

# 结构损伤识别的广义均布载荷面法

赵建刚, 张玉祥, 陈家照, 姜 颀

(火箭军工程大学导弹工程学院, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 针对多数情况下受损结构的损伤前参数无法获得, 且实际中结构高阶模态较难获取的问题, 从理论上推导并提出广义均布载荷面的损伤识别方法。分别构建广义均布载荷面曲率和基于最小二乘多项式拟合广义均布载荷面曲率的损伤指标。以两端固支的 T 型简支梁为例, 数值分析和对比柔度曲率、均布载荷面曲率、广义均布载荷面曲率和基于最小二乘多项式拟合广义均布载荷面曲率四种指标的损伤识别效果, 结果表明: 上述四种指标均只需低阶模态参数就可识别出损伤, 但后三种指标的识别效果优于第一种; 广义均布载荷面曲率指标比均布载荷面曲率指标截断误差小, 并具有一定的抗噪性; 只有基于最小二乘多项式拟合广义均布载荷面曲率指标只需结构损伤后的参数, 更具有实际应用价值。

**关键词:** 损伤识别; 广义均布载荷面; 最小二乘多项式; 截断误差; 抗噪性

**中图分类号:** O327; V214.3<sup>+</sup>7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)05-0987-08

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.05.012

## 引 言

近年来, 结构损伤识别作为结构健康监测的关键技术, 逐渐成为人们研究的热点。早期基于动力特性结构的损伤识别, 主要是根据结构损伤导致结构刚度变化, 进而引起结构模态参数(模态频率和模态振型)的改变这一特性来识别损伤<sup>[1]</sup>。研究发现, 在实际环境中可以从结构的振动信号中以较高精度提取出模态振型和频率<sup>[2]</sup>。然而单一的频率或是振型对损伤识别的敏感程度并不是很高, 于是基于结构固有频率或固有频率和振型组合的指标被提出并应用于实际的损伤识别中。其中, 研究较多的有模态应变能<sup>[3-4]</sup>、模态柔度差<sup>[5]</sup>、模态柔度曲率<sup>[6-7]</sup>、广义柔度法<sup>[8-9]</sup>、均布载荷面法等。Sung 等<sup>[10]</sup>基于欧拉-伯努利梁理论首次提出使用均布载荷面的损伤识别方法, 对一简支梁进行了识别。Jung 等<sup>[11]</sup>基于均布载荷面提出归一化的均布载荷面曲率损伤识别指标, 并分别采用该方法与均布载荷面法、柔度矩阵法对简支梁进行损伤识别, 数值对比分析发现所提指标需要结构损伤后较高阶的模态参数, 并对损伤更敏感, 识别效果更好。余建新等<sup>[12]</sup>针对飞艇骨架结构中损伤引起的模态跃迁现象导致无法通过匹配损伤前后动态特性参数变化来识别损伤的难题, 给出了模态振型曲率法、均布载荷面曲率法和虚拟轴向

应变法等三种只基于损伤后振动响应信息进行损伤识别的动态方法。结果表明新损伤识别方法对损伤敏感, 在环境噪声工况下能准确识别和定位单个和多个损伤杆件。上述的研究方法均能识别出损伤, 同时识别出结构损伤的位置和程度。但这些方法一般不是需要结构损伤前的信息, 就是需获得结构的高阶模态, 或是两者兼有, 这样较难在实际中得到应用。

结合以上分析, 本文提出广义均布载荷面法, 建立基于最小二乘拟合多项式的广义均布载荷面曲率(Least squares polynomial fitting General uniform load surface Curvature, LGC)损伤识别指标, 该指标只需损伤结构的低阶模态参数就可以得到良好的损伤识别效果。文中以一端固支的 T 型简支梁为例, 对比分析模态柔度曲率(Modal Flexibility Curvature, MFC)、均布载荷面曲率(Uniform Load Surface Curvature, ULSC)、广义均布载荷面曲率(General Uniform Load Surface Curvature, GULSC)和基于最小二乘拟合的广义均布载荷面曲率四种指标的损伤识别效果。结果表明, 四种指标均可以在获得结构低阶模态参数情况下就能识别出单损伤和多损伤, 均布载荷面曲率要比模态柔度曲率识别效果好, 广义均布载荷面曲率比均布载荷面曲率的截断误差更小, 而只有基于最小二乘拟合的广义均布载荷面曲率法不需要结构损伤前的信息, 所以其更具有优

越性和实际应用价值。

## 1 理论基础

### 1.1 基于模态柔度曲率(MFC)的损伤指标

根据无阻尼自由振动的结构动力学方程,将模态振型针对质量矩阵做归一化处理,可得到其柔度矩阵表达式如下<sup>[13]</sup>

$$F = \Phi \Lambda^{-1} \Phi^T = \sum_{r=1}^m \frac{1}{\omega_r^2} \phi_r \phi_r^T \quad (1)$$

