

基于曲率模态的拱板结构损伤识别

赵俊¹, 程良彦², 马宏伟²

(1. 暨南大学信息技术研究所, 广州市盛通建设工程质量检测有限公司, 广东 广州 510075;

2. 暨南大学理工学院, “重大工程灾害与控制”教育部重点实验室, 广东 广州 510632)

[摘要] 以两边铰支的圆弧形拱板为研究对象, 通过有限元数值模拟计算得到拱损伤前后的第一阶模态参数, 然后运用中心差分法近似求得拱板面内两方向的径向位移模态曲率和转角位移的二阶导数, 并用于拱板的损伤检测研究. 结果表明: 当布置有足够数量的振型测点时, 拱板损伤前后径向位移两方向模态曲率差之和与转角位移两方向二阶导数差之和均可有效地用于拱板损伤的探测和定位, 并大致判断其损伤程度.

[关键词] 曲率模态; 拱板; 无损检测; 数值模拟

[中图分类号] O235 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-9965(2008)05-0470-08

The damage detection in the arch basing on the changes in curvature mode shape

ZHAO Jun¹, CHEN Liang-yan², MA Hong-wei²

(1. Information Technology Research Institute, Jinan University, Guangzhou Shengtong
Quality Testing of Construction Company, Guangzhou 510075, China;

2. College of Science & Engineering, Jinan University, The Key Laboratory of Disaster Forecast and
Control in Engineering, Ministry of Education of China, Guangzhou 510632, China)

[Abstract] Taking a circular arch simply supported along its two edges as an object of study, a study on the damage detection of the arch is made based on its displacement eigenparameters and rotation eigenparameters; which are derived from calculated modal parameters of the arch before and after its damage. Analytical results show that the damage, including its location and extent, can be or can approximately be detected from both the changes of curvature mode shapes and the second-order derivative of rotation changes due to the damage, provided that the number of points for measuring the mode shapes of the arch is large enough.

[Key words] curvature mode; arch; non-destructive detection; numerical simulation

近几十年来,拱板结构被广泛地应用在桥梁、大型建筑物顶棚及大坝等重要公共建筑物结构中,这些结构通常都集中在人口比较密集的城市里,故其出现损伤而造成的破坏力就很大,所以对拱板结构

进行损伤检测及其准确定位尤为重要,但目前国内外学者对拱板损伤检测的研究还很少.

通常来说,结构的损伤一定会引起结构某些物理特性的改变(如刚度、质量和阻尼),通过这些物

[收稿日期] 2008-05-06

[基金项目] 广东省科技攻关项目(2006B12401008);广东省高校自然科学重点研究项目(05Z003)

[作者简介] 赵俊(1983-),男,博士生,研究方向:结构损伤检测和加固;E-mail: zhaojunjack@126.com. 通讯作者: 马宏伟

理特性的敏感参数来探测结构的损伤,对损伤进行定位和定量,是研究损伤问题的一个有效途径^[1]. Allemany 和 Brown^[2]首先利用结构损伤前后的某阶振型定义一个可用于损伤识别的指标,Pandy^[3]、王志华等^[4-5]将曲率模态应用到梁式结构的损伤检测之中,国内学者李国强和梁远森^[6]将曲率模态应用到四边简支方形弹性板的机构动力检测之中,并有效地对损伤板进行了探伤和定位;随后李建康等^[7]对其进行了发展,提出了基于黎贝雪夫多项式的布线方式.但拱板结构比平板结构复杂得多,需要考虑的影响因素也很多,所以在 A. Krishnan 等^[8]和 X. Tong, N. Mrad 等^[9]许多学者对拱结构在平面内振动状况做了大量研究的基础上, M. N. Cerri^[10]、韩西^[11]和赵俊^[12]等学者利用振动模态频率对圆弧形拱结构进行了损伤识别研究.

虽然固有频率的测试较容易,并且精度较高,但是其包含空间信息少且对局部损伤不敏感,而模态振型包含空间信息多,其衍生出的模态振型曲率指标对损伤较为敏感.本文将振型位移和曲率模态应用到拱板的损伤检测中,并发展和改进了此方法,期望能够通过径向位移和转角位移及其模态曲率对拱板结构进行损伤识别.

