

基于均布荷载面曲率的板类结构损伤定位研究

周 奎, 熊壮志

(上海理工大学 环境与建筑工程学院, 上海 200093)

摘要: 基于均布荷载面曲率方法对不同工况下的板类结构进行了损伤定位. 该方法仅需要板结构损伤前和损伤后的前三阶模态频率和模态振型就可准确定位损伤位置. 采用中心差分法构造了 x 和 y 方向的均布荷载面曲率, 并成功地运用到板类结构的损伤定位中. 数值模拟讨论了固定支承和三边固支时 3 种损伤情况下均布荷载面曲率方法的定位效果. 研究发现: 固定支承板中度面损伤时, 均布荷载面曲率方法仅用第一阶模态数据就能有效定位损伤; 而且均布荷载面曲率差值随着参与模态阶数的增加收敛得很快; 轻度点损伤和多处损伤能够大致定位.

关键词: 板类结构; 损伤定位; 均布荷载面曲率; 数值模拟

中图分类号: TU 33+9

文献标志码: A

Damage Localization of Plate-Like Structures Based on the Uniform Load Surface Curvature

ZHOU Kui, XIONG Zhuangzhi

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A method based on the uniform load surface curvature (ULSC) was employed to locate the damages of plate-like structures under different conditions. The method just requires the modal frequencies and the modal shapes of first few modes of damaged and undamaged plates. The central difference method was applied to obtain the ULSC and achieve the localization of damages in plate-like structures. With numerical simulation examples, the damage localizations in three different damage cases and two boundary conditions were discussed. It is found that the ULSC method can locate damage successfully in a four-side fixed support plate with a moderate surface damage. The uniform load surface converges rapidly with the increase of the number of participated modes. The ULSC can locate damages roughly in plates with a slight surface damage or multiple coexisting damages.

Keywords: plate-like structure; damage localization; uniform load surface curvature; numerical simulation

结构的模态参数是其物理参数的函数. 当结构出现损伤时, 物理参数会发生相应的变化, 因此, 可

以通过分析模态参数的变化, 对结构的损伤情况进行评估. 基于振动的损伤识别方法得到了国内外学

收稿日期: 2016-05-31

基金项目: 上海市联盟计划(LM2012048)

第一作者: 周 奎(1970-), 男, 副教授. 研究方向: 工程结构抗震、结构健康监测与损伤识别研究, E-mail: zhoukui_sh@163.com

者的广泛关注. Doebling 等^[1]回顾并总结了基于振动的损伤识别方法. Zhao 等^[2]提出了损伤指标的灵敏度问题,对比了频率指标、振型指标和模态柔度指标的灵敏度.文献[3-7]的研究表明,基于振动的方法得到了很好的发展.这些研究表明,基于柔度矩阵或其变式的指标具有更好的灵敏度.但是,迄今为止,大多数基于振动的方法是针对一维梁类结构的,因此,只适合运用到梁与可分解成梁单元的框架或桁架结构的损伤识别中.而板类结构作为一种常见的结构物,遭受地震、火灾和疲劳荷载的作用时可能导致刚度的下降,损伤达到一定程度会影响结构的安全和正常使用.因此,板结构的损伤识别具有重要意义. Yam 等^[8]对板结构的两种基于振动的识别方法和一种静力识别方法进行了灵敏度分析. Lee 等^[9]提出了一种基于完好时模态数据和频响函数数据的板结构损伤识别方法. Wu 等^[10]通过均布荷载向量构造了损伤标识量,对比研究了不同情况下的损伤识别效果.马骏等^[11]采用了基于柔度曲率矩阵的方法对加筋板结构的损伤进行了识别.陈翔等^[12]对板结构损伤识别的叠加曲率法进行了研究,分析了曲率模态差方法无法有效识别模态节线附近的损伤点的局限性. Eraky 等^[13]提出了一种基于残余力向量的板结构损伤识别方法,利用节点的残余力向量来定位损伤区域并描述此区域的损伤程度.但是,这些方法的收敛性不是很理想,而且在有限元分析时需要密集的网格划分.