式中  $\Phi$  为结构振型矩阵,  $\Lambda$  为结构固有频率平方的对角矩阵,  $m$  为模态阶数,  $\omega_r$  为第  $r$  阶的固有频率,  $\phi_r = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]$  为第  $r$  阶对质量矩阵做归一化后的模态振型。根据中心差分的思想,通过模态柔度矩阵  $F$  得到结构损伤前后模态柔度曲率矩阵  $FC^u$  和  $FC^d$ , 其矩阵中的元素计算如下:

$$FC_j^u(i) = \frac{F_j^u(i+1) + F_j^u(i-1) - 2F_j^u(i)}{l_i^2} \quad (2)$$

$$FC_j^d(i) = \frac{F_j^d(i+1) + F_j^d(i-1) - 2F_j^d(i)}{l_i^2} \quad (3)$$

式中  $F_j^u(i)$  和  $F_j^d(i)$  分别为结构损伤前后柔度矩阵的第  $j$  列第  $i$  行元素, 进行处理后得损伤指标

$$MFC = \left| \frac{FC^d - FC^u}{FC^u} \right| \quad (4)$$

### 1.2 基于均布载荷面曲率(ULSC)的损伤指标

根据有限元分析可知,柔度矩阵  $F$  可表示为:

$$F = \begin{bmatrix} f_{1,1} & \cdots & f_{1,j} & \cdots & f_{1,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ f_{i,1} & \cdots & f_{i,j} & \cdots & f_{i,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ f_{n,1} & \cdots & f_{n,j} & \cdots & f_{n,n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[f_{i,j}] = \sum_{r=1}^m \frac{\varphi_r(i) \varphi_r(j)}{\omega_r^2} \quad (6)$$

式中  $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$  为结构上的节点编号,  $[f_{i,j}]$  的物理意义为结构上  $j$  点在单位载荷作用下  $i$  点产生的挠度, 即柔度在点  $(i, j)$  的大小。

根据文献[14]可知,均布载荷面为结构在单位载荷作用下所产生的挠度变形。对于线性系统,结构在单位载荷作用下,在节点  $i$  处产生挠度为

$$u(i) = \sum_{j=1}^n f_{i,j} = \sum_{r=1}^m \frac{\varphi_r(i) \sum_{j=1}^n \varphi_r(j)}{\omega_r^2} \quad (7)$$

所以,整体结构的均布载荷面定义为

$$ULS = \{u(i)\} = F \cdot L \quad (8)$$

式中  $L = \{1, \dots, 1\}_{1 \times n}^T$  为作用在结构上的单位载荷向量。通过中心差分法得到结构损伤前后的均布

载荷面曲率  $UC^u$  和  $UC^d$ , 进一步处理得到损伤指标

$$ULSC = \left| \frac{UC^d - UC^u}{UC^u} \right| \quad (9)$$

### 1.3 基于广义均布载荷面曲率(GULSC)的损伤指标

根据文献[8],广义柔度矩阵的表达式如下

$$F^g = \sum_{r=1}^m \frac{\phi_r(i) \phi_r^T(j)}{\omega_r^4} \quad (10)$$

根据以上理论和分析,定义广义均布载荷面为:

$$U^g = \{u^g(i)\} = F^g \cdot L \quad (11)$$

$$u^g(i) = \sum_{r=1}^m \frac{\varphi_r(i) \sum_{j=1}^n \varphi_r(j)}{\omega_r^4} \quad (12)$$

对比式(6),(7)和(8)发现,均布载荷面是由柔度矩阵衍生而来,柔度矩阵中的元素表示结构上某一节点上受到单位载荷作用时在另一节点上产生的挠度;而均布载荷面中的元素表示整体结构受到单位载荷作用时,在某一点处产生的挠度总和。广义均布载荷面与均布载荷面表达形式相似,区别在于均布载荷面与结构固有频率的平方成反比,而广义均布载荷面与结构固有频率的四次方成反比。这说明广义均布载荷面的损伤识别指标更加收敛于低阶模态,高阶模态对广义均布载荷面的计算精度影响更小,更适用在实际中只能获得结构低阶模态参数的情况。

当结构出现损伤时,损伤部位的特性将会发生较大变化,而对该变化反应最敏感的就是结构的曲率,本文则是通过曲率变化来判断损伤。由有限元和结构动力学知识可知,若结构有损伤,则损伤单元对应节点处的振型会有较大变化,进而使均布载荷面产生变化,因此可以用该节点处广义均布载荷面的曲率变化来识别损伤。根据中心差分法,结构上各节点处的广义均布载荷面曲率为

$$uc^g(i) = \frac{u^g(i+1) - 2u^g(i) + u^g(i-1)}{l^2} \quad (13)$$

式中  $l$  为结构上两节点之间的距离。于是得到结构的广义均布载荷面曲率损伤识别指标

$$GULSC = \left| \frac{UC_d^g - UC_u^g}{UC_u^g} \right| \quad (14)$$

式中  $UC_u^g$  为完好结构的广义均布载荷面曲率,  $UC_d^g$  为损伤结构的广义均布载荷面曲率。

### 1.4 基于最小二乘多项式拟合广义均布载荷面曲率(LGC)的损伤识别指标

根据 1.3 节广义均布载荷面曲率法识别结构损伤的原理, GULSC 曲线在结构的损伤位置处会产生突变,而完好结构的 GULSC 曲线在该处是光滑的,没有突变。因此,可以利用结构的非损伤位置点,通过最小二乘多项式来拟合一条光滑的曲线,用

