

文章编号:1673-9469(2009)03-0031-06

基于曲率模态差的四边固支薄板的损伤检测

张波¹,王赞¹,姜峰²

(1. 陕西理工学院 土木工程与建筑系, 陕西 汉中 723001; 2. 甘肃省机械科学研究院, 甘肃 兰州 730030)

摘要:以四边固支板为研究对象,采用改变单元弹性模量的方法模拟结构损伤,分别应用基于振型、频率和模态曲率差的损伤识别方法识别结构损伤。结果表明:在薄板一个比较小的区域损伤的情况下,其振型与频率的改变量是很小的,很难判断损伤位置,而有损伤单元的模态曲率差的值却发生明显的变化,因此采用模态曲率差法对结构进行损伤识别可以准确判定损伤的位置。

关键词:弹性薄板;振型;频率;模态曲率差;损伤检测

中图分类号: TU3

文献标识码: A

Damage detection for elastic thin plate with four simply clamped edges based on curvature model difference

ZHANG Bo¹, WANG Yun¹, JIANG Feng²

(1. Department of civil Engineering & Architecture, Shanxi University of Technology, Shanxi Hanzhong 723001, China;

2. Gansu academy of mechanical sciences, Gansu Lanzhou 730030, China)

Abstract: Taking the clamped slab as the study object, the research simulated the structural damage by changing the elastic modulus of elements and detected the damage based on the vibration modes, the frequency, and the mode curvature difference respectively. The results show that the vibration modes and the frequency changed too little to identify the damaged location in the thin slab with small area damaged, while the curvature mode difference of the damage element changed obviously. Therefore the location of the structure damage can be identified exactly by using the method of the curvature mode difference.

Key words: elastic thin plate; vibration mode; frequency; modal curvature difference; damage detection

结构产生损伤后,结构的动力学特性都会随之改变,影响结构的承载能力和使用功能。从结构理论上讲,它通常会引起结构刚度的降低,影响结构承受静载荷的能力,改变结构动力学特性如结构固有振动频率和固有振型的改变,从而影响结构对动载荷作用下的动力响应^[1]。从结构强度的观点看,在结构产生损伤后,结构的强度会受到削弱,随着损伤的扩展演化,最终会导致结构失效,引发结构破坏事故^[2]。由模态分析理论可知,伴随系统特性的改变必然有模态参数的改变。这种关系已经被广泛地运用到工程结构的动力检测和结构健康监测中^[3]。1991年 Pandey 首先提出曲率模态是结构检测中的一个很好的指标^[4],并

成功地运用在梁式结构检测中。许多研究人员发现曲率模态与固有频率和振型相比较,曲率模态是结构检测中的一个非常灵敏的参数。文献[5-7]均阐述曲率模态差法对损伤识别的可行性。本文在此基础上利用高斯曲率来计算薄板的曲率模态差,并用其来判断损伤位置,并在此基础上提出了一种可用于评价损伤程度的简易方法。

1 高斯曲率

由于求解薄板涉及到两个方向的曲率,所以给计算曲率模态带来不便,因此我们引入微分几何当中的高斯曲率来综合考虑两个方向曲率的影响。由微分几何知识,设 k_1 、 k_2 为曲面上一点的

两个主曲率,则他们的乘积 $k_1 k_2$ 称为曲面在这一点的高斯曲率,通常以 K 表示。即

$$K = k_1 k_2 = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \quad (1)$$

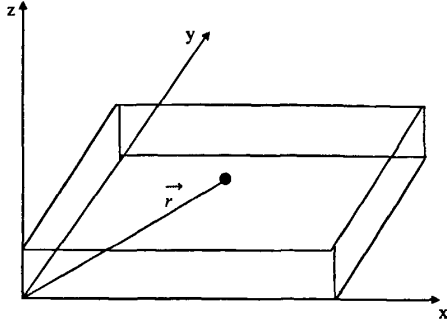


图1 弹性薄板中点的矢径

Fig.1 Radius vector of the point in the elastic thin plate

对于曲面的特殊参数表示 $z = z(x, y)$, 由于

$$\begin{aligned} \vec{r} &= (x, y, z(x, y)), \\ \vec{r}_x &= (1, 0, p), \vec{r}_y = (0, 1, q), \vec{r}_{xx} = (0, 0, u), \vec{r}_{yy} = (0, 0, s), \\ \vec{r}_{xy} &= (0, 0, t) \end{aligned}$$