1 拱结构的变形几何关系和振动理论

如图1所示,截面 m 的转角位移为:

$$\beta = \frac{dv}{ds} + \frac{\omega}{R} \quad (1)$$

其中 v 和 ω 分别是拱微单元体 mn 在平面挠曲变形后移至新的位置 $m'n'$ 时的径向和切向位移.微单元体 ds 的曲率改变量即单位长度转角增量为:

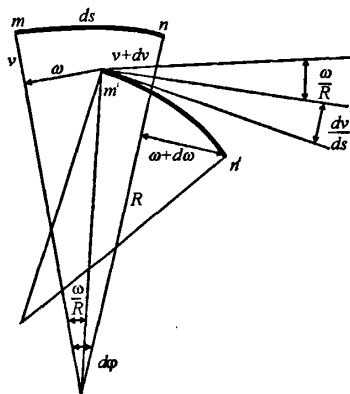


图1 微拱单元示意图

$$K = \frac{d}{ds} \left(\frac{dv}{ds} + \frac{\omega}{R} \right) = \frac{1}{R^2} \left(\frac{d\omega}{d\varphi} + \frac{d^2v}{d\varphi^2} \right) \quad (2)$$

微元 ds 由切向位移 ω 所引起的伸长为 $d\omega$, 由径向位移所引起的伸长为 $-vd\varphi$, 故微元 ds 的单位伸长为:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{ds} - \frac{vd\varphi}{ds} = \frac{d\omega}{ds} - \frac{v}{R}$$

当拱发生平面内挠曲时,拱轴压力只有高阶微量的变化,故拱轴可以视为无伸缩的,径向位移 v 和切向位移 ω 之间的关系如下:

$$\frac{d\omega}{ds} = \frac{v}{R} \quad (3)$$

考虑轴力影响的等截面圆弧拱平面挠曲固有振动的微分方程^[13]为:

$$\frac{d^6\omega}{d\varphi^6} + \frac{d^4\omega}{d\varphi^4} + (1 - \Omega) \frac{d^2\omega}{d\varphi^2} + \Omega\omega = 0 \quad \Omega = \frac{m\omega^2}{EI_*} R^4 \quad (4)$$

结构的损伤通常会引起结构一些物理特性的改变,本试验通过减小弹性模量 E 的大小来模拟结构损伤程度, E 的改变必然带来固有频率、径向位移 v 、切向位移 ω 和转角位移 β 的突变,其中平面曲率的变化会更加明显.本文通过柱坐标系的 y 取得径向位移 v ,由公式(3)可知,损伤前后径向位移 v 比切向位移 ω 敏感性更大,故单独取径向位移 v 来近似拱板的模态曲率.通过柱坐标系的 x 取得平面挠曲时的转角位移 β ,根据公式(2)知,取 β' 就可得到曲率改变量 K ,而且 β'' 会更加明显地表现出突变的程度.

在得到转角位移和径向位移模态时,可以通过中心差分的方法得到它们的二阶导数:

$$\Phi''_{rk} = \frac{\Phi_{r(k+1)} - 2\Phi_{rk} + \Phi_{r(k-1)})}{\delta^2}$$

其中 Φ_{rk} 为第 r 阶位移振型幅值, k 为计算点,表示第 k 个测点, δ 为相邻计算点的距离.

2 分析模型

如图2所示,圆弧形拱板结构 z 方向的两边采用简支,拱角为 60° ,拱半径 $R = 3\,000\text{ mm}$,材料的弹性模量 $E = 200\text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.32$,梁的截面宽 $t = 2\,000\text{ mm}$,厚度 $h = 100\text{ mm}$,梁的密度 $\rho = 7\,850\text{ kg/m}$.将整个拱弧向等分为30个单元,宽度方向等分为20个单元,总共651个节点.采用 shell63 单元

模型通过大型有限元软件 Ansys 对其进行数值模拟分析.一般地,结构损伤多使结构刚度降低而不改变其质量分布,因此分析中仅以单元的抗弯刚度由 D_0 降低为 D_d 来模拟结构单元的损伤,不同的 D_d 值代表单元不同损伤程度,现设定 4 个损伤工况如表 1 所列.图 3 为各工况损伤在拱中的分布情况.