来表征完好结构的 GULSC 曲线。

假设  $n$  次多项式为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (15)$$

误差定义为

$$e_i = Y_i - y_i = Y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_nx_i^n \quad (16)$$

式中  $Y_i$  为对应于  $x_i$  的观测或是试验数据;  $(x_i, y_i)$  为已知数据点坐标  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  为多项式各项系数。则各项误差的平方和可以表示为

$$Q = \sum_{i=1}^N e_i^2 = \sum_{i=1}^N (Y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_nx_i^n)^2 \quad (17)$$

式中  $N$  为拟合数据对的个数。所以,要得到计算误差平方和的最小值,则归结为求解式(17)的极值问题。根据求极值的必要条件得到以下方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a_0} = \sum_{i=1}^N 2(Y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_nx_i^n)(-1) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_1} = \sum_{i=1}^N 2(Y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_nx_i^n)(-x_i) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_2} = \sum_{i=1}^N 2(Y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_nx_i^n)(-x_i^2) = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial Q}{\partial a_n} = \sum_{i=1}^N 2(Y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_nx_i^n)(-x_i^n) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

整理可得以下矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^N x_i^n \\ \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^N x_i^{n+1} \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^4 & \dots & \sum_{i=1}^N x_i^{n+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^N x_i^n & \sum_{i=1}^N x_i^{n+1} & \sum_{i=1}^N x_i^{n+2} & \dots & \sum_{i=1}^N x_i^{2n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N Y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i Y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 Y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N x_i^n Y_i \end{bmatrix} \quad (19)$$

通过计算方程组得到拟合的完好结构广义均布

载荷面曲率曲线  $GU'_c$ , 与损伤结构的广义均布载荷面曲率曲线  $GU'_{dc}$ , 于是得到新的损伤指标

$$LGC = \left| \frac{GU'_{dc} - GU'_c}{GU'_c} \right| \quad (20)$$

## 2 算例分析

本文以两端固支的 T 型简支梁为研究对象, 梁截面参数为  $h = 0.12 \text{ m}$ ,  $b = 0.1 \text{ m}$ ,  $t_w = 0.02 \text{ m}$ ,  $t_f = 0.02 \text{ m}$ ,  $l = 0.08 \text{ m}$ ; 长度为  $2 \text{ m}$ , 划分为等长的 20 个单元, 其有限元模型如图 1 所示。图中圆圈中的数字代表单元编号, 下排数字为节点编号。材料为普通钢, 弹性模量  $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$ , 密度为  $7850 \text{ kg/m}^3$ , 泊松比为 0.3。结构损伤以单元刚度的降低来模拟。通过 ABAQUS 有限元方法计算结构在无损伤和各种损伤情况下的前三阶模态参数。

### 2.1 最小二乘多项式拟合曲线的选择

考虑梁结构中单元 8 损伤 50% 情况下, 得到单一损伤结构的 GULSC 曲线, 采取最小二乘多项式来拟合该曲线上未损伤单元的节点数据对, 拟合次数依次为 2 次、3 次和 4 次, 结果如图 2(a) 所示。通过拟合发现, 当拟合次数为 4 时, 拟合曲线通过除损伤单元的节点(节点 8 和节点 9)外的其他所有节点, 因此选 4 作为最小二乘多项式的拟合次数。

为了验证所选拟合次数的合理性, 考虑单元 8 和单元 16 均损伤 50% 情况下最小二乘多项式曲线的拟合情况, 如图 2(b) 所示; 发现 4 次多项式依旧能够通过很好通过除损伤单元节点(节点 8 和节点 9, 节点 16 和节点 17)外的其他节点, 说明所选最小二乘 4 次多项式曲线是正确的。

### 2.2 损伤识别

#### 2.2.1 单损伤识别

考虑 T 型简支梁中单元 8 分别在 10%、20% 和 30% 不同的损伤程度下, 对比分析 MFC, ULSC, GULSC 和 LGC 四种指标的损伤识别情况, 如图 3 所示。

图 3 中(a), (b), (c)和(d)分别是单元 8 损伤的 MFC, ULSC, GULSC 和 LGC 四种损伤指标曲线。从图 3 看出: 四种损伤指标都可以准确识别出单损伤位置; 随着结构损伤程度增大, 损伤指标值也增大, 都可以相对地反映出损伤程度大小。