其中 p, q, m, s, t 分别为 $z(x, y)$ 对 x, y 的一阶、二阶偏导数。

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y}, u = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \quad (2)$$

则第一基本量为

$$E = \vec{r}_x \cdot \vec{r}_x = 1 + p^2, F = \vec{r}_x \cdot \vec{r}_y = pq, G = \vec{r}_y \cdot \vec{r}_y = 1 + q^2 \quad (3)$$

由于

$$\vec{n} = \frac{\vec{r}_x \times \vec{r}_y}{\sqrt{EG - F^2}} = \frac{\{-p, -q, 1\}}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}$$

第二基本量为

$$\begin{aligned} L = \vec{r}_{xx} \cdot \vec{n} &= \frac{r}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}, M = \vec{r}_{xy} \cdot \vec{n} = \frac{u}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}, \\ N = \vec{r}_{yy} \cdot \vec{n} &= \frac{t}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}. \end{aligned} \quad (4)$$

当薄板等间距划分时,可以利用差分法式计算得到 p, q, m, s, t 的数值

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_i &= \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2\Delta x} & \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_i &= \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2\Delta y} \\ \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right)_i &= \frac{z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j-1} + z_{i-1,j-1} - z_{i-1,j+1}}{4\Delta x \Delta y} \\ \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right)_i &= \frac{z_{i,j+1} - 2z_{i,j} + z_{i,j-1}}{(\Delta x)^2} \\ \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right)_i &= \frac{z_{i+1,j} - 2z_{i,j} + z_{i-1,j}}{(\Delta y)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$\Delta x, \Delta y$ 分别为沿 x, y 方向单元的长度和宽度。将式(5)得到的 p, q, m, s, t 数值,代入式(3)、式(4)可以计算第一、第二基本量,再代入式(1)就可以分别计算得到薄板破坏前后各阶模态下高斯曲率的值。若结构的某一局部出现损伤,则结构这一部位的曲率应明显大于其他部位的曲率,因此本文利用其差值得到的曲率模态差就可以判断薄板的损伤位置。

2 数值模拟

计算边长 $5m \times 6m$, 厚度为 $0.1m$ 的正方形板, 弹性模量 $E = 1 \times 10^{11} Pa$, 泊松比 $\mu = 0.2, \rho = 7800kg/m^3$, 边界为四边固支。板的模型共划分 432 个单元,有限元模型如图 2 所示。计算得到的前 4 阶振型如图 3 至图 12 所示。

