

结构损伤与荷载的快速同步识别方法研究

张青霞^{1,3}, 段忠东^{2,3}, Lukasz 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, 波兰 华沙 02-106)

摘要: 以损伤因子为优化变量, 提出一种结构损伤和荷载同步识别的方法。首先通过时域荷载识别的方法将未知荷载转化为损伤因子的函数, 将近似荷载作用下的结构响应和实测响应的平方距离作为目标函数, 从而降低了需要识别未知参数的数目; 然后在目标函数的计算过程中, 利用虚拟变形法(VDM)可进行结构快速重分析的思想, 快速构造给定损伤因子下系统的脉冲响应, 避免每步迭代重新集装系统矩阵, 并通过荷载形函数方法进一步提高荷载识别的效率; 最后利用二次多项式插值近似结构每个时刻的响应方法和推导对应目标函数的梯度表达式来提高优化搜索的速度。本文利用刚架模型进行数值模拟, 准确识别了结构中柱子单元刚度损伤、附加质量以及梁上的未知移动荷载, 并通过一个悬臂梁试验进一步验证所提出方法的准确性和可行性。

关键词: 结构健康监测; 荷载识别; 损伤识别; 虚拟变形法(VDM)

中图分类号: TU311.3 **文献标识码:** A

Fast simultaneous identification of structural damages and loads

ZHANG Qing-xia^{1,3}, DUAN Zhong-dong^{2,3}, JANKOWSKI Lukasz⁴

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

2. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, 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, Warsaw 02-106, Poland)

Abstract: A load and damage simultaneous identification method was proposed with only damage factors taken as optimization variables. Firstly, unknown loads were converted into a function of damage factors via a load identification method in time domain so that the number of the parameters to be identified was reduced. The optimization was performed by minimizing the square distance between the measured responses and the estimated ones corresponding to the estimated loads and the given damage factors. During the optimization, in order to raise the computational efficiency, the virtual distortion method (VDM) was employed, it was a fast structural reanalysis method. Via VDM, the impulse response of the damaged structure with the given damage factors was constructed efficiently and repetitiously assembling the system matrix for each iteration was avoided. Further, the load shape function method was used to estimate unknown load, it could improve the ill-conditioning problem of the inverse problem and also obviously reduce the computational cost. At last, the optimization was further speeded up by interpolating the estimated structural responses using a quadratic polynomial, via it the expression of the gradient of the objective function was deduced. In a numerical simulation of a three-span frame, a moving excitation and stiffness-related damages and an additional mass were identified successfully with a 5% Gaussian noise pollution. And an experiment of a cantilever beam was performed to validate the accuracy and the feasibility of the proposed method.

Key words: structural health monitoring; load identification; damage identification; virtual distortion method (VDM)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108066); Financial support of Structural Funds in the Operational Programme-Innovative Economy (IE OP) financed from the European Regional Development Fund-Projects No POIG.0101.02-00-013/08-00 (MONIT); 大连民族学院科研基金项目(20116207); 住房和城乡建设部项目(K2201243)

收稿日期: 2011-12-20 修改稿收到日期: 2012-02-22

第一作者 张青霞 女, 博士, 讲师, 1981年生

结构的外部荷载和损伤信息在结构健康监测、结构安全维护和安全评定中具有重要作用。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。而对于二者同步识别的研究至今还比较少。

目前基于结构振动信息的损伤识别方法,多采用基于模态或时间序列的方法,虽然这些方法不需要已知激励历程,但它们要求激励局限于一定形式,如环境激励或结构自由响应(脉冲激励)等。当荷载的类型为普通荷载(非脉冲、非环境激励)时,一般需要测量或已知荷载时程,采用时域方法,将计算响应和实测响应的平方距离作为目标函数进行损伤的优化识别。荷载识别方法多数基于时域内的结构振动响应进行识别,一般可归结为线性方程组求解。为了克服逆问题求解中常常存在的奇异性和病态性,提出的方法有截断奇异值分解方法(TSVD)^[1]、广义正交多项式^[2]、Tikhonov正则化方法^[3]、荷载形函数方法^[4]、振型分解法^[5]等。这些荷载识别方法都是已知准确的结构模型。对于未知荷载和损伤共存的情况,Zhu等^[6]提出利用两步反演法同时识别移动荷载和 Euler-Bernouli 简支梁损伤,所需传感器数目为梁单元的数目减一。Lu等^[7]基于结构响应的灵敏度利用两步反演法同时识别系统参数和输入激励,未知荷载由一系列正弦函数加一个常数逼近。Zhang等^[8]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。Zhang等^[9-10]基于虚拟变形方法(VDM),用虚拟变形等效结构的损伤,继而借助未损伤结构通过实测损伤结构响应识别荷载和损伤,包括损伤类型和大小,该方法要求传感器数目不小于未知荷载数目和虚拟变形数目的总和。