本文以 2 种不同支承的钢板为研究对象,采用均布荷载面曲率差值 $\Delta U(x_i, y_j)$ 作为损伤指标,其中, (x_i, y_j) 表示钢板中的任一点. 首先由模态柔度矩阵推得均布荷载面,再通过中心差分法构造均布荷载面曲率.数值模拟讨论了在固定支承和三边固支情况下 3 种损伤工况的定位效果.最后通过绘制损伤指标图直观地给出损伤位置.

1 损伤定位方法

1.1 均布荷载面(ULS)

对于具有 n 个自由度的结构,其模态柔度矩阵 $\mathbf{F}$ 可用质量归一化振型的和式表示为

$$\mathbf{F} = \sum_{r=1}^n \frac{\boldsymbol{\varphi}_r \boldsymbol{\varphi}_r^T}{\omega_r^2} \quad (1)$$

式中: ω_r 表示 r 阶模态频率; $\boldsymbol{\varphi}_r$ 表示质量归一化 r 阶振型.

高阶模态数据在柔度矩阵中权重小,随着参与模

态阶数的增加,柔度矩阵收敛得很快.基于这个优势,可采用前 m 阶模态数据表示近似柔度矩阵 $\mathbf{F}_T$.

$$\mathbf{F}_T = [\mathbf{f}_{k,l}] = \sum_{r=1}^m \frac{\boldsymbol{\varphi}_r \boldsymbol{\varphi}_r^T}{\omega_r^2} \quad (2)$$

式中,模态柔度矩阵的元素 $f_{k,l}$ 表示在 l 点施加单位力时点 k 的位移.

$$f_{k,l} = \sum_{r=1}^m \frac{\varphi_r(k) \varphi_r(l)}{\omega_r^2} \quad (3)$$

式中: $\varphi_r(k)$, $\varphi_r(l)$ 表示 r 阶模态点 k 和点 l 的模态位移值.

对于一个线性系统,当在整个结构上施加均布单位荷载时,点 k 的模态挠度 $u(k)$ 可以近似表示为

$$u(k) = \sum_{l=1}^n f_{k,l} = \sum_{r=1}^m \frac{\varphi_r(k) \sum_{l=1}^n \varphi_r(l)}{\omega_r^2} \quad (4)$$

均布荷载面经拉直处理后表示为模态挠度列向量 $\mathbf{S}$.

$$\mathbf{S} = \{u(k)\} = \mathbf{F}_T \mathbf{L} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{L} = \{1, \dots, 1\}_{1 \times n}^T$ 是 1_n 向量,表示结构上的均布单位荷载.

1.2 均布荷载面曲率(ULSC)

在完好情况时,板的均布荷载面是一个光滑的曲面.一旦出现损伤,ULS 在出现损伤的位置会出现尖锐的变化(峰、陡坡).通过对梁结构的损伤识别方法进行研究,发现曲率方法是在光滑曲线中寻找突变的最有效方法.大多数需要计算曲率的损伤识别方法都是通过有限中心差分法来近似计算曲率.现将有限中心差分法推广到板类结构中,便于近似计算 x 和 y 方向的 ULSC.进一步计算得到板中每个位置的 $\Delta U(x_i, y_j)$.板损伤位置将通过损伤指标图直观地描述.

$$U_{xx}(x_i, y_j) = \frac{u(x_{i+1}, y_j) - 2u(x_i, y_j) + u(x_{i-1}, y_j))}{h_x^2} \quad (6a)$$

$$U_{yy}(x_i, y_j) = \frac{u(x_i, y_{j+1}) - 2u(x_i, y_j) + u(x_i, y_{j-1}))}{h_y^2} \quad (6b)$$

式中: (x_{i+1}, y_j) 和 (x_i, y_j) 表示 x 向相邻的 2 个点; (x_i, y_{j+1}) 和 (x_i, y_j) 表示 y 向相邻的 2 个点; $U_{xx}(x_i, y_j)$ 和 $U_{yy}(x_i, y_j)$ 分别表示在点 (x_i, y_j) 处 x 和 y 方向的均布荷载面曲率; h_x, h_y 表示 x 和 y 向的网格间距.