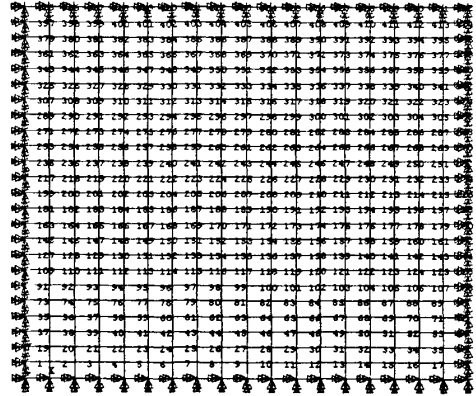


图2 有限元模型

Fig.2 Finite element mode

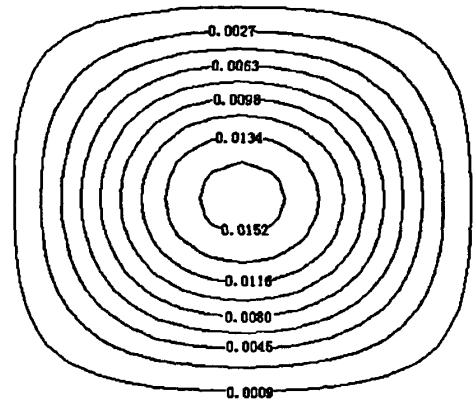


图3 没有破坏的第一阶振型

Fig.3 The first model-shape before damage

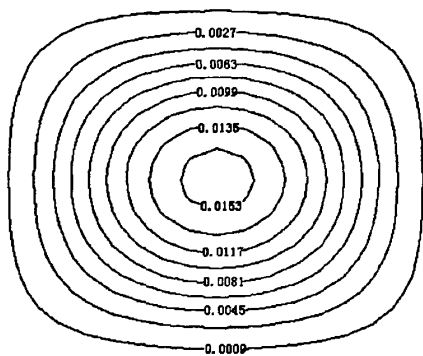


图4 226号单元破坏50%后的第一阶振型
Fig.4 The first model-shape after 50% damage of the 226#

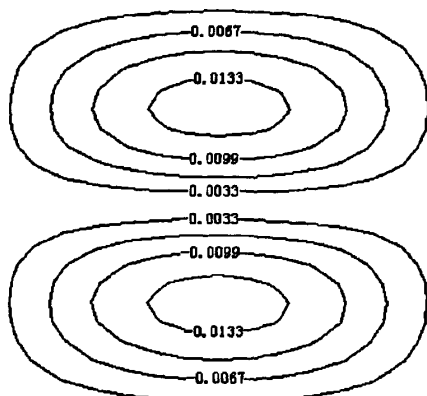


图7 没有破坏的第三阶振型
Fig.7 The third model-shape before damage

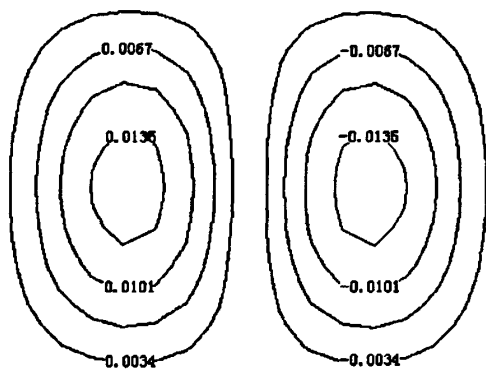


图5 没有破坏的第二阶振型
Fig.5 The second model-shape before damage

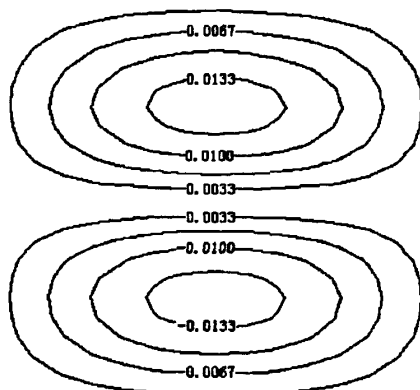


图8 226号单元破坏50%的第三阶振型
Fig.8 The third model-shape after 50% damage of the 226#

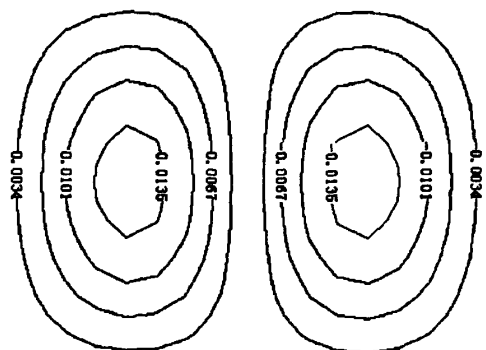


图6 226号单元破坏50%的第二阶振型
Fig.6 The second model-shape after 50% damage of the 226#

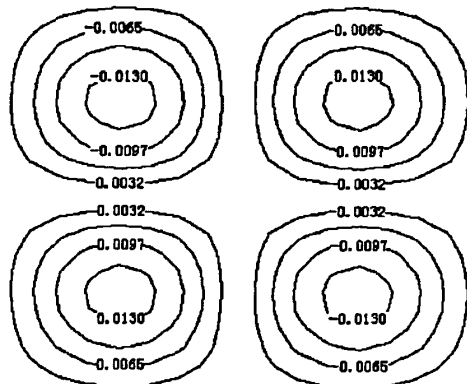


图9 没有破坏的第四阶振型
Fig.9 The fourth model-shape before damage

表 1 固有频率的理论解与数值解

Tab.1 Theoretical solution and numerical solution of natural frequency

方法	第一阶/Hz	第二阶/Hz	第三阶/Hz	第四阶/Hz	第五阶/Hz
理论解(未破坏)	20.615				
数值解(未破坏)	20.611	37.273	46.297	61.506	64.198