结构损伤一般采用优化迭代的方法识别,与荷载识别思路不同。结构的损伤和荷载是两种不同类型的物理量,而且动态荷载时程的未知数与时间步数成正比,需要识别的未知数要远远大于损伤数目。一般优化参数越多,优化速度越慢,而且迭代越难收敛,所以很难通过优化的方法同时准确识别出未知损伤和荷载。为了减少优化参数的数量,本文通过荷载识别的方法把本来独立于结构的荷载表示为损伤因子的近似表达式,将近似荷载作用下的结构响应和实测响应的平方距离作为目标函数,从而使目标函数中只有损伤因子为优化变量。为了提高优化效率,从三个方面进行改进,即采用虚拟变形方法构造系统脉冲响应、通过荷载形函数方法进行荷载识别以及通过二次多项式插值近似结构的响应来加快优化收敛速度。最后分别利用一个3跨框架梁的数值算例和悬臂铝梁试验来验证本文提出的方法的有效性。

1 损伤和荷载同步识别

1.1 目标函数的建立

设结构中需要识别的未知参数包括集中质量 $m_i (i=1, 2, \dots, n_m)$ 和单元刚度损伤 $\beta_i (i=1, 2, \dots, n_e)$, 将二者合写为参数 μ_i , 见式(1), 为了方便描述, 将两者统

称为结构的损伤因子。将 μ_i 排列为向量 μ 。

$$\mu_i = \begin{cases} \alpha_i = m_i/m_i^0 \geq 0 & (i=1, \dots, n_m) \\ \beta_{i-n_m} \in (0, 1] & (i=n_m+1, \dots, n_m+n_e) \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_i^0 为第 i 个质量初始估计值。

设损伤结构是在外部多点激励 $f(t) = [f_1(t), f_2(t), \dots]^T$ 作用下结构的第 w 个传感器响应为 $y_w(t, \tilde{\mu})$, 可通过系统脉冲响应表示为式(2)的形式, 将其离散并排列为矩阵的形式为式(3)。这里根据结构形式不同响应可以为应变、加速度、速度响应等。

$$y_w(t, \mu) = \sum_q \int_0^t h_{wq}(t-\tau, \mu) f_q(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$y(\mu) = H(\mu) f \quad (3)$$

式中: $h_{wq}(t, \mu)$ 为在第 q 自由度方向作用单位脉冲, 在第 w 个传感器的响应, $H(\mu)$ 是对应的离散脉冲响应矩阵, 为下三角阵组成的块矩阵。

当参数向量 μ 和荷载向量 f 均未知时, 理论上可建立目标函数式(4)进行二者的优化识别。但是荷载和损伤是两种完全不同类型的物理参数, 数量级差别很大, 而且荷载变量的数目十分庞大, 如果对二者直接进行优化, 很难搜到最优解。鉴于此, 本文仅以损伤因子为优化变量, 荷载根据每步迭代过程中给定损伤因子 μ 下结构脉冲响应和实测响应 y^M 近似估计, 即求解线性方程组(5)。从而将荷载 $\tilde{f}(\mu)$ 转化为关于 μ 的函数, 那么目标函数式(4)可以转化为式(7)。

$$\Delta_1(f, \mu) = \frac{1}{2} \| y^M - H(\mu) f \|^2 \quad (4)$$

$$y^M \approx H(\mu) \tilde{f}(\mu) \quad (5)$$

令:

$$\tilde{y}(\mu) = H(\mu) \tilde{f}(\mu) \quad (6)$$

$$\Delta_2(\mu) = \frac{1}{2} \| y^M - \tilde{y}(\mu) \|^2 = \frac{1}{2} \| y^M - H(\mu) \tilde{f}(\mu) \|^2 \quad (7)$$

针对式(5)和目标函数式(7), 本文通过以下三个方面来提高优化速度:

(1) 式(5)中系统脉冲响应 $H(\mu)$ 由虚拟变形方法快速构造, 避免每次重新构造系统矩阵;

(2) 用荷载形函数方法^[4]将线性方程组式(5)中荷载时程的求解转化为计算荷载形函数系数, 以降低求解的未知数目, 能够改善反问题求解的奇异性并减少计算量;

(3) 通过二次多项式插值获得式(7)中 $\tilde{y}(\mu, t)$ 的近似二次表达式, 简化目标函数, 并推导其梯度表达式, 提高优化速度。

1.2 虚拟变形方法构造脉冲响应

1.2.1 虚拟变形方法的基本思想

虚拟变形法(VDM)是一种结构快速重分析方法^[10]。在小变形假定前提下,结构参数的变化,如损伤、质量改变和材料非线性等,都可以利用虚拟变形或虚拟力模拟。

为使未损伤结构模型与损伤结构具有相同的响应,除了外荷载 $f(t)$,还须在未损伤模型对应的单元上施加额外的激励,将这个额外的激励定义为虚拟力,虚拟力作用在独立单元上产生的变形为虚拟变形(设 $\kappa_{ij}^0(t)$ 为第 i 个单元的第 j 个虚拟变形, $\kappa_{ij}(t)$ 为相应的单元实际变形)。如果第 i 个单元的刚度折减系数为损伤因子 β_i ,那么存在如式(8)所示比例关系^[11],这是虚拟变形方法的一个核心公式。有限元模型的单元变形或虚拟变形的数目和形式通过对它局部坐标系下的刚度矩阵的特征值分解可以确定^[11]。

$$\kappa_{ij}^0(t) = (1 - \beta_i) \kappa_{ij}(t) = \Delta\beta_i \kappa_{ij}(t) \quad (8)$$

VDM法也可以模拟质量的变化。设 m_l 为结构模型沿第 l 个自由度方向质量的变化,则质量的变化与施加在第 i 自由度上的虚拟力 $p_i^0(t)$ 间的关系式为:

$$p_i^0(t) = -m_l a_l(t) \quad (9)$$

式中: $a_l(t)$ 是结构第 l 个自由度加速度响应。

定义 $a_l^0(t) = p_i^0(t)/m_l^0$ 为虚拟加速度, $\Delta\alpha_l = -\alpha_l = -m_l/m_l^0$,则式(9)可以化为类似式(8)的表达式:

$$a_l^0(t) = \Delta\alpha_l a_l(t) \quad (10)$$

若同时考虑结构损伤和质量改变,基于VMD方法,损伤结构的响应可以表示为初始模型在外荷载 $f(t)$ 、虚拟变形 $\kappa_{ij}^0(t)$ 和虚拟力 $p_i^0(\tau)$ 作用下响应的叠加:

$$a_k(t) = a_k^L(t) + \sum_j \int_0^t B_{k,l}^{aa}(t-\tau) a_l^0(\tau) d\tau + \sum_{i,j} \int_0^t B_{k,ij}^{ak}(t-\tau) \kappa_{ij}^0(\tau) d\tau \quad (11)$$

$$\kappa_{nr}(t) = \kappa_{nr}^L(t) + \sum_j \int_0^t B_{ij,l}^{ka}(t-\tau) a_l^0(\tau) d\tau + \sum_{i,j} \int_0^t B_{nr,ij}^{kk}(t-\tau) \kappa_{ij}^0(\tau) d\tau \quad (12)$$

式中: $a_k^L(t)$ 、 $\kappa_{nr}^L(t)$ 分别是未损伤结构在相同外荷载作用下的第 k 个自由度方向的加速度和第 n 个单元的第 r 个单元变形; B 上标 κ 表示单元虚拟变形, a 表示虚拟加速度; $B_{c,d}^{e,b}(t)$ 为自由度 d 方向作用类型 b 的单位虚拟脉冲在自由度 c 方向上所产生的类型 e 的响应。

如果给定损伤参数 μ ,联立式(8)~式(12),就可以得到虚拟变形 $\kappa_{ij}^0(t)$ 和虚拟力 $p_i^0(\tau)$,进而得到 $a_k(t)$ 和 $\kappa_{nr}(t)$ 。联立之后的方程属于是第二类Volterra积分方程,存在唯一解。因为只有损伤单元上的虚拟变形和改变质量处的虚拟力非零,其余未发生改变的单元或质量对应项均为零,那么将零项都去掉,式(8)~