列向量 $\mathbf{S}$ 按照其与网格中节点的对应关系集成矩阵.

若完好和损伤结构的 2 组模态数据(频率和振

型)已测得,则点 (x_i, y_j) 的完好 ULSC 和损伤 ULSC 值可通过式(4)和式(6)计算得到,进一步可以计算损伤导致的曲率差值。 (x_i, y_j) 点的 ULSC 差值为

$$\Delta U(x_i, y_j) = [\alpha_{xx} | U_{xx}^D(x_i, y_j) - U_{xx}(x_i, y_j) | + \alpha_{yy} | U_{yy}^D(x_i, y_j) - U_{yy}(x_i, y_j) |]^2 \quad (7)$$

式中: $\Delta U(x_i, y_j)$ 表示 (x_i, y_j) 点的均布荷载面曲率差值; U_{xx}^D 和 U_{yy}^D 分别表示点 (x_i, y_j) 处 x 和 y 方向损伤结构的均布荷载面曲率; α_{xx}, α_{yy} 分别是 x, y 方向的曲率权重系数。

若结构完好,则测量并计算得到的2组 ULSC 的区别仅取决于测量噪音。因此, $\Delta U(x_i, y_j)$ 会围绕0值轻微震荡,并不存在明显的峰或陡坡。相反,若结构已损伤,则在板的损伤区域会出现明显的峰或陡坡。本文通过板的数值模拟研究来说明 ULSC 方法的有效性。

2 数值模拟

数值模拟讨论了在固定支承和三边固支下多种损伤工况时 ULSC 方法在弹性薄钢板中的定位效果。固定支承板的有限元模型如图1所示,单元节点图如图2所示。钢板尺寸的长为1.500 m,宽为1 m,厚为0.006 m。弹性薄钢板在工程实践中的运用很普遍,例如,箱型钢梁的梁板、船体的甲板,土体边坡支撑的钢板等都是弹性薄钢板构件,对该尺寸板的研究可以运用到工程实践中。板的有限元模型采用 shell63 单元,按 15×10 划分网格。密度为 7800 kg/m^3 ,泊松比为0.3;杨氏模量为 $2 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。三边固支板的建模、网络划分以及参数设置同固定支承板情况一致。

假定钢板损伤仅影响其刚度矩阵,局部损伤导致的刚度削弱用相应单元的杨氏模量折减表示,损伤程度和杨氏模量的折减程度呈线性关系。模拟了

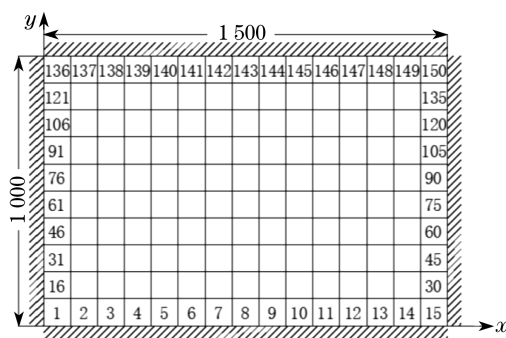


图1 固定支承板的有限元模型

Fig.1 Finite element model of the four-side fixed plate

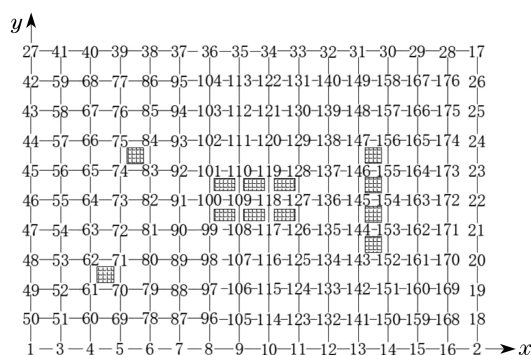


图2 固定支承板的节点图

Fig.2 Node graph of the four-side fixed plate

3种损伤工况,如图3所示。工况1是中度面损伤:单元67,68,69,82,83和84的模量折减50%;工况2是轻度点损伤:单元33的模量折减20%;工况3模拟两处损伤,分别为条带损伤和轻度点损伤:单元94,102,87,72,57的模量折减50%。