数值解(破坏 10%)	20.604	37.272	46.297	61.494	64.172
数值解(破坏 20%)	20.596	37.271	46.296	61.481	64.145
数值解(破坏 30%)	20.588	37.270	46.295	61.467	64.116
数值解(破坏 40%)	20.579	37.269	46.294	61.453	64.084
数值解(破坏 50%)	20.569	37.267	46.292	61.439	64.051

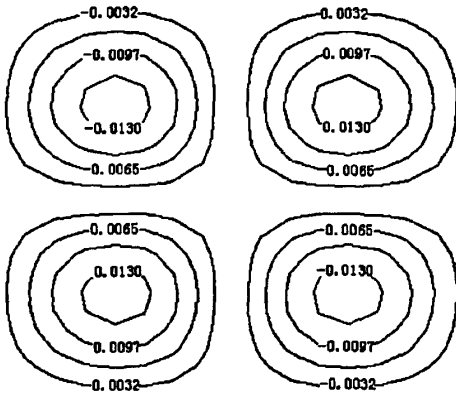


图10 226号单元破坏50%的第四阶振型

Fig. 10 The fourth model-shape after 50% damage of the 226#

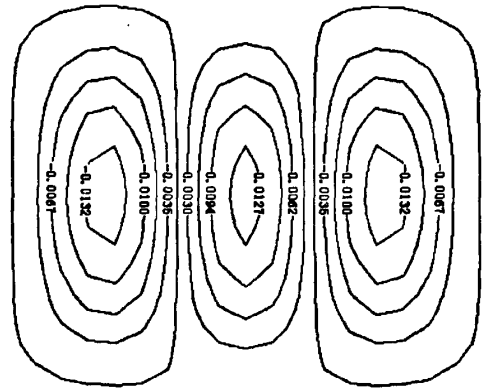


图12 226号单元破坏50%的第五阶振型

Fig. 12 The fifth model-shape after 50% damage of the 226#

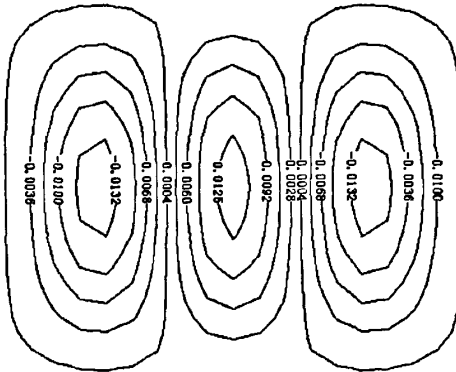


图11 没有破坏的第五阶振型

Fig. 11 The fifth model-shape before damage

本文仅取第一阶模态振型为例进行分析,图 13~图 16 是板中一个单元分别破坏 10%, 20%, 30%, 40% 时在第一阶频率下曲率模态差的值。

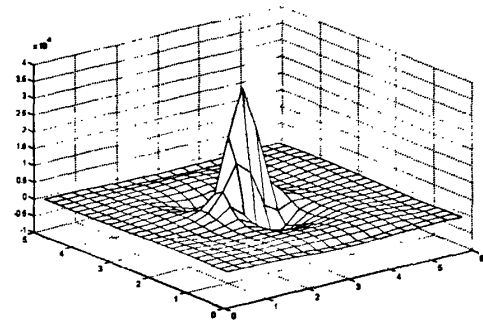


图13 单元225损伤10%的模态曲率差

Fig. 13 The difference of the mode curvature for 10% damage of 225#

由图 3 至图 12 和表 1 可以看出:薄板的单元损伤时其振型和频率的改变不是特别明显,因此不能用频率来作为薄板损伤的检测的指标。

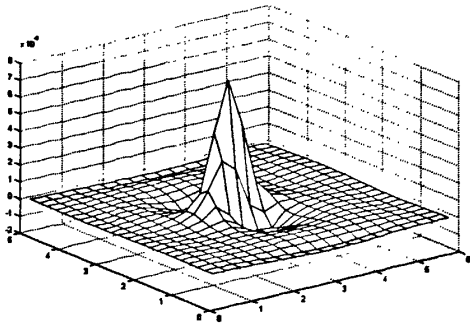


图14 单元225损伤20%的模态曲率差
Fig. 14 The difference of the mode curvature for 10% for 20% damage of 225#