对比图 3(a)和(b)可以看出: MFC 曲线在损伤单元周边存在小的峰值, 这样容易引起对损伤位置的误判; 而 ULSC 曲线只在损伤位置存在峰值, 其他

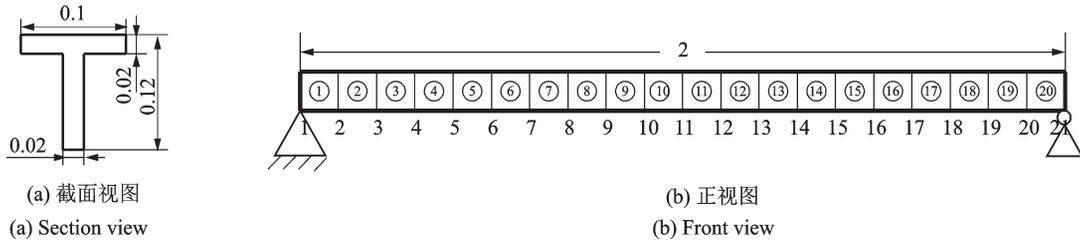


图1 T型简支梁有限元模型示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of the finite element model of T-type simply supported beam (Unit: m)

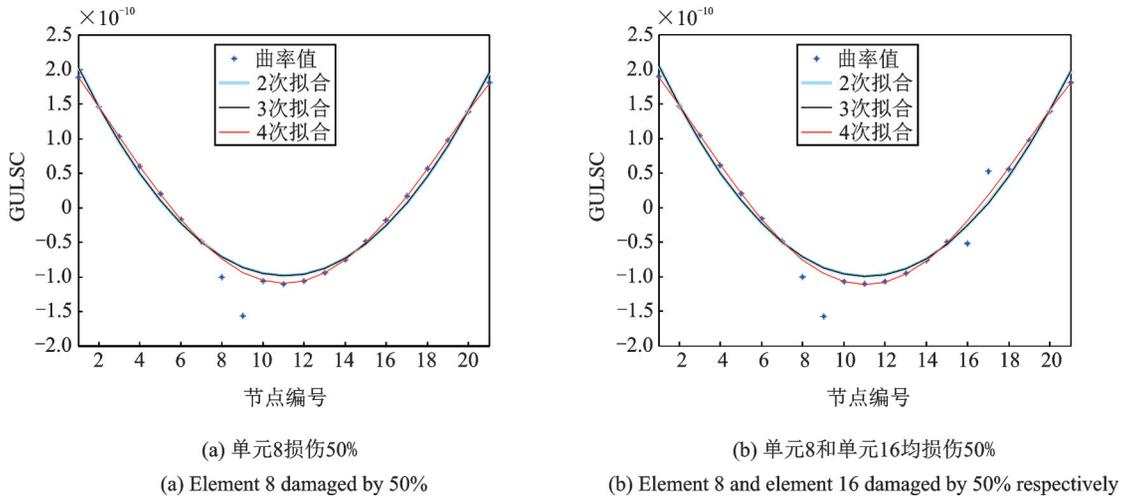


图2 广义均布载荷面曲率多项式曲线拟合图

Fig. 2 The curves of GULSC based on least squares polynomial fitting

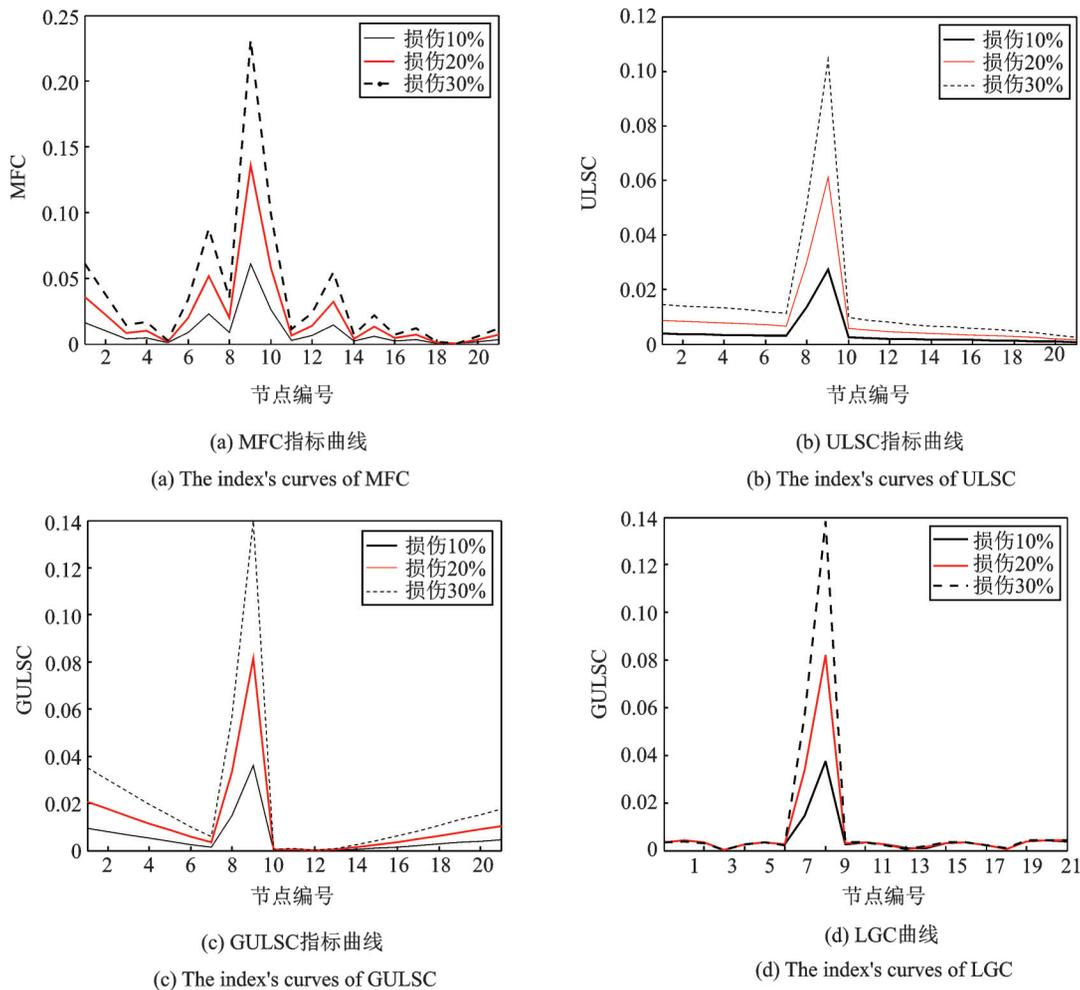


图3 单元8损伤指标曲线图

Fig. 3 The damaged index's curves of element 8

周边曲线较为平坦,很容易看出损伤位置;所以对于损伤位置的判断,均布载荷面曲率法要优于模态柔度曲率法。在同一损伤程度下,MFC曲线峰值比ULSC曲线峰值更接近真实值,但两指标值均不能代表损伤的数值大小。

对比图 3(c)和(d)可以看出:LGC曲线要优于GULSC曲线对单损伤的识别,主要是因为LGC曲线在未损伤位置指标值均接近于0,而在损伤位置指标值突出明显;且基于最小二乘的广义均布载荷面曲率法对结构损伤识别不需要完好结构的模态参

数,只要损伤结构的参数就可识别出损伤。在同一损伤程度下,LGC曲线峰值与GULSC曲线峰值相同,且以上两损伤指标值均不能代表结构实际损伤的数值大小。

对比图 3(b)和(c)可以发现,GULSC曲线对损伤程度的反映要比ULSC曲线更接近真实值。

### 2.2.2 多损伤识别

多损伤状况以单元 8 和单元 16 各损伤 10% 或 30% 来模拟,对比分析 MFC, ULSC, GULSC 和 LGC 四种指标的损伤识别,如图 4 所示。