对于每一种损伤情况,通过 ANSYS 软件的模式分析可得到钢板的模态频率和振型。通过式(6)计算得到 $U_{xx}(x_i, y_j), U_{yy}(x_i, y_j), U_{xx}^D(x_i, y_j), U_{yy}^D(x_i, y_j)$;通过式(7)计算得到 $\Delta U(x_i, y_j)$,即损伤指标。 x 和 y 方向网格等距,故权重值 α_{xx} 和 α_{yy} 取为1。对于不同的边界以及不同损伤工况,分别讨论基

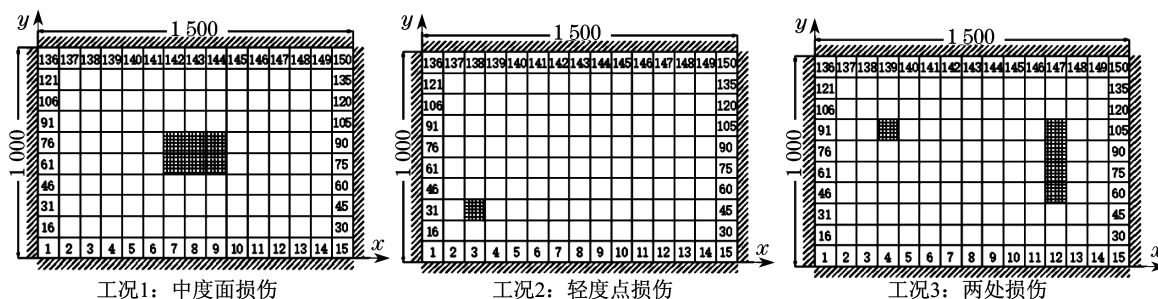


图3 损伤工况图

Fig.3 Graph of damage conditions

于均布荷载面曲率定位方法的识别效率.

3 结果分析

经 ANSYS 计算得到完好和损伤工况下结构的模态频率和振型,并计算得到 $\mathbf{S}$;然后用中心差分法近似计算 $U_{xx}(x_i, y_j), U_{yy}(x_i, y_j), U_{xx}^D(x_i, y_j), U_{yy}^D(x_i, y_j)$;最后计算 $\Delta U(x_i, y_j)$ 并绘制了损伤指标图.

3.1 损伤工况 1

损伤工况 1 是中心 6 个单元的模量折减 50%,模拟面损伤.在固定支承时,完好和损伤时得到的二阶和三阶模态数据的 $\sum_{l=1}^{176} \varphi_1(l)$ 为 0,则式(4)仅用到一阶模态数据,可以改写为

$$u(k) = \frac{\varphi_1(k) \sum_{l=1}^{176} \varphi_1(l)}{\omega_1^2} \quad (8)$$

即此时仅采用一阶模态数据.由于中心 6 个单元的刚度折减,均布荷载面在该区域发生了变化,而均布荷载面曲率放大了这种变化,故损伤指标 $\Delta U(x_i, y_j)$ 在该区域大于 0.从图 4 可以看出,损伤指标在中心 6 个单元处出现峰和陡坡.从表 1 可以看出,围成该区域的节点的损伤指标值是该区域周边节点损伤指标值的 5~1 100 倍,说明此时准确地定位了损伤区域.在这种特殊情况时,仅需一阶频率就可以达到良好的损伤识别效果.