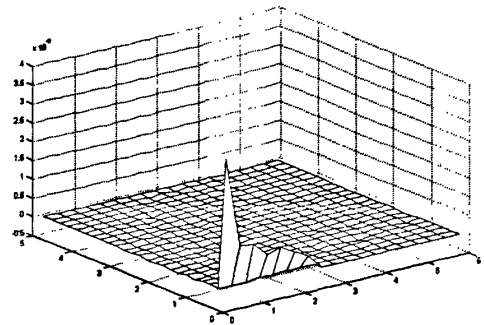


图17 单元1损伤50%的模态曲率差
Fig. 17 The difference of the mode curvature for 50% damage of 1#

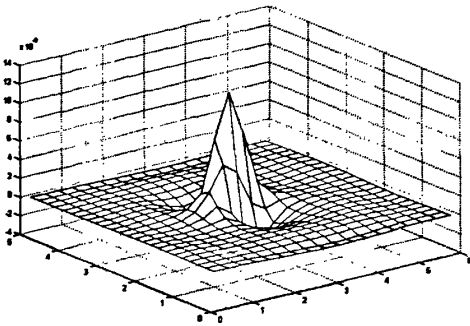


图15 单元225损伤30%的模态曲率差
Fig. 15 The difference of the mode curvature for 30% damage of 225#

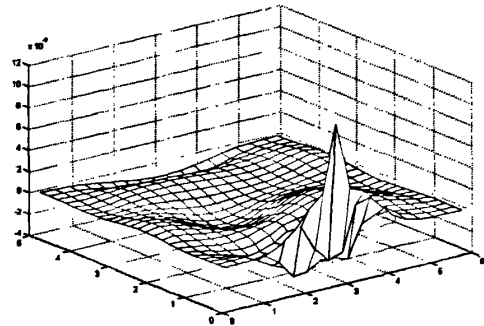


图18 单元9损伤50%的曲率模态差值
Fig. 18 The difference of the mode curvature for 50% damage of 9#

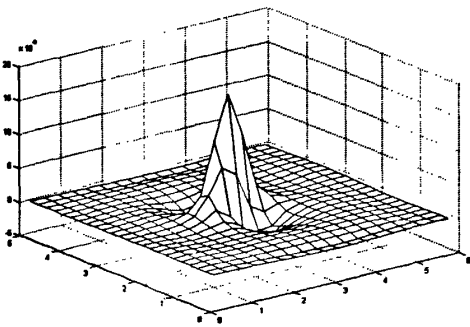


图16 单元225损伤40%的模态曲率差
Fig. 16 The difference of the mode curvature for 40% damage of 225#

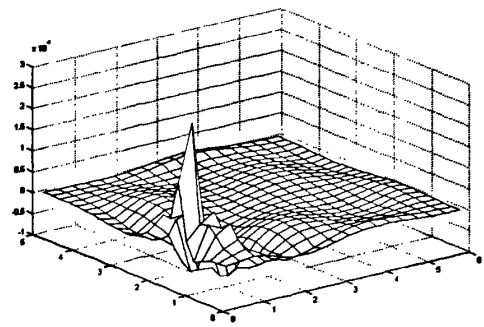


图19 单元110损伤50%的模态曲率差
Fig. 19 The difference of the mode curvature for 50% damage of 110#