式(12)的维数可显著减小。将式(8)~式(12)联立整理并进行离散排列为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta\alpha a^L \\ \Delta\beta \kappa^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I - \Delta\alpha B^{aa} & -\Delta\alpha B^{ak} \\ -\Delta\beta B^{ka} & I - \Delta\beta B^{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^0 \\ \kappa^0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

因此,给定 μ ,解式(13)可以很快计算相应的虚拟加速度 a^0 和虚拟变形 κ^0 。为进一步提高计算效率,利用系数矩阵是由分块下三角阵组成的非奇异块矩阵的特点,把式(13)中方程和未知数重新排列成下三角块矩阵形式,从而通过块矩阵前置快速求解未知数^[12]。

1.2.2 构造脉冲响应

式(5)中系统脉冲响应 $H(\mu)$ 为由 $h_{wq}(t, \mu)$ 离散排列而成的分块矩阵。如果每给定一个损伤因子 μ ,就需重新建立有限元模型进行脉冲响应计算,显然计算量巨大。因此这里采用虚拟变形方法以快速计算脉冲响应 $h_{wq}(t, \mu)$ 。

根据2.1节所介绍的VDM方法,若给定 μ ,则结构在 q 方向作用单位脉冲所对应虚拟变形 $\kappa_{ij}^0(t)$ 和虚拟力 $p_i^0(\tau)$,可以由式(13)计算获得。从而损伤结构的脉冲响应 $h_{wq}(t)$ 可以表示为初始模型的脉冲响应 $h_{wq}^L(t)$ 与 $\kappa_{ij}^0(t)$ 及 $a_l^0(\tau)$ 作用下响应的叠加:

$$h_{wq}(t) = h_{wq}^L(t) + \sum_l \int_0^t B_{w,l}^{ha}(t-\tau) a_l^0(\tau) d\tau + \sum_{i,j} \int_0^t B_{w,ij}^{hk}(t-\tau) \kappa_{ij}^0(\tau) d\tau \quad (14)$$

式(14)的离散化矩阵形式为式(15), h_q 含有 q 方向作用单位脉冲产生的所有相关传感器位置的脉冲响应,将 h_q 按顺序排列即可得到脉冲响应矩阵 H 。

$$h_q = h_q^L + [B^{ha} \quad B^{hk}] \begin{bmatrix} a^0 \\ \kappa^0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式(13)、(15)中,块矩阵 $B^{(\cdot)(\cdot)}$ 由初始未损伤结构的模型计算得到,只需提前计算一次,与结构损伤变化无关。所以,在重构系统脉冲响应时,利用VDM方法可避免重新集装系统参数矩阵,省时省力,为下面荷载和损伤的共同识别提供了有利的条件。

1.3 荷载形函数方法

本节以单个荷载简单介绍荷载形函数方法。形函数方法的思想是把荷载时间历程比拟为“时间梁”的变形^[4]。如把一个荷载时间历程 F 划分为 g 段,每段 n 个时间步数,然后利用有限元中形函数的思想,将每段荷载由梁单元的结点竖向位移和转角位移表示,所以一共 $2g+2$ 个结点位移,即荷载 F 的时间历程可以表示为:

$$F = N\gamma \quad (16)$$

式中: F 是 $ng+1$ 维列向量; γ 为荷载形函数系数,为 $2g+2$ 维的列向量; N 为形函数矩阵,维数为 $(ng+1) \times (2g+2)$,其中第 i 个结点的第 j 个位移($j=1,2$)对应的形函数元素为矩阵 N 的第 $(2i-2+j)$ 个列向量 N_{2i-2+j} 。

根据式(16)、式(5)中荷载可用形函数表示,如式(17),从而实现将荷载的识别转化为求解形函数系数,未知数目由 $(ng+1)$ 个降为 $(2g+2)$ 个,可显著提高计算效率。

$$y^M = HN\gamma \quad (17)$$

1.4 插值计算结构响应及优化

对目标函数(7)的优化,其迭代收敛所需的时间主要体现在每次计算目标函数的时间以及迭代计算目标函数的次数。单次目标函数的计算效率已利用VDM方法和荷载形函数方法进行提高,下面通过二次多项式插值近似结构的响应以及推导对应目标函数的梯度,来进一步提高迭代的收敛速度。