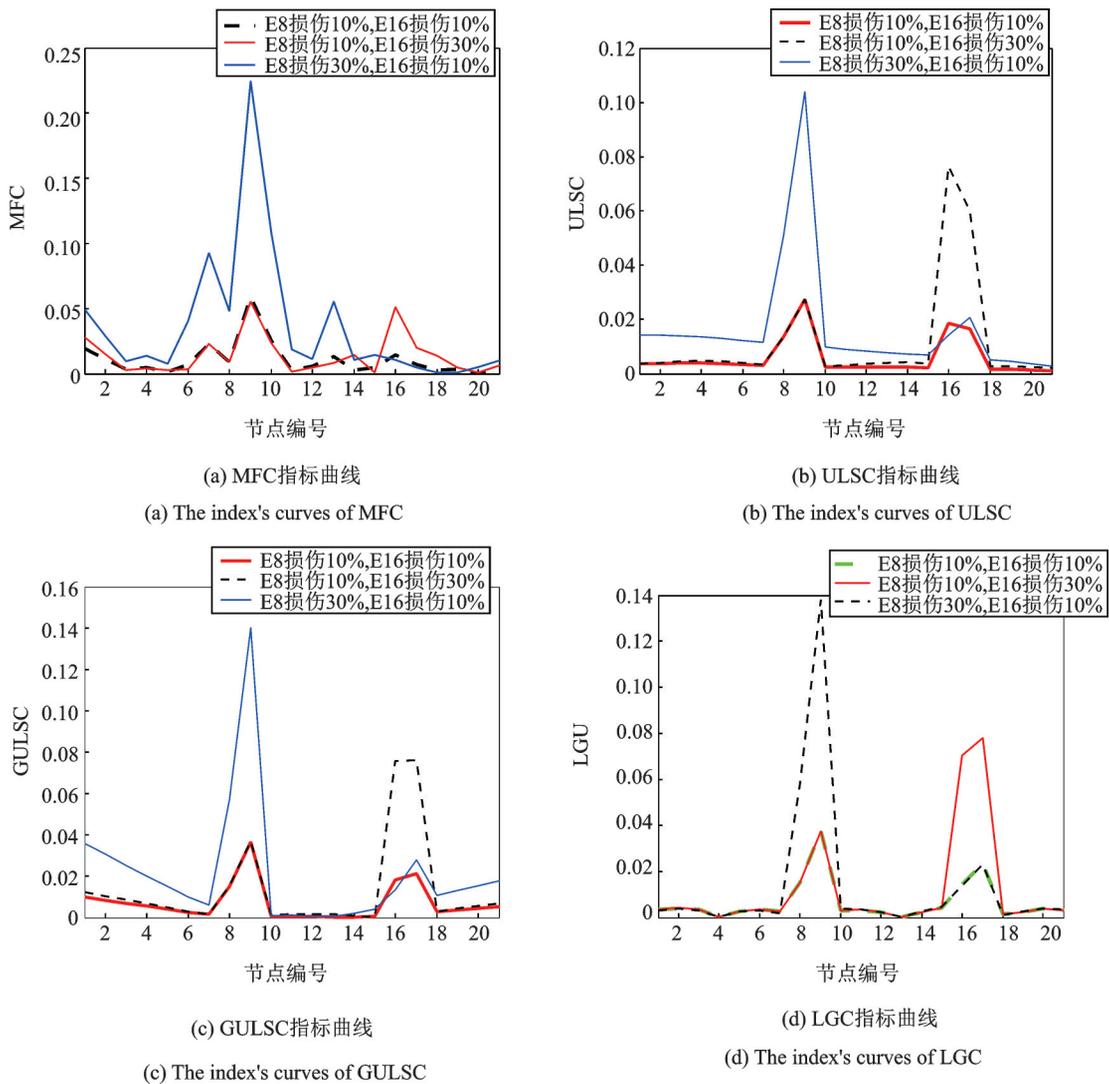


图 4 单元 8 和单元 16 同时损伤指标曲线图

Fig. 4 The index's curves of element 8 and element 16 simultaneously damage

图 4 中(a),(b),(c)和(d)分别是单元 8 和单元 16 损伤的 MFC, ULSC, GULSC 和 LGC 四种损伤指标曲线。从图 4(a)可以看出:模态柔度曲率法只在单元 8 损伤 10%,单元 16 损伤 30%时,能够识别出多损伤;而在单元 8 与单元 16 同时损伤 30%,和单元 8 损伤 30%同时单元 16 损伤 10%两种工况下,模态柔度曲率法只能得到其中一个损伤的位置,并不能识别出多损伤。从图 4(b),(c)和(d)可以看

出,无论单元 8 和单元 16 在何种工况下,ULSC, GULSC 和 LGC 三种指标均能准确识别出多损伤位置,并且能够相对给出损伤程度的大小。对比上图发现,图 4(d)的多损伤位置最明显,即最小二乘拟合广义均布载荷面曲率法对多损伤的识别效果最好。

分别对比图 3(a)和(b),图 4(a)和(b),且根据以上理论和数值分析可得:均布载荷面法是在柔度

矩阵法概念的基础上衍生而来,从物理意义上讲柔度法是均布荷载面法的特例;对于损伤的识别效果,无论单损伤还是多损伤,均布荷载面法的识别效果绝对好于柔度矩阵法。

### 2.3 截断误差分析

由于广义均布荷载面的表达式与均布荷载面的表达式相似,且广义均布荷载面与均布荷载面具有相同的物理意义。为了更好地对比广义均布荷载面法与均布荷载面法的损伤识别效果,下面讨论两种指标各自的截断误差。由公式(7)计算得到的均布荷载面与根据实际结构施加静荷载时获得的均布荷载面之间的差距最小时所需要的模态阶数和频率带宽的研究,称为截断误差分析<sup>[15]</sup>。同理由公式(12),可进行广义均布荷载面的截断误差分析。根据定义,损伤指标的截断误差可表示为

$$e = T - t \quad (21)$$

式中  $T$  为实际环境下得到的损伤指标真实值,  $t$  为用公式计算得到的损伤指标值。

以单元8损伤30%的工况为研究对象,进行ULSC和GULSC的截断误差分析,如图5和6所示。

图5是结构1阶模态损伤指标曲线,其中红色实线代表GULSC指标采用1阶模态参数识别的结构损伤,黑色虚线代表ULSC指标采用1阶模态参数识别的结构损伤。可以看到GULSC的损伤指标值在0.14附近,而ULSC的损伤指标值大约在0.12。为判断以上哪种方法的结果更靠近实际的真实值,数值分析了前100阶模态的损伤指标值,并以此来代表实际环境下真实的损伤指标值  $T$ 。