从图 13 至图 16 中我们可以看出,对于已知单元来说,破坏程度越大,则曲率模态差的值越大,就越容易从中判断出薄板的破坏位置。

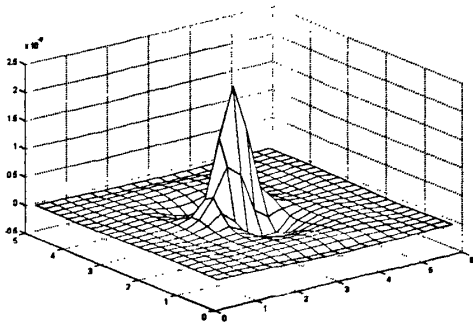


图20 单元225损伤50%的曲率模态差值

Fig. 20 The difference of the mode curvature for 50% damage of 225#

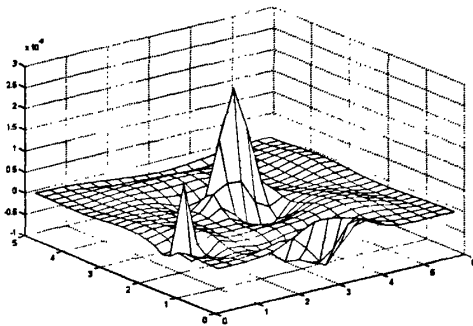


图21 单元110、225损伤50%的模态曲率差

Fig. 21 The difference of the mode curvature for 50% damage of 110# and 225#

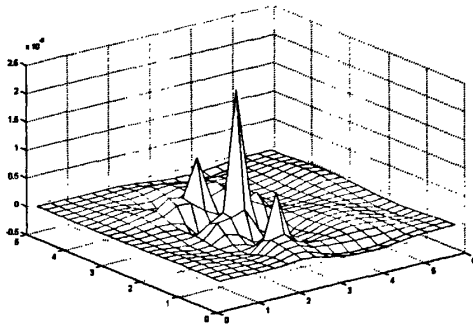


图22 单元98、188、278损伤50%的模态曲率差

Fig. 22 The difference of the mode curvature for 50% damage of 98#, 188# and 278#

从图 17 至图 20 分析可得:单元 1、9、110、225 可构成板的四分之一部分,具有很强的代表性,对于一阶振型来说,分析表明:损伤单元的模态曲率

差明显突变,其它单元处的值接近于零,说明这几个单元有损伤,同时可以发现,随着约束的变弱,模态曲率差在数值上逐渐增大。

图 21 说明板在有两个单元发生损坏时,利用一阶振型也可以很好的判断破坏位置,因为这些位置的曲率模态差的值变化比较明显。图 22 说明板在有三个单元发生损伤时,这三个单元的曲率模态差的数值都是变化比较大的。

3 结论

1)在薄板的一个比较小的区域损伤情况下,其振型与频率的改变量是很小的,从某种程度上说,用现有的监测设备是很难做出响应的,可见用频率来判断薄板损伤位置很不明显。

2)直接利用完好和有损结构的模态曲率差结果进行结构损伤识别,对于一个单元损伤的情况可以判定损伤单元的位置;当有多个单元损伤时也可以准确判断损伤的位置,而且损伤程度的体现不明显,须借助其它方法综合判定。

3)约束条件对模态曲率差是有影响的。单元的损伤在约束较弱的方向上损伤单元的模态曲率差值发生明显的变化,可以准确的判断出结构的损伤位置,但多个单元损伤的判定需考虑各个损伤单元的约束情况,即任何单元的损伤在其约束较弱的方向上识别效果最好。

参考文献:

- [1] 李德葆,陆秋海,秦权.承弯结构的曲率模态分析[J].清华大学学报,2002,42(2):224-227.
- [2] 李健康,张春利,解幸幸.基于契贝雪夫多项式曲率模态在结构损伤检测中的应用[J].振动工程学报,2006,19(4):553-558.
- [3] 王静,张伟,王骑.基于曲率模态法的简支板桥损伤识别研究[J].工业建筑,2006(36):225-227.
- [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] 邓焱,严普强.梁及桥梁应变模态与损伤测量的新方法[J].清华大学学报,2000,40(11):123-127.
- [6] 郭国会,易伟建.基于模态参数进行连续梁损伤诊断的数值研究[J].振动与冲击,2001,20(1):72-75.
- [7] 赵媛,陆秋海.简支梁桥多位置损伤的检测方法[J].清华大学学报(自然科学版),2002,42(4):434-438.