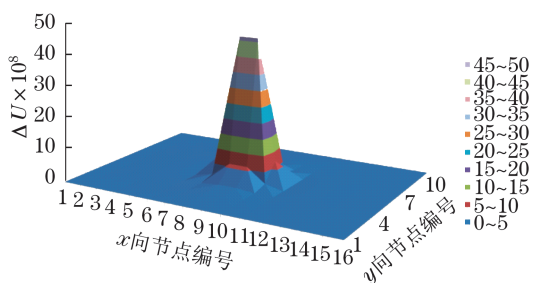


图 4 固定支承的损伤指标图(工况 1)

Fig.4 Damage index graph of the four-side fixed plate (case 1)

计算三边固支的 ULS 时,采用完好和损伤的一阶和二阶模态数据.一阶模态时,式(4)中的和式

$\sum_{l=1}^{176} \varphi_1(l)$ 在完好和损伤时分别是 -113.4698×10^{-5} 和 -115.1299×10^{-5} ;二阶模态时, $\frac{\sum_{l=2}^{176} \varphi_2(l)}{\omega_2^2}$ 在

表 1 固定支承的损伤指标值(工况 1)

Tab.1 Damage index value of four-side fixed support plate (case 1)

单元类型	单元编号	$\Delta U \times 10^8$
损伤区域节点	101,110,119,128	1.27,1.45,1.45,1.27
	100,109,118,127	4.58,41.9,41.9,4.58
	99,108,117,126	1.22,24.2,24.2,1.22
毗邻损伤区域节点	89,90,91,92,93,102,	0.18,0.97,1.49,0.31,
	111,120,129,138,137,	0.1,0.04,0.08,0.08,0.04,
	136,135,134,125,116,	0.1,0.3,1.49,0.97,0.18,
	107,98	0.02,0.32,0.32,0.02

完好和损伤时分别是 6.03794×10^{-5} 和 6.17121×10^{-5} .一方面,一阶和二阶模态节点位移值在同一数量级;另一方面,二阶模态的节点位移有正负数,和

式抵消了一部分,且有更大的频率值,故 $\frac{\sum_{l=2}^{176} \varphi_2(l)}{\omega_2^2}$

仅为 $\frac{\sum_{l=1}^{176} \varphi_1(l)}{\omega_1^2}$ 的 5%.由此可以看出,随着模态阶数增加,均布荷载面曲率差值收敛得很快,采用前二阶频率在此时获得了较好的识别效果.从图 5 可以看出,损伤指标在中心六个单元处出现峰和陡坡,从表 2 中也可以观察到这一变化.一方面,在实际工程

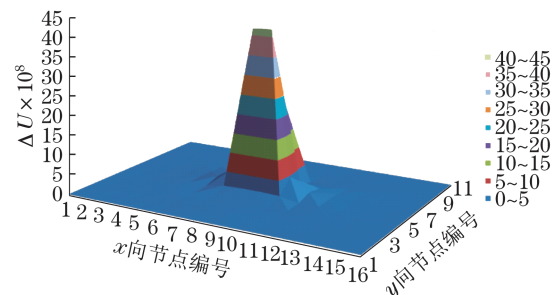


图 5 三边固支的损伤指标图(工况 1)

Fig.5 Damage index graph of the three-side fixed plate (case 1)

表 2 三边固支的损伤指标值(工况 1)

Tab.2 Damage index value of three-side fixed support plate (case 1)

单元类型	单元编号	$\Delta U \times 10^8$
损伤区域节点	101,110,119,128	1.42,5.91,5.91,1.42
	100,109,118,127	7.05,46.3,46.3,7.05
	99,108,117,126	1.42,5.91,5.91,1.42
毗邻损伤区域节点	89,90,91,92,93,102,	0.12,0.04,0.04,0.04,
	111,120,129,138,137,	0.12,0.3,0.89,0.89,0.3,
	136,135,134,125,116,	0.12,0.04,0.04,0.04,
	107,98	0.12,0.3,0.89,0.89,0.3

运用中,往往只能得到比较准确的前三阶模态数据,甚至只能得到前两阶或一阶的准确数据.另一方面, $\sum_{l=1}^n \varphi_r(l)$ 平均了实际工程中不同测点的随机误差.这两方面使均布荷载面曲率差方法成为一个稳定且灵敏的损伤定位方法.