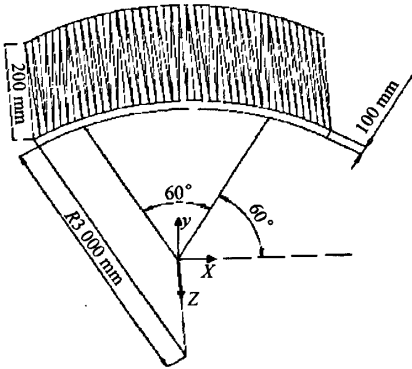
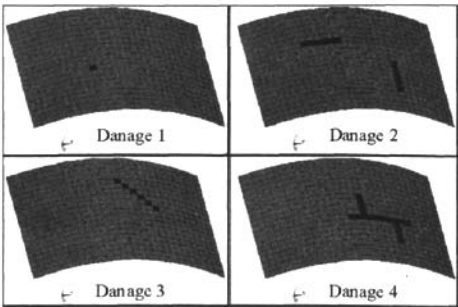


图 2 柱坐标下拱板结构示意图

表 1 拱的损伤情况

损伤工况	损伤区域		损伤程度/%
	$x/(^{\circ})$	z/m	
Damage 1	$x \in (90, 100)$	$z \in (1.1, 1.2)$	50
Damage 2	$x \in (76, 78)$	$z \in (1.0, 1.6)$	50
	$x \in (92, 104)$	$z \in (0.6, 0.7)$	
Damage 3	$x \in (78, 80)$	$z \in (0.9, 1.0)$	50
	$x \in (80, 82)$	$z \in (0.8, 0.9)$	
	$x \in (82, 84)$	$z \in (0.7, 0.8)$	
	$x \in (84, 86)$	$z \in (0.6, 0.7)$	
	$x \in (86, 88)$	$z \in (0.5, 0.6)$	
	$x \in (88, 100)$	$z \in (0.4, 0.5)$	
Damage 4	$x \in (76, 78)$	$z \in (1.1, 1.6)$	50
	$x \in (72, 92)$	$z \in (1.0, 1.1)$	
	$x \in (86, 88)$	$z \in (0.6, 1.0)$	



带黑点部分表示操作部位

图 3 各个工况的损伤在拱中的分布情况

3 基于模态振型径向位移进行拱板的损伤检测及其定位

3.1 利用径向位移差的绝对值进行损伤检测及定位

根据力学分析可知,若结构某一局部出现损伤,则结构损伤前后的一阶位移振型应在这一部位出现较其他部位更为显著的变化.因此利用结构损伤前后的一阶位移振型差来对结构的损伤进行定性定位是有可能的.

图 3.1 为拱板结构在 Damage 1 时第一阶模态径向位移差的曲面图,可以通过曲面的顶峰定位出损伤单元的 x 和 z 坐标,识别出损伤单元的具体位置;图 3.2 为拱板结构在 Damage 2 时第一阶模态径向位移差的曲面图,从图中可以识别出分别平行于 x 和 z 坐标的两条损伤带,并可以大致判断其位置,可见,径向位移差对拱板单个单元的损伤和平行于坐标轴的损伤带很有效.图 3.3、3.4 分别为拱板结构在 Damage 3 和 Damage 4 时第一阶模态径向位移差的曲面图.可以看出,两个曲面图都有峰值的出现,说明能够判断出结构有损伤,当对峰值进行定位时发现,能识别出的损伤只是全部损伤的一部分,而对 Damage 3 和 Damage 4 的部分损伤识别失效.可见,径向位移差对拱板斜向损伤带和较复杂的多条损伤带的识别较困难,所以,不能单独用径向位移对拱板进行损伤识别.需要说明,轴向位移差是指拱板损伤前后振型轴向位移差的绝对值.

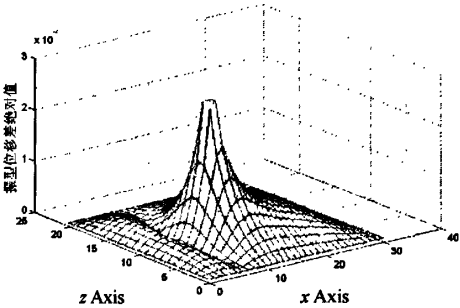


图 3.1 Damage 1 径向位移差图

3.2 利用曲率差绝对值进行损伤检测及其定位

曲率反映的是转角的变化率,而转角是反映位移的变化率.因此,若结构的某一部位出现损伤,则结构这一部位的曲率应该明显大于未损伤部分的曲率,它在曲率模态差曲面上表现为有陡峭或者尖峰的出现.