进一步比较两种方法优劣,分别采用广义均布荷载面法和均布荷载面法计算了结构前1阶到前10阶的损伤指标值,得到截断误差曲线如图6所示。

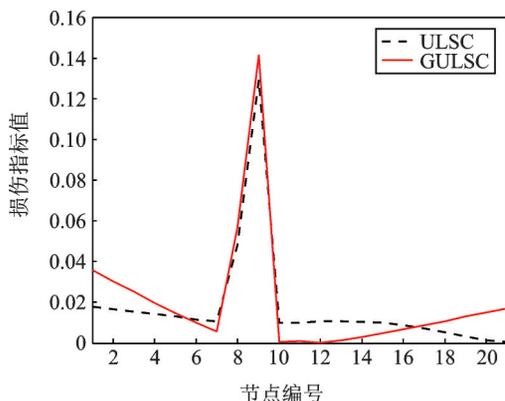


图5 结构1阶模态损伤指标曲线

Fig. 5 The first order modal damage index's curves of the structure

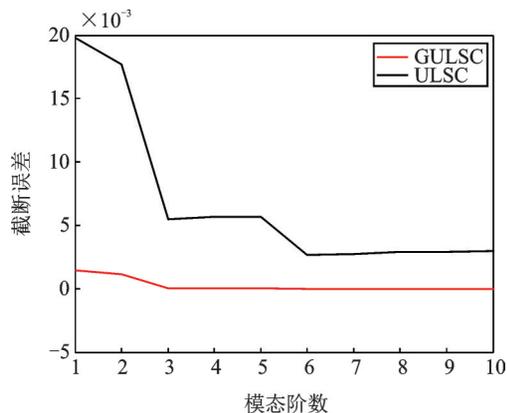


图6 截断误差曲线

Fig. 6 The curves truncation error

从图中可以明显看出,任何阶数下GULSC指标的截断误差都要小于ULSC指标的截断误差;且GULSC指标的截断误差曲线在前三阶时数值基本为0,说明GULSC指标相比ULSC指标更收敛于低阶,广义均布荷载面曲率法的损伤计算结果比均布荷载面法的损伤计算结果更靠近实际的真实值。

### 2.4 抗噪性能分析

针对广义均布荷载面曲率损伤指标的抗噪性能,对指标输入参数分别加入了0.5%,1%和1.5%的白噪声,来模拟环境噪声对GULSC损伤指标识别效果的影响,其数值分析结果如图7和8所示。

图7是当简支梁结构上单元8损伤30%时,GULSC损伤指标在无环境噪声和环境噪声分别为0.5%,1.0%,1.5%情况下的识别效果曲线。从图中可以看出,GULSC指标进行结构单损伤识别时,对环境噪声具有较好的抗噪性能,在噪声水平1.5%情况下依然能很好地识别出损伤。

图8是当简支梁结构上单元8和单元16同时损伤10%时,GULSC损伤指标在无环境噪声和环境噪声分别为0.5%,1.0%,1.5%情况下的识别效果

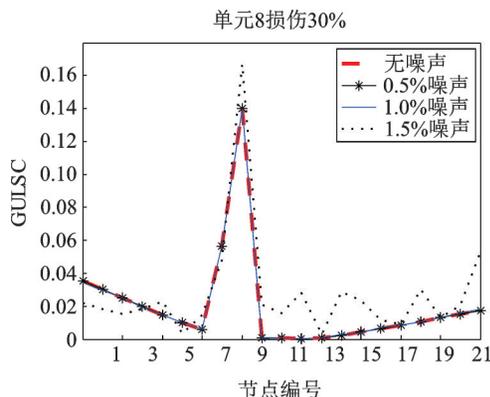


图7 不同噪声水平下GULSC对单损伤识别效果曲线

Fig. 7 GULSC recognition effect curves for single damage under different noise levels

曲线。从图中可以看出,GULSC指标进行结构多

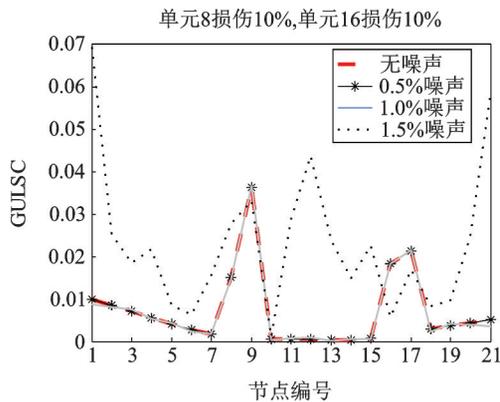


图8 不同噪声水平下GULSC对多损伤识别效果曲线  
Fig. 8 GULSC recognition effect curves for multiple damage under different noise levels

损伤识别时,对环境噪声具有较好的抗噪性能。当噪声水平达到1.5%时,损伤识别曲线波动较多,该指标此时识别多损伤存在一定的困难。

通过以上分析可知:无论单损伤还是多损伤,GULSC指标都可以在环境噪声水平1%以内很好地识别出损伤,具有一定的抗噪性能;其有噪声影响的损伤识别效果曲线与无噪声影响的损伤识别效果曲线基本重合,说明该指标鲁棒性较好。

### 3 结论

本文根据实际中结构的高阶模态参数较难获得,选用了只需低阶模态参数的模态柔度法和由其衍生的均布载荷面法进行损伤识别,并在均布载荷面法的基础上推导并提出了广义均布载荷面方法。针对结构出现损伤后,结构损伤前的参数无法得到问题,建立了基于最小二乘多项式拟合广义均布载荷面曲率的指标用于损伤识别。应用以上四种方法的指标对一T型筒支梁进行了数值对比分析,得到了以下结论:

(1)四种损伤指标均只需结构的低阶模态参数就能实现对结构损伤的识别,不但可以识别出损伤位置,而且可以给出损伤程度的大小。

(2)对比模态柔度法和均布载荷面法发现:MFC指标可以实现单损伤识别,但对于多损伤会出现误判;而ULSC指标无论单损伤还是多损伤均能很好地识别出来。因此,ULSC指标的损伤识别效果优于MFC指标。