第 i 个传感器在 t 时刻的结构响应 $y_i(\mu, t)$ 可近似表示为响应 $y_i(\mu^0, t)$ 和损伤增量 $\delta\mu^0$ 的表达式:

$$y_i(\mu, t) = y_i(\mu^0 + \delta\mu^0, t) \approx \tilde{y}_i(\mu^0 + \delta\mu^0, t) = y_i(\mu^0, t) + \sum_j a_{ij}(t)\delta\mu_j^0 + \sum_j b_{ij}(t)(\delta\mu_j^0)^2 \quad (18)$$

式中: $\delta\mu^0 = [\delta\mu_1^0, \dots, \delta\mu_{n_m+n_c}^0]$ 是损伤的增量, μ^0 为迭代损伤初始值。

t_k 时刻关于 $\delta\mu_j^0$ 的插值系数 $a_{ij}(t_k)$ 和 $b_{ij}(t_k)$ 可以由下式求解:

$$\begin{bmatrix} \delta v_{j1} & (\delta v_{j1})^2 \\ \delta v_{j2} & (\delta v_{j2})^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{ij}(t_k) \\ b_{ij}(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_i(\mu^0 + \delta v_{j1} \hat{e}_j, t_k) - y_i(\mu^0, t_k) \\ y_i(\mu^0 + \delta v_{j2} \hat{e}_j, t_k) - y_i(\mu^0, t_k) \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: \hat{e}_j 为第 j 个元素为1其余为0的单位向量, δv_{j1} 和 δv_{j2} 是插值步长,为给定已知值。为计算二次曲线插值系数 $a_{ij}(t)$ 和 $b_{ij}(t)$,每步优化需要预先计算插值点处结构的响应 $y_i(\mu^0 + \delta v_{j1} \hat{e}_j, t)$ 。 $y_i(\mu^0 + \delta v_{j2} \hat{e}_j, t)$ 和 $y_i(\mu^0, t)$ ($j=1, 2; i=1, 2, \dots, n_m+n_c$),所以共需计算 $1+2n_m+2n_c$ 次结构的响应。插值点响应的计算可根据给定的参数由式(6)识别出。把式(18)代入目标函数式(7)化为式(20),对应的梯度表达式为式(21):

$$\Delta_2(\mu^0 + \delta\mu^0) \approx \frac{1}{2} \sum_i \sum_k [y_i^M(t_k) - \tilde{y}_i(\mu^0 + \delta\mu^0, t_k)]^2 \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2(\mu^0 + \delta\mu^0)}{\partial \delta\mu_k} = & \sum_i \sum_k [\delta \tilde{y}_i(t_k) (-a_{ik}(t_k) - 2b_{ik}(t_k)\delta\mu_k^2)] \\ \delta \tilde{y}_i(t_k) = & y_i^M(t_k) - \tilde{y}_i(\mu^0 + \delta\mu^0, t_k) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

根据目标函数(20)和梯度(21),用Matlab的工具箱fminsearch函数进行优化识别损伤因子,记为 μ^1 。由于目标函数(20)是近似表达式,所以 μ^1 并不准确,需要进一步迭代,将 μ^1 代替 μ^0 ,并且缩小插值步长 δ