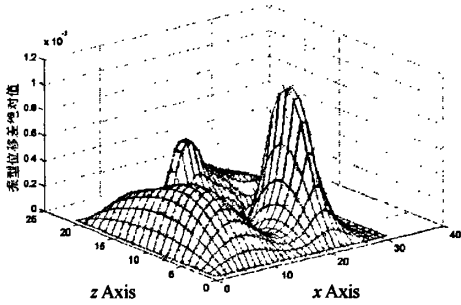


图 3.2 Damage 2 径向位移差图

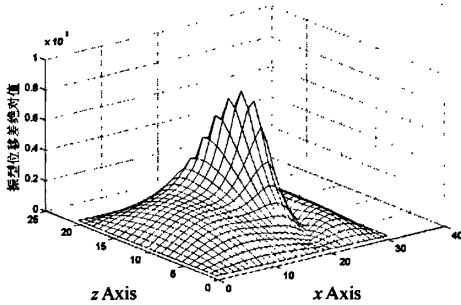


图 3.3 Damage 3 径向位移差图

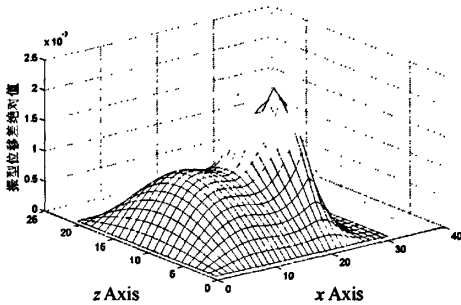


图 3.4 Damage 4 径向位移差图

图 3.5 的(a)、(b)、(c)分别为 Damage 1 的第一阶振型径向位移在 x 方向的曲率差、 z 方向的曲

率差和两方向曲率差之和的曲面图,可以看出,3 个图的曲面都出现了尖峰,通过尖峰定位出的坐标位置同 Damage 1 相符,说明 x 方向的曲率差、 z 方向的曲率差以及两方向曲率差之和都能有效地识别单个单元的损伤.图 3.5 的(a)、(b)、(c)分别为 Damage 2 的第一阶振型径向位移在 x 方向的曲率差、 z 方向的曲率差和两方向曲率差之和的曲面图.可以看出,3 个图都有陡峭带出现,图 3.6(a)中垂直于 x 方向的陡峭带较明显,图 3.6(b)中垂直于 z 方向的陡峭带较明显,而图 3.6(c)中垂直于两方向的陡峭带都比较明显.通过陡峭带定位其坐标与 Damage 2 比较可以得出,某一方向的振型曲率差可以很好地检测出与该方向垂直的损伤带,但对与该方向平行的损伤带识别较困难,仅对损伤带的端点有指示,而两方向曲率差之和可以有效地识别上述两种损伤带.图 3.7 的(a)、(b)、(c)分别为 Damage 3 的第一阶振型径向位移在 x 方向的曲率差、 z 方向的曲率差和两方向曲率差之和的曲面图.从 3 个图中都可以看到锯齿状的峰值图,通过尖峰定位出的坐标位置同 Damage 3 都相符,可见, x 方向的曲率差、 z 方向的曲率差以及两方向曲率差之和都能有效地识别出拱板斜方向的损伤带.图 3.8 的(a)、(b)、(c)分别为 Damage 4 的第一阶振型径向位移在 x 方向的曲率差、 z 方向的曲率差和两方向曲率差之和的曲面图.与图 3.6 相类似,图 3.8(a)可以有效地指示出垂直于 x 方向的损伤带,图 3.8(b)可以有效地指示出垂直于 z 方向的损伤单元,但图 3.8(c)只可以指示出大部分 Damage 4 的损伤单元,另外有一些损伤部位被漏判,造成这种状况的原因可能是因此阶模态的振型在部分损伤部位处刚好发生了扭曲,模态变形不是在 xz 平面内,因此当模态变形不在同一个平面内时,曲率差对损伤的检测失效.