(3)通过误差对比分析发现,广义均布载荷面的截断误差远小于均布载荷面,GULSC的指标优于ULSC指标。且GULSC的截断误差在前三阶模态时就基本接近于0,损伤识别的指标值更靠近真

实值。

(4)通过对GULSC损伤指标的抗噪性能分析发现,当环境噪声水平在1%以内,广义均布载荷面的损伤识别方法具有较好的鲁棒性。

(5)建立的LGC指标可以不需要结构损伤前的模态参数,且和其他三种指标对比发现,LGC指标损伤识别效果更明显,更具有实际应用价值。

### 参考文献:

- [1] Doebbling S W. Damage identification and health monitoring of mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review [R]. Los Alamos National Report LA-13070-MS, 1996.
- [2] Peeters B, Roeck G D. Preference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13 (6):855-875.
- [3] Hu Huiwei, Wu Chengbo, Lu Weijun. Damage detection of circular hollow cylinder using modal strain energy and scanning damage index methods [J]. Computers and Structures, 2011, 89(1):149-160.
- [4] 张效忠,姚文娟. 基于敏感模态单元应变能法结构损伤识别 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 3014-3023.  
Zhang Xiaozhong, Yao Wenjuan. Structural damage identification based on strain energy method of sensitive modal element [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2013, 44(7):3014-3023.
- [5] Pandey A K, Biswas M. Damage detection in structures using changes in flexibility [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(1):3-17.
- [6] Lu Q, Ren G, Zhao Y. Multiple damage location with flexibility curvature and relative frequency change for beam structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 253(5):1101-1114.
- [7] 徐宏文,李 宁,谢永健. 基于模态曲率曲线拟合的板结构损伤识别研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2018, 40 (4):16-20.  
Xu Hongwen, Li Ning, Xie Yongjian. Damage identification of plate structure based on modal curvature curve fitting [J]. Seismic Engineering and Reinforcement, 2018, 40(4):16-20.
- [8] Li Jing, Wu Baisheng, Zeng Q C. A generalized flexibility matrix based approach for structural damage detection [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329 (22):4583-4587.
- [9] 周卫东,杨秋伟,赵 卫. 基于广义柔度和附加质量的结构损伤识别研究 [J]. 机械强度, 2016, 38(1): 156-159.

- Zhou Weidong, Yang Qiuwei, Zhao Wei. Structural damage identification based on generalized flexibility and additional mass[J]. Mechanical Strength, 2016, 38(1):156-159.
- [10] Sung S H, Jung H J, Jung H Y. Damage detection for beam-like structures using the normalized curvature of a uniform load surface[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(6):1501-1519.
- [11] Jung Ho-Yeon, Sung Seung-Hoon, Jung Hyung-Jo. Experimental validation of normalized uniform load surface curvature method for damage localization[J]. Sensors, 2015, 15(10):26315-26330.
- [12] 余建新, 卫剑征, 谭惠丰. 飞艇骨架结构动态损伤识别方法[J]. 航空学报, 2016, 37(11):3385-3394.
- Yu Jianxin, Wei Jianzheng, Tan Huifeng. Dynamic damage identification method of airship skeleton structure[J]. Journal of Aviation, 2016, 37(11):3385-3394.
- [13] Berman A, Flannely W G. Theory of incomplete models of dynamic structures [J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 1971, 9(8):1481-1487.
- [14] Wu D, Law S S. Damage localization in plate structures from uniform load surface curvature [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 276(1):227-244.
- [15] Zhang Z, Aktan A E. Application of modal flexibility and its derivatives in structural identification [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1998, 10(1):43-61.

## Method of generalized uniform load surface for structure damage identification

ZHAO Jian-gang, ZHANG Yu-xiang, CHEN Jia-zhao, JIANG Xie

(School of Missile Engineering, Rocket Force Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the pre-damage parameters of damaged structures are not available in most cases and the higher order modes of structures are difficult to obtain in practice, the damage identification method of generalized uniform load surface is deduced theoretically and proposed. The damage indexes of generalized uniform load surface curvature and the generalized uniform load surface curvature is fitted based on the least square polynomial have been constructed respectively. Taking the T-shaped simply supported beam fixed at both ends as an example, the paper analyzed numerically and compared the damage identification effect of four indexes which are flexibility curvature, uniform load surface curvature, generalized uniform load surface curvature and generalized uniform load surface curvature based on least square polynomial respectively. The results show that: all above four indexes only need low order modal parameters to identify the damage, but the latter three indexes are better than the first one; The index of generalized uniform load surface curvature has smaller truncation error than that of uniform load surface curvature, and has certain anti-noise performance; Only the index of generalized uniform load surface curvature based on least square polynomial needs the parameters after structural damage, which has more practical application value.

**Key words:** damage identification; generalized uniform load surface; least square polynomial; truncation error; anti-noise performance

**作者简介:** 赵建刚(1984-),男,博士研究生。电话:(029)84743324; E-mail: zhaojgbox001@163.com

**通讯作者:** 张玉祥(1963-),男,教授。电话:(029)84743324; E-mail: yuxiangz@tom.com