$\mu^1 = \delta\mu^0/2$ 继续优化,直到收敛,其流程图见图1。

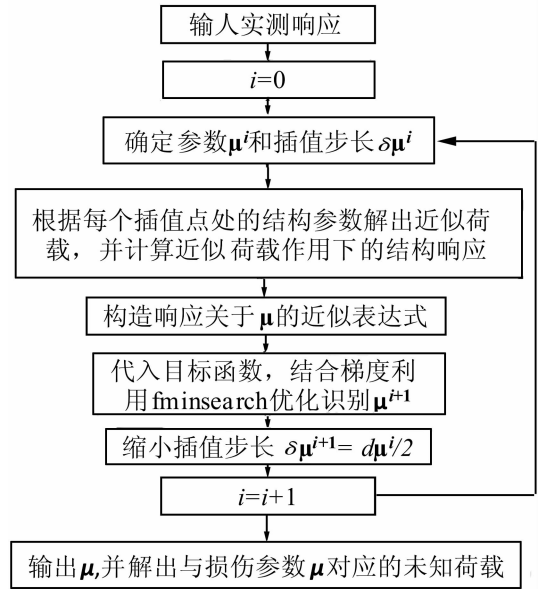


图1 计算流程图

Fig. 1 The flow chart of the general computational framework

2 数值算例

2.1 有限元模型

采用如图2所示的刚架模型验证提出的荷载和损伤共同识别方法。结构弹性模量 2.15×10^{11} Pa,密度为 7800 kg/m³,单位长度质量 15.3×10^3 kg/m。梁长 200 m,两个边跨各 50 m,其截面惯性矩为 0.8 m⁴。两柱高 20 m,截面惯性矩为 0.16 m⁴。结构采用瑞利阻尼,前2阶阻尼比为 0.01 和 0.015 。一个附加质量块 $m=61.2 \times 10^3$ kg,位于距离梁左端 110 m处。

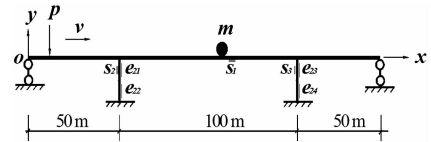


图2 刚架模型

Fig. 2 Rigid frame model

一个外部荷载以速度 40 m/s从梁左端移向右端,如图3。梁均匀划分为 20 单元,每个柱子分为 2 个单元。单元21、24刚度损伤,刚度折减系数考虑两种工况:① $\mu_{21}=0.4, \mu_{24}=0.7$;② $\mu_{21}=0.9, \mu_{24}=0.8$ 。在结构上布置3个传感器: S_1 距梁左端 116 m,在对应梁截面的底部。 S_2 和 S_3 分别布在左右柱子的两侧,距离梁的截面中和轴均为 6 m。测量时间为 2 s,采样频率为 50 Hz。在计算响应中加入5%的高斯随机噪声模拟传感器的实测结构响应。无损结构响应和损伤工况①下的结构响应(简称损伤结构①)分别如图4所示。

上述条件中假定已知结构的初始模型、荷载激励的移动位置以及图4中结构响应,需要识别的未知数有荷载时程(图3,实际值)、附加质量(1个)以及柱子单元刚度损伤(4个)。

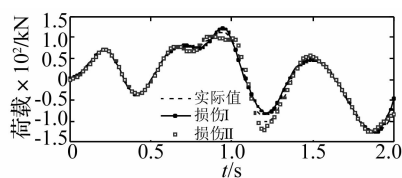


图 3 比较实际荷载和两种损伤工况识别的荷载

Fig. 3 Comparison of the actual and identified loads

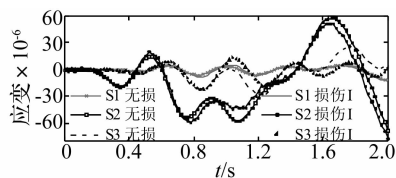


图 4 损伤结构 I 和无损结构的传感器实测响应

Fig. 4 Measured responses of the damaged(I) and intact system

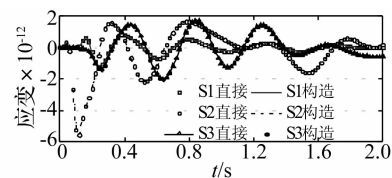


图 5 验证构造的系统脉冲响应函数

Fig. 5 Verification of the constructed system impulse responses

2.2 构造结构脉冲响应

为验证基于 VMD 方法快速构造结构系统脉冲响应的有效性,以损伤工况 I 为例,利用式 (13) 和式 (15) 计算损伤系统的脉冲响应 (图 5, Si 构造),即沿移动荷载的位置施加对应的单位脉冲激励,计算与之对应的结构响应,并与由损伤结构的有限元模型计算出的响应 (图 5, Si 直接) 作比较。图 5 为在距梁左端 0.8 m 处施加单位脉冲对应的 3 个传感器的脉冲响应。两种方法计算的响应的相对误差为 1.91×10^{-10} ,表明基于 VDM 方法能够准确地构造系统的脉冲响应。这样避免了优化过程中反复集装给定损伤因子下的系统参数矩阵,提高了计算效率。