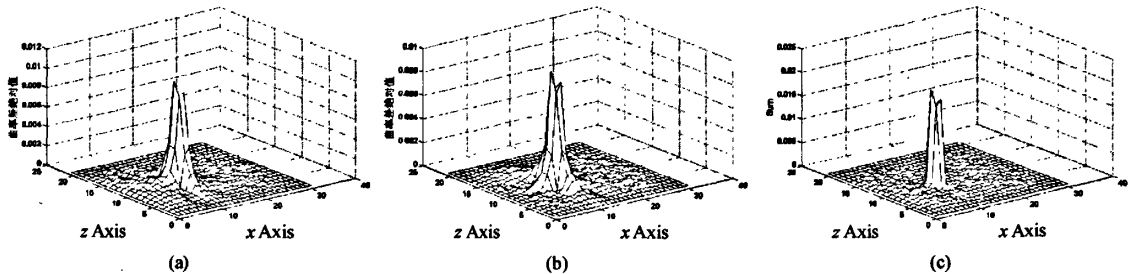


图 3.5 Damage 1 第一阶振型径向位移各方向曲率图

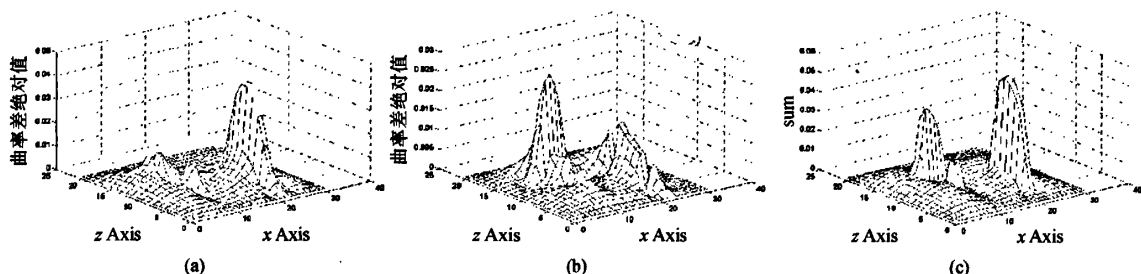


图 3.6 Damage 2 第一阶振型径向位移各方向曲率图

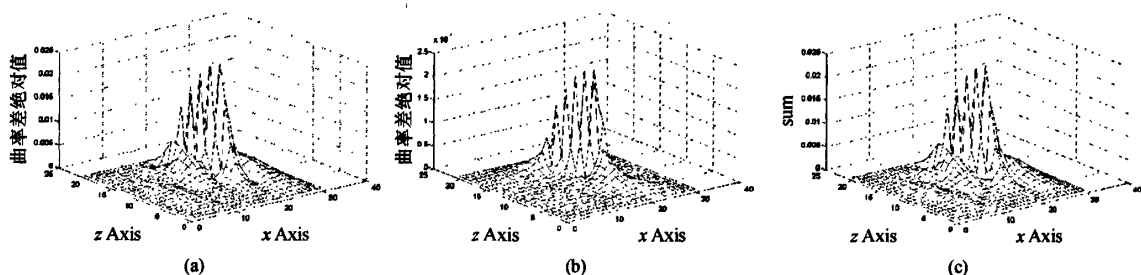


图 3.7 Damage 3 第一阶振型径向位移各方向曲率图

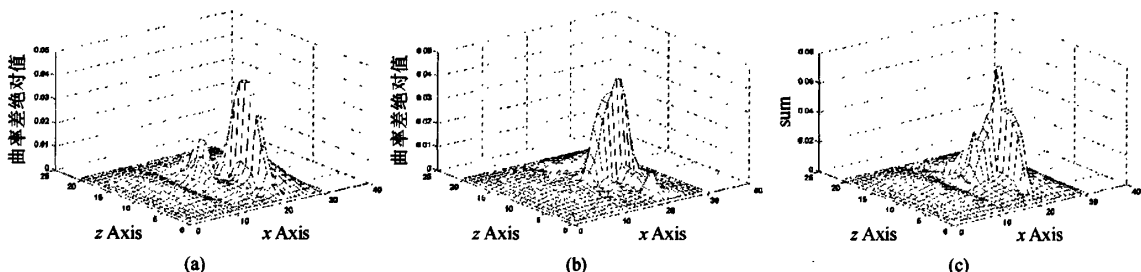


图 3.8 Damage 4 第一阶振型径向位移各方向曲率图

从图中可以看出虽然损伤程度相同,但在不同的区域,其峰值并不相同,说明曲率差的大小不仅与损伤的程度有关,还与该阶模态的振型函数等因素有关.需要说明的是,这里的曲率差是指拱板损伤前后振型曲率差的绝对值.

利用其他阶模态的振型曲率对拱板进行损伤检测时,同样可以得到上述结论.当然,用二阶以上的振型曲率来判断时,由于节点的存在而使得处于节点相邻的损伤难于有效判断.

4 基于转角位移进行拱板的损伤检测及定位

本文在柱坐标系下利用有限元进行数值模拟,

在取得径向位移的同时,也可以获得结构的角位移,而结构损伤时,不仅可以通过径向位移的突变来进行损伤识别,也可以通过转角位移的突变来对结构进行损伤识别.