(责任编辑 刘存英)

基于曲率模态差的四边固支薄板的损伤检测

作者: [张波](#), [王贇](#), [姜峰](#), [ZHANG Bo](#), [WANG Yun](#), [JIANG Feng](#)
作者单位: [张波, 王贇, ZHANG Bo, WANG Yun \(陕西理工学院土木工程与建筑系, 陕西, 汉中, 723001\)](#), [姜峰, JIANG Feng \(甘肃省机械科学研究院, 甘肃, 兰州, 730030\)](#)
刊名: [河北工程大学学报 \(自然科学版\)](#) [ISTIC](#)
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2009, 26 (3)

参考文献(7条)

1. 李德葆;陆秋海;秦权 [承弯结构的曲率模态分析](#)[期刊论文]-[清华大学学报 \(自然科学版\)](#) 2002(02)
2. 李健康;张春利;解幸幸 [基于契贝雪夫多项式曲率模态在结构损伤检测中的应用](#)[期刊论文]-[振动工程学报](#) 2006(04)
3. 王静;张伟;王骑 [基于曲率模态法的简支板桥损伤识别研究](#)[期刊论文]-[工业建筑](#) 2006(36)
4. PANDEY A K;BISWAS M;SAMMAN M M [Damage detection from changes in curvature mode shapes](#) 1991(02)
5. 邓焱;严普强 [梁及桥梁应变模态与损伤测量的新方法](#)[期刊论文]-[清华大学学报 \(自然科学版\)](#) 2000(11)
6. 郭国会;易伟建 [基于模态参数进行连续梁损伤诊断的数值研究](#)[期刊论文]-[振动与冲击](#) 2001(01)
7. 赵媛;陆秋海 [简支梁桥多位置损伤的检测方法](#)[期刊论文]-[清华大学学报 \(自然科学版\)](#) 2002(04)

本文读者也读过(10条)

1. [张波](#). [王宗元](#). [王贇](#). [姜峰](#). [Zhang Bo](#). [Wang Zongyuan](#). [Wang Yun](#). [Jiang Feng](#) [利用模态曲率差法进行弹性薄板的损伤检测](#)[期刊论文]-[地下空间与工程学报](#)2011, 07(1)
2. [李国强](#). [梁远森](#) [基于动力特征参数的板类结构损伤诊断](#)[期刊论文]-[地震工程与工程振动](#)2003, 23(6)
3. [吕延晖](#). [周剑](#). [黄志林](#). [LV Yan-hui](#). [ZHOU Jian](#). [HUANG Zhi-lin](#) [基于动力特性的刚性系杆拱桥损伤识别的研究](#)[期刊论文]-[山西建筑](#)2009, 35(12)
4. [郭建生](#). [GUO Jian-sheng](#) [基于模态曲率相关性分析的结构损伤定位方法研究](#)[期刊论文]-[南阳理工学院学报](#) 2009, 1(1)
5. [叶海靖](#). [胡小聪](#). [李恒村](#) [基于小波奇异性的结构损伤检测](#)[期刊论文]-[西部探矿工程](#)2009, 21(1)
6. [姜峰](#) [模态曲率差技术在薄板损伤检测中的应用](#)[学位论文]2008
7. [李范春](#). [李成](#). [张爱锋](#). [LI Fan-chun](#). [LI Cheng](#). [ZHANG Ai-feng](#) [多元结构损伤识别的曲率模态分析及数值仿真](#)[期刊论文]-[船舶力学](#)2006, 10(6)
8. [周玲](#). [李扬](#). [郑莹娜](#). [罗智中](#) [分布式光纤曲率模态传感器在薄结构振动测量中的研究](#)[期刊论文]-[仪表技术与传感器](#)2003(12)
9. [李国强](#). [梁远森](#) [振型曲率在板类结构动力检测中的应用](#)[期刊论文]-[振动、测试与诊断](#)2004, 24(2)
10. [刘玲玉](#). [熊峰](#). [李拨](#). [LIU Lingyu](#). [XIONG Feng](#). [LI Bo](#) [改进的模态曲率改变率损伤识别方法研究](#)[期刊论文]-[四川建筑科学研究](#)2010, 36(1)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200903009.aspx