2.3 荷载和损伤识别

分别讨论 5% 高斯随机噪声下两种损伤识别工况。工况 I、II 下估计的附加质量的初始值分别为 47.94×10^3 kg 和 43.47×10^3 kg。因为刚度损伤因子范围一般在 $(0, 1]$ 之间,第一次迭代中设其两个插值步长为 -0.45 和 -0.9 ;而质量修正因子值域范围较广,设其两个插值步长为 4 和 8。余下迭代中迭代步长逐次减半。

荷载与损伤识别的优化收敛很快,只进行了 6 次迭代。工况 I 下各优化变量的迭代过程如图 5,表明采用二次插值方法可以大大加快收敛速度。表 1 为损伤识别结果,在 5% 的噪声影响下,两种损伤工况的识别误差均小于 6%。从表中可以看出,损伤识别值与实际值很接近,损伤大小和损伤位置均能被准确地识别。为了减少计算量,改善解的奇异性,采用荷载形函数法识别荷载,识别结果见图 3,两种工况下的识别精度均不错。

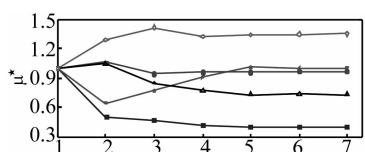


图 6 工况 I 下的损伤因子优化过程: $\mu_{21}^* \sim \mu_{24}^*$

是单元刚度损伤因子, μ_1^* 是附加质量修正因子

Fig. 6 The optimization variables in case I:

$\mu_{21}^* \sim \mu_{24}^*$ are the stiffness-related parameters,

while μ_1^* is the normalized mass-related parameters

表 1 识别的损伤结果

Tab. 1 Identified damage extents

	实际值	工况 I		工况 II	
		识别值	误差/%	识别值	误差/%
μ_{21}	0.40	0.403	0.29	0.896	0.41
μ_{22}	1.00	1.002	0.15	0.954	4.63
μ_{23}	1.00	0.964	3.57	1.045	4.49
μ_{24}	0.70	0.730	2.99	0.766	3.42
$m \times 10^3/\text{kg}$	61.2	64.71	5.74	64.37	5.18

注:表中附加质量的识别误差为其相对误差,刚度损伤因子的识别精度按绝对误差评估。

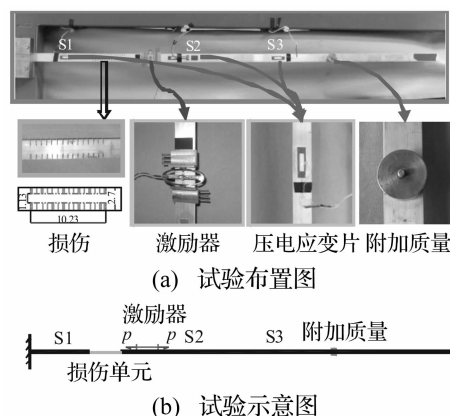
3 试验验证

利用一个悬臂铝梁的试验来验证所提出方法的有效性。

3.1 试验装置

试验装置如图 7 所示,试件为一个悬臂铝梁,长 136.15 cm,矩形截面 $2.7 \text{ cm} \times 0.31 \text{ cm}$ 。弹性模量 70 GPa,密度为 2700 kg/m^3 。在靠近试件固定端沿梁长 10.23 cm 做均匀等深的切口来模拟损伤 (图 7),使损伤部分的刚度减少到原刚度的 42%,即刚度损伤因子为 0.42,而保持试件质量基本不变。在靠近试件自由端固定一个 60 g 的质量块,来改变结构的质量,以模拟与质量有关的损伤。

梁上固定压电激励器 APA (Amplified Piezo Actuator) (见图 8),通过施加位移对试件施加一个纯弯矩激



(b) 试验示意图

图 7 试验装置

Fig. 7 Experimental setup

励,激励形式如图9所示。在梁上粘贴三个PVDF压电应变片(记为传感器S1~S3)测量结构动态响应(如图9)。为满足测得的样本数据含有必需的结构动态信息,采样频率为2 500 Hz,测量时间为0.24 s。