4.1 利用转角位移差的绝对值进行损伤检测及定位

图 4.1~4.4 分别为拱板在 4 种损伤工况下的第一阶模态转角位移差的曲面图.可以看出所有图中都有峰值或陡峭带出现,说明拱板结构存在损伤,通过定位比较可以发现,图 4.1、4.2 可以有效地指示出 Damage 1 和 Damage 2 的损伤单元,但图 4.3、4.4 对 Damage 3 和 Damage 4 的损伤造成漏判并且显示比较模糊,可见,利用转角位移差和径向位移差对结构进行损伤识别的效果类似.

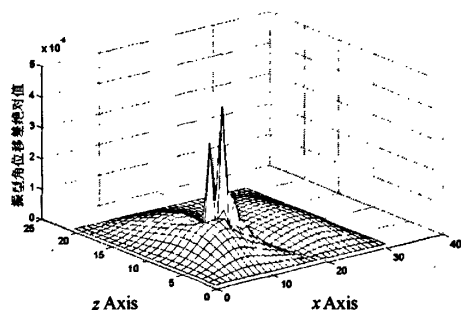


图 4.1 Damage 1 转角位移差图

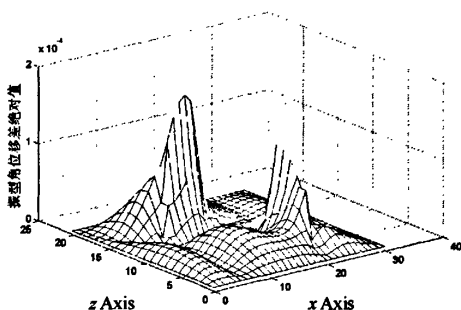


图 4.2 Damage 2 转角位移差图

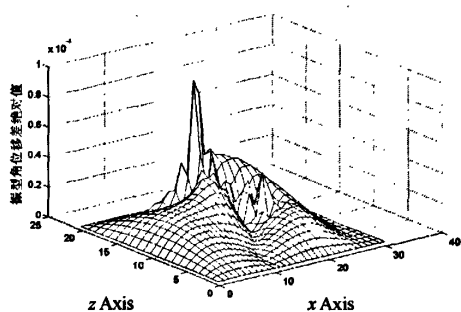


图 4.3 Damage 3 转角位移差图

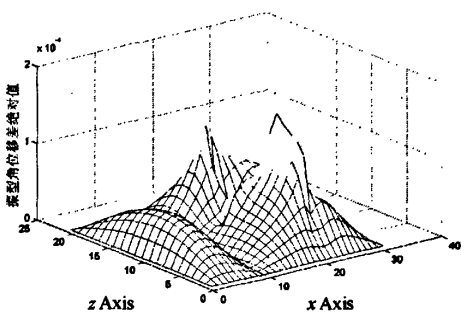


图 4.4 Damage 4 转角位移差图

4.2 利用转角位移二阶导数差进行损伤检测及定位

曲率反映的是转角的变化率,而转角的二阶导

数是反映曲率的变化率.结构的某一部位出现损伤时,其曲率的变化率就会出现突变,即在转角位移的二阶导数出现突变,可以利用这种突变来判断损伤的位置.