3.2 损伤工况 2

损伤工况 2 模拟轻度点损伤,固定支承板和三边固支板的损伤指标图如图 6 和图 7 所示.

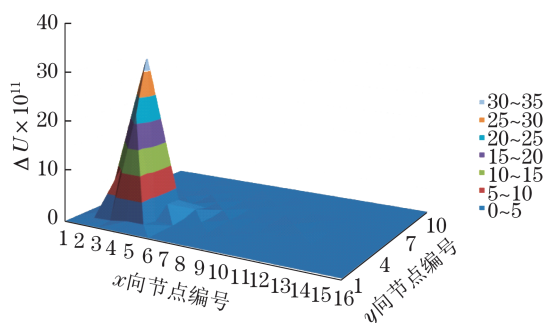


图 6 固定支承损伤指标图(工况 2)

Fig.6 Damage index graph of the four-side fixed plate (case 2)

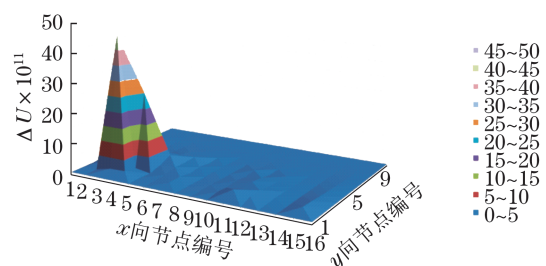


图 7 三边固支损伤指标图(工况 2)

Fig.7 Damage index graph of the three-side fixed plate (case 2)

在工况 2 情况下,固定支承板的损伤定位是成功的.结合图 6 和表 3 可以看出,有的 4 个节点的损伤指标值发生了突变,与周围节点相比,增加了 15~200 倍不等.这 4 个节点刚好围成 33 号单元,即准确定位了损伤区域.三边固支板的损伤识别效果不好.从表 4 可以看出,33 号单元的 2 个节点有峰值,但另外 2 个节点值却很小.图 7 中出现了 2 个峰,与实际情况不符合.针对这种定位不准确的情况,可以进一步细化网格划分,或计算时将三阶和四阶模态数据考虑进去.

3.3 损伤工况 3

损伤工况 3 模拟了细长型的裂纹状损伤,损伤

指标的计算采用了前两阶模态数据.从图 8 中的 2 个峰可以看出,此时能够大致定位损伤.表 5 和表 6 (见下页)中对应损伤单元节点的损伤指标值有个别偏小,说明没有精准定位损伤.固定支承德工况 3 同三边支承的工况 2 一样,准确定位轻度点损伤有赖于进一步精细化网格,或考虑更多阶模态数据.

表 3 固支支承损伤指标值(工况 2)

Tab.3 Damage index value of four-side fixed support plate (case 2)

单元类型	单元编号	$\Delta U \times 10^{11}$
损伤区域节点	61,62,71,70	10.3,21.1,33.8,21.8
毗邻损伤区域节点	51,52,53,54,63,72,81,80,79,78,69,60	0.14,0.49,0.22,0.69,1.18,0.7,2.4,2.7,0.24,0.83,0.8,0.26

表 4 三边固支损伤指标值(工况 2)

Tab.4 Damage index value of three-side fixed support plate (case 2)

单元类型	单元编号	$\Delta U \times 10^{10}$
损伤区域节点	61,62,71,70	45.2,0.3,25.2,0.8
毗邻损伤区域节点	51,52,53,54,63,72,81,80,79,78,69,60	0.19,2.1,4.9,1.89,0.3,7,3.0,1.1,0.0,2,1.6,1.4

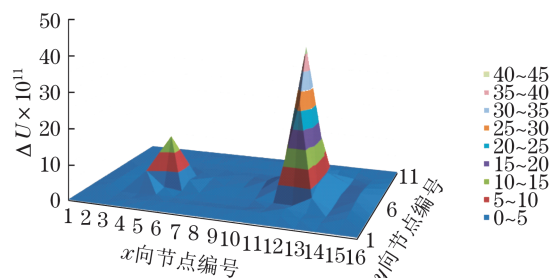


图 8 固定支承损伤指标图(工况 3)

