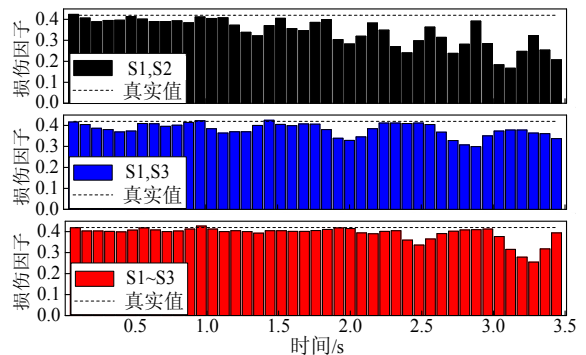


图 6 每个时间窗内识别的损伤因子

Fig.6 Identified damage extents in each time window

表 1 列出了所有窗内识别的损伤因子的平均值 $\bar{\mu}$ 和离线识别结果 μ 。这里离线识别是指一次利用 3.52s 内所有测量数据识别的结果。在线识别的均值和利用离线识别的结果很接近,说明在线方法虽然利用的是较短时间段内的数据,但平均意义上与离线识别具有同样的精度,并且能实时反应结构的健康状况。

表 1 损伤因子: 离线识别值和在线识别值
(所有时间窗内识别的损伤因子的平均值)

Table 1 Damage parameter: actual, identified off-line and online (the mean of the results in all time sections)

损伤	识别值	绝对误差	损伤	识别值	绝对误差
$\bar{\mu}_{1,2}^{\text{在线}}$	0.340	-0.08	$\mu_{1,2}^{\text{离线}}$	0.327	-0.093
$\bar{\mu}_{1,3}^{\text{在线}}$	0.387	-0.033	$\mu_{1,3}^{\text{离线}}$	0.381	-0.039
$\bar{\mu}_{1-3}^{\text{在线}}$	0.391	-0.029	$\mu_{1-3}^{\text{离线}}$	0.388	-0.032

注: 下脚标表示用于识别的传感器编号。

考虑所有测量时间 3.52s 内的所识别荷载的相对误差 $\|F_{\text{计算}} - F_{\text{实测}}\|_2 / \|F_{\text{计算}}\|_2$, 传感器(S1, S2)、传感器(S1, S3)和传感器(S1~S3)识别的误差分别为 25.66%、11.82%和 8.16%。这三组传感器离线识别的损伤因子的绝对误差分别为 -0.093、-0.033 和 -0.032(见表 1)。设 $\eta(t) = \eta(\mu(0 \sim t))$ 和 $\sigma(t) = \sigma(\mu(0 \sim t))$ 分别表示 0 到 t 时刻之间在线求出的所有损伤因子 μ 的均值和方差, 则三种工况的均值和方差见图 7。可以看出: 1) 初始时刻损伤因子识别得很准确, 但随着时间的增加, 识别误差会增大, 这是由于模型误差和测量误差会随时间的推移而累积, 导致识别误差增加; 2) 利用 3 个传感器 S1~S3 识别的精度最高且方差也最小, 说明适当增加传感器数会提高在线识别的精度和稳定性。利用传感器 S1~S3 的识别结果只 3.2s 处出现一次较大波动, 在 3.5s 时识别值又恢复准确; 3) 利用传感器 S1 和传感器 S3 要比传感器 S1 和传感器 S2 识别的精度高, 这是因为传感器 S1 和传感器 S3 的布置相对于传感器 S2 与传感器 S1 较分散和独立, 说明传感器的优化布置会提高识别的精度。

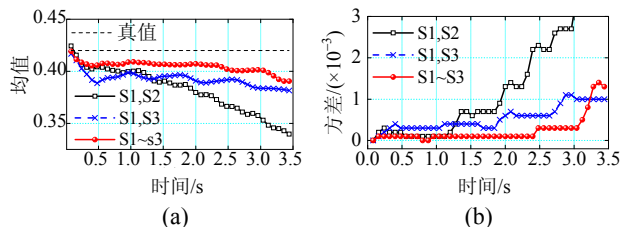


图 7 在线识别的损伤因子的均值和方差

Fig.7 The means and variances of the identified damage extents

4 结论

基于虚拟变形法(VDM), 本文发展并试验验证一种荷载和损伤的共同识别方法。主要结论如下:

(1) 用虚拟变形模拟结构损伤, 把虚拟变形视为与外部荷载同样引起结构响应的激励, 利用实测损伤结构的响应和未损伤结构模型共同识别激励和虚拟变形的时间历程。

(2) 根据损伤单元的实际变形、虚拟变形及损伤因子之间的关系, 判断识别损伤类型和大小。

(3) 在一定荷载激励下, 仅利用与结构主要变形有关的虚拟变形就可以模拟损伤, 而其余单元变形可以忽略, 从而减少待识别的未知变量数目。

(4) 利用移动时间窗和荷载形函数方法可以提高计算效率, 实现荷载与损伤的在线识别。

参考文献:

- [1] Jankowski Łukasz. Off-line identification of dynamic loads [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009, 37(6): 609-623
- [2] 智浩, 文祥荣, 缪龙秀, 等. 动态荷载的频域识别方法 [J]. 北方交通大学学报, 2000, 24(4): 5-10.
Zhi Hao, Wen Xiangrong, Miao Longxiu, et al. Dynamic loading identification in frequency domain [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2000, 24(4): 5-10. (in Chinese)
- [3] Ha Q P, Trinh H. State and input simultaneous estimation for a class of nonlinear systems [J]. Automatica, 2004, 40: 1779-1785
- [4] Allen M S, Carne T G. Delayed, multi-step inverse structural filter for robust force identification [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22: 1036-1054
- [5] Liu J J, Ma C K, Kung I C, et al. Input force estimation of a cantilever plate by using a system identification technique [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 190(11/12): 1309-1322.
- [6] Kołakowski P, Mujica L E, Vehi J. Two approaches to structural damage identification: Model updating vs. soft computing [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2006, 17(1): 63-79.
- [7] Chen J, Li J. Simultaneous identification of structural parameters and input time history from output-only measurements [J]. Computational Mechanics, 2004, 33(5): 365-374.
- [8] Zhu X Q, Law S S. Damage detection in simply supported concrete bridge structure under moving vehicular loads [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2007, 129(1): 58-65.

(参考文献[9]-[14]转第 348 页)

- Model test of segmental concrete coping with unbonded prestressing stands [J]. *Structural Engineering*, 1999, 25(1): 30—33. (in Chinese)
- [8] JG/T006-2005, 预制预应力混凝土装配整体式框架(结构体系)技术规程(苏)[S]. 南京: 江苏建设厅, 2005.
JG/T006-2005, Technique specification for framed structure comprised of precast and precast, prestressed concrete component (SCOPE) system [S]. Nanjing: The Construction Bureau of Jiangsu Province, 2005. (in Chinese)
- [9] 支正东. 外壳预制核心现浇装配整体式 RC 结构体系的关键技术研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2008: 6—7.
Zhi Zhengdong. The study on key techniques of fabricated integral RC structure with precast external shell and cast-in-place core concrete [M]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2008: 6—7. (in Chinese)
- [10] 张大长, 支正东, 卢中强, 金如元, 刘亚非. 外壳预制核心现浇 RC 梁抗弯承载力的试验研究[J]. *工程力学*, 2009, 25(5): 164—170.
Zhang Dachang, Zhi Zhengdong, Lu Zhongqiang, Jin Ruyuan, Liu Yafei. Experimental studies of bending capacities of RC beams with precast external shell and cast-in-place core concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 25(5): 164—170. (in Chinese)
- [11] 张大长, 支正东, 卢中强, 金如元. 外壳预制核心现浇装配式 RC 柱抗震性能的试验研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(8): 131—137, 142.
Zhang Dachang, Zhi Zhengdong, Lu Zhongqiang, Jin Ruyuan. Experimental studies on seismic performance of assembly RC columns with precast external shell and cast-in-place core concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(8): 131—137, 142. (in Chinese)
- [12] GB 50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
GB 50010-2002, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [13] 高丹盈, 刘建秀, 李宗坤. 钢筋钢纤维混凝土梁斜截面抗剪强度的理论模式[J]. *工程力学*, 1994, 11(2): 130—137.
Gao Danying, Liu Jianxiu, Li Zongkun. Theoretical model on shear strength of reinforced fiber concrete beams [J]. *Engineering Mechanics*, 1994, 11(2): 130—137. (in Chinese)

(上接第 321 页)

- [9] Zhang K, Li H, Duan Z, et al. A probabilistic damage identification approach for structures with uncertainties under unknown input [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(4): 1126—1145.
- [10] Holnicki-Szulc J. Smart technologies for safety engineering [M]. Wiley, Chichester, 2008: 15—30.
- [11] Zhang Q, Jankowski Łukasz, Duan Z. Identification of coexistent load and damage [J]. *Structural Multidisciplinary Optimization*, 2010, 41(2): 243—253.
- [12] Zhang Q, Jankowski Łukasz, Duan Z. Identification of coexistent load and damage based on virtual distortion method [C]// Uhl T, Ostachowica W, Holnicki-Szulc J. *Proceedings of the 4th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Kraków, Poland, 2008: 1121—1128.
- [13] Hansen P. Deconvolution and regularization with Toeplitz matrices [J]. *Numerical Algorithms*, 2002, 29(4): 323—378.
- [14] Friswell M, Penny J. Crack modelling for structural health monitoring [J]. *Structural Health Monitoring*, 2002, 1(2): 139—148.