图 4.5 的(a)、(b)、(c)分别代表 Damage 1 一阶振型的转角位移在 x 方向二阶导数差、 z 方向二阶导数差和两方向二阶导数差之和的曲面图,三个图中都明显存在峰值,且峰值的定位与 Damage 1 相符,故转角位移二阶导数差对单个损伤单元的识别很敏感.图 4.6 的(a)、(b)、(c)分别代表 Damage 2 一阶振型的转角位移在 x 方向二阶导数差、 z 方向二阶导数差和两方向二阶导数差之和的曲面图,其结果与图 3.6 类似.可以得出,某一方向振型转角位移二阶导数差可以很好地检测出与该方向垂直的损伤带,但对与该方向平行的损伤带识别较困难,仅对损伤带的端点有指示,而两方向二阶导数差之和可以有效地识别上述两种损伤带.图 4.7 的(a)、(b)、(c)分别为 Damage 3 一阶振型的转角位移在 x 方向二阶导数差、 z 方向二阶导数差和两方向二阶导数差之和的曲面图,每个图中都出现大约六个峰值,其位置同 Damage 3 损伤单元的位置相符,只是各个峰值的大小并不相同,甚至相差很大,但并不影响转角位移二阶导数差对拱板斜向损伤带识别的有效性.图 4.8 的(a)、(b)、(c)分别为 Damage 4 一阶振型的转角位移在 x 方向二阶导数差、 z 方向二阶导数差和两方向二阶导数差之和的曲面图,图 4.8 (a)中出现两条垂直于 x 方向的陡峭带,再次验证了某一方向振型转角位移二阶导数差可以很好地检测出与该方向垂直的损伤带,但对与该方向平行的损伤带识别较困难这一结论,图 4.8(b)一部分结果图成“山”形,即在损伤区域内,一小部分的转角位移二阶导数差由较大的峰值,突然下降,然后又突然增大,结合损伤区域和板的模态振型图,我们可以发现,当损伤区域与模态图的节线相交的地方,二阶导数差就很小,这说明转角位移的二阶导数在节线处,对损伤识别的灵敏度不高,所幸的在不同的模式下,其节线的位置并不相同,所以,只要用几个低阶模态,就能准确地识别出拱板域内所有的损伤.图 4.8 (c)能有效地识别出 Damage 4 的损伤状况,可见两方向二阶导数差之和对拱板复杂损伤带的识别较敏感.需要说明的是,这里的转角二阶导数差是指拱板