Fig.8 Damage index graph of four-side fixed plate (case 3)

表 5 固定支承损伤指标值(工况 3)

Tab.5 Damage index value of four-side fixed support plate (case 3)

单元类型	单元编号	$\Delta U \times 10^{11}$
损伤区域节点	74,75,84,83	0.6,5.1,0.8,14.4
毗邻损伤区域节点	64,65,66,67,76,85,94,93,92,91,82,73	0.11,0.03,0.05,0.0,0.01,0.45,0.19,0.22,1.8,1.3,0.3,0

表6 固定支承损伤指标值(工况3)

Tab.6 Damage index value of four-side fixed support plate (case 3)

单元类型	单元编号	$\Delta U \times 10^{11}$
损伤区域 节点	143,144,145,146,147,	0.26,42,27,0.2.8,
	156,155,154,153,152	4.6,4.8,4.7,2.8
毗邻损伤 区域节点	133,134,135,136,137,	0.58,0.02,2.4,4.7,2.5,
	138,139,148,157,166,	0.02,0.59,1.2,0.24,0.08,
	165,164,163,162,161,	0.01,0.26,0.63,0.27,0.01,
	160,151,142	0.08,0.25,1.16

4 结 论

以固定支承和三边固支的钢板为研究对象,通过有限元软件 ANSYS 计算得到了模态频率和振型.以均布荷载面曲率差值作为损伤指标,研究了钢板在2种边界条件下3种损伤工况时的定位效果.得到以下结论:

a. 在固定支承条件下,中度面损伤仅用结构损伤前后的一阶模态数据便可达到理想的损伤定位效果.

b. 中度面损伤时,均布荷载面曲率差值随着模态阶数的增加收敛得很快.

c. 在固定支承条件下,轻度点损伤能成功定位,多处损伤能够大致定位.

参考文献:

- [1] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. The Shock and Vibration Digest, 1998, 30 (2): 91 - 105.
- [2] ZHAO J, DEWOLF J T. Sensitivity study for vibrational parameters used in damage detection [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(4): 410 - 416.

- [3] 魏锦辉,潘春风.基于动力参数的桥梁结构损伤识别研究进展[J].河南建材,2010(4):142 - 143.
- [4] PANDEY A K, BISWAS M, SAMMAN M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145 (2): 321 - 332.
- [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] 周奎,宁娜娜,林杰.基于频率响应的悬臂工字型钢梁的结构损伤分析[J].上海理工大学学报,2014,36(5):497 - 501.
- [7] 周奎,缪润翰,郭耀,等.基于动力特性的简支U形梁的模态识别[J].上海理工大学学报,2016,38(2): 192 - 197.
- [8] YAM L H, LI Y Y, WONG W O. Sensitivity studies of parameters for damage detection of plate-like structures using static and dynamic approaches[J]. Engineering Structures, 2002, 24(11): 1465 - 1475.
- [9] LEE U, SHIN J. A structural damage identification method for plate structures[J]. Engineering Structures, 2002, 24(9): 1177 - 1188.
- [10] WU D, LAWS S. Damage localization in plate structures from uniform load surface curvature [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 276(1/2): 227 - 244.
- [11] 马骏,陈立,赵德有.基于柔度曲率矩阵的加筋板结构损伤识别方法[J].船舶力学,2011,15(8):881 - 891.
- [12] 陈翔,彭华,张宏宇.板结构损伤识别的叠加曲率法研究[J].武汉大学学报(工学版),2015,48(4): 538 - 541.
- [13] ERAKY A, SAAD A, ANWAR A M, et al. Damage detection of plate-like structures based on residual force vector[J]. HBRC Journal, 2016, 3(12): 255 - 262.

(编辑:石 瑛)