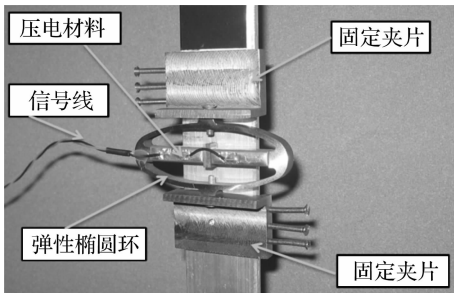


图8 压电激励器 APA

Fig. 8 Amplified piezo actuator

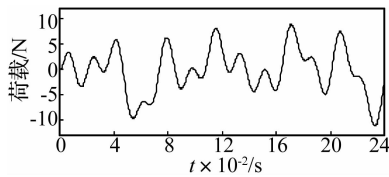


图9 实测荷载

Fig. 9 Measured excitation

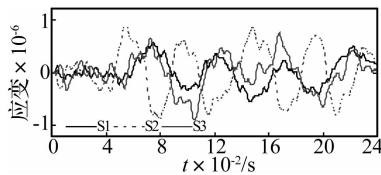


图10 实测结构响应

Fig. 10 Measured responses

3.2 荷载与损伤识别

利用梁的理论有限元模型。假定结构存在两个未知单元刚度损伤:设传感器S1和真实损伤单元之间的单元发生损伤,记 μ_1 ;真实单元损伤,记 μ_2 。因此试验中除需要识别外部荷载外,还需要识别三个损伤(两个单元刚度损伤和一个附加质量)。

假定附加质量初始值为1 kg。三个损伤因子为优化变量,优化初始值为[1, 1, 0],即从未损伤结构模型开始优化。由二次曲线逼近结构测点响应和损伤因子间的关系。一共进行了图1中的8次迭代。在初始模型的基础上,第一次迭代中设与刚度有关的损伤因子的两个插值步长为-0.45和-0.9,与质量有关的设为0.45和0.9。其余迭代中插值步长逐次减半。

由目标函数式(20)识别的最终损伤结果见表2。识别的附加质量按其相对误差评估,而与刚度有关的损伤因子的识别精度按绝对误差评估。从表2可以看出,单元刚度损伤大小可以精确地识别,根据识别的损伤大小也可以识别损伤位置。另外,结构质量的变化,

即附加质量大小,也能较好地识别。每次迭代中的最优变量值见图11,表明少数的几次迭代就可以得到满意的识别精度。根据识别的损伤因子获得的外部荷载见图12,结果与实际荷载接近。在计算荷载时,鉴于采样时间步数多,有600步,因此采用荷载形函数方法在移动时间窗^[9]内进行荷载识别,采用9个窗,每个窗120步,相邻窗重叠60步,每个窗采用14个形函数。

表2 识别的损伤结果

Tab. 2 Identified damage extents

	实际值	识别值	误差/%
μ_1	1.00	0.972	2.83
μ_2	0.42	0.416	0.43
$m \times 10^3/\text{kg}$	0.06	0.058	2.67

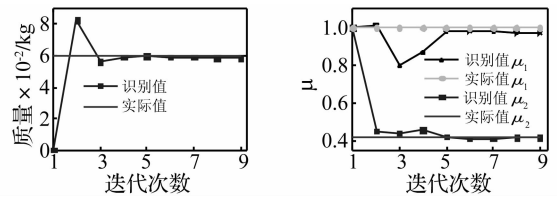


图11 每步迭代中的最优变量值

Fig. 11 The optimal variables in successive optimization steps

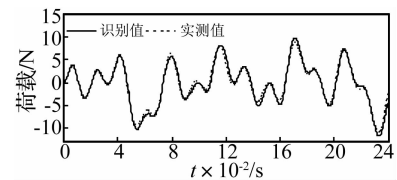


图12 荷载识别结果

Fig. 12 The identified excitations

4 结论

本文提出一种仅以损伤因子为变量的荷载和损伤同步识别的快速方法,并通过一个三跨框架梁的数值模拟和一个悬臂梁试验验证了该方法,得到以下主要结论:

(1) 目标函数中仅以损伤因子为优化变量,将未知激励通过荷载识别方法转化为损伤因子的函数,大大减少了优化参数的数目,降低了优化的难度,而且使所需传感器的数目只需大于未知激励数目。

(2) 用虚拟变形模拟结构损伤,可快速准确地构造给定损伤因子下的系统脉冲响应,同时采用荷载形函数方法识别荷载,两者保证了目标函数的计算效率和精度。

(3) 通过二次多项式插值近似结构响应,不但简化了目标函数的表达式,提高了响应的计算效率,而且实现对其进行灵敏度计算,进一步提高优化搜索的速度。

(下转第49页)