损伤前后转角二阶导数差的绝对值. 检测,也同样可以得到上述结论.
利用其他阶模态转角二阶导数对拱板进行损伤

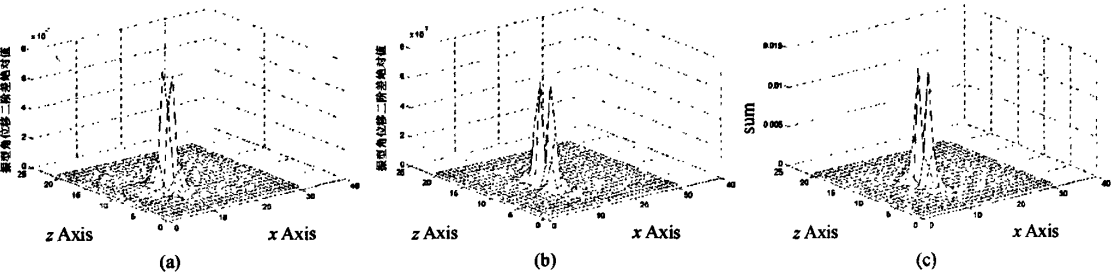


图 4.5 Damage 1 第一阶振型转角位移各方向二阶导数图

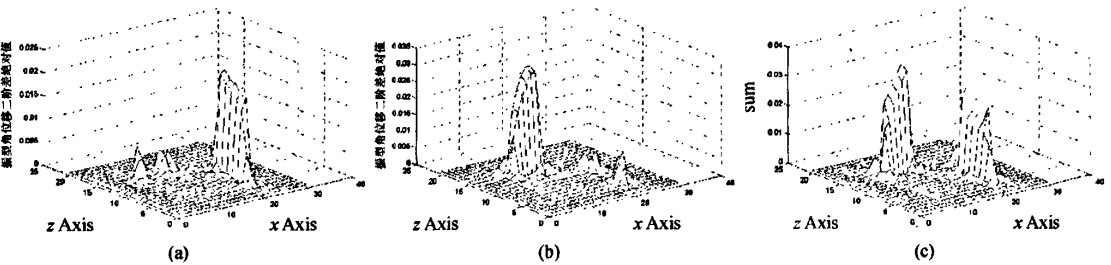


图 4.6 Damage 2 第一阶振型转角位移各方向二阶导数图

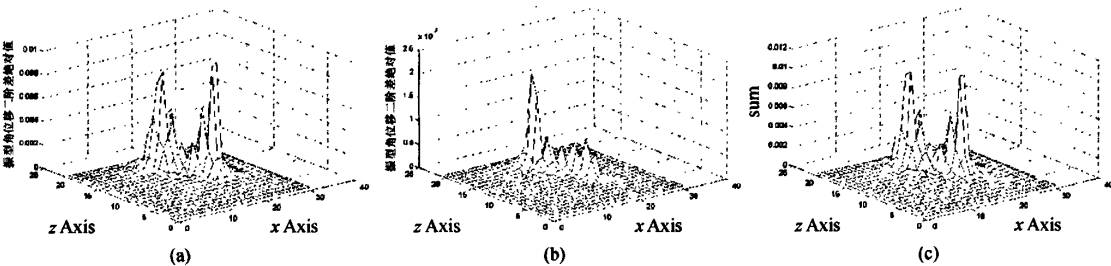


图 4.7 Damage 3 第一阶振型转角位移各方向二阶导数图

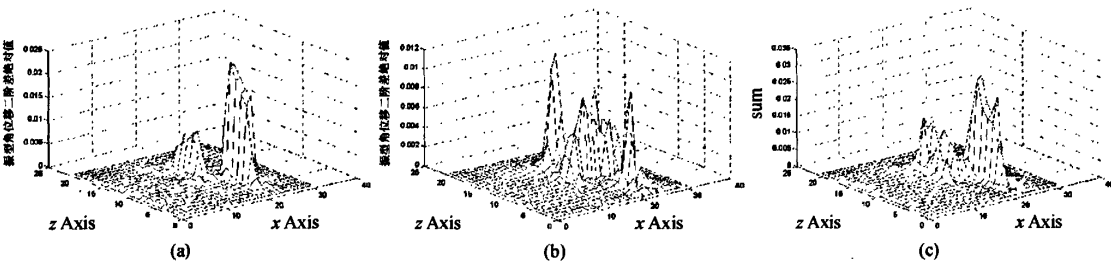


图 4.8 Damage 4 第一阶振型转角位移各方向二阶导数图

5 结论

通过上述对拱板结构损伤识别的分析,得到以下结论:

(1) 通过有限元对拱板结构进行数值模拟检测发现,直接利用径向位移差和转角位移差可以对简单的损伤进行识别,某一方向的模态曲率差和振型转角位移二阶导数差可以有效地检测出与该方向垂直的损伤带,但对与该方向平行的损伤带的识别比较困难,仅对损伤带的端点有所指示;两方向模态曲率差和转角位移二阶导数差之和对拱板结构的损伤很敏感,可以有效地识别损伤单元。

(2) 由于振型节线的存在,利用二阶以上的某阶位移特征参数、转角特征参数一般无法检测出该阶振型节线处的损伤。

(3) 当拱板的损伤比较复杂时,转角特征参数比位移特征参数更加敏感。

本文对结构进行损伤识别时,需要结构在无损伤状态下的原始振型,而实际测量时是不可能测得无损伤时的模态参数的,怎样合理地布置节线,如何利用有损伤的模态参数来反演结构的无损伤的模态参数,是一个值得研究的问题。另外,本文利用中心差分方法来近似求取拱板曲率,虽然降低了数值的精确度,但并没有影响损伤的识别效果,本文的目的就是寻找合理的方法对拱板结构进行损伤识别。

[参考文献]

- [1] 马宏伟,杨桂通. 结构损伤探测的基本方法和研究进展[J]. 力学进展,1999,29(4):23-33.
- [2] ALLEMANY R J, BROWN D L A. Correlation coefficient for modal vector analysis[J]. In Proceedings of the 1 MAC,1982, (45),110-116.
- [3] PANDY 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.
- [4] 王志华,张向东,马宏伟. 基于应变曲率法的悬臂梁多位置损伤识别研究[J]. 工程力学(增刊),2003,(20):434-438.
- [5] 王志华,程载斌,张立军,等. 对结构多位置损伤进行定位分析的方法探讨[J]. 太原理工大学学报,2004,35(3):289-293.
- [6] 李国强,梁远森. 振型曲率在板类结构动力检测中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2004,24(2):111-116.
- [7] 李建康,张春利,解辛辛. 板类结构动力检测与控制中的一种新方法[J]. 动力学与控制学报,2005,3(3):73-77.
- [8] KRISHNAN A, DHARMAJ S, SURESH Y J. Free vibrations of arches[J]. Journal of Sound and Vibration,1995,(186) 856-863.
- [9] TONG X, MRAD N, TABARROK B. In-plane vibration of circular arches with variable cross-sections[J]. Journal of Sound and Vibration,1998,(212):121-140.
- [10] CERRI M N, RUTA G C. Detection of localized damage in plane circular arches by frequency data[J]. Journal of Sound and Vibration,2004,(270):39-59.
- [11] 韩西,钟厉,王志坚. 利用模态试验和有限元分析对拱结构进行损伤识别[J]. 仪器仪表学报,2005,23(4):21-24.
- [12] 唐孟华,赵俊. 基于曲率模态的拱结构损伤识别方法研究[J]. 广州建筑,2008,36(1):10-14.
- [13] 项海帆,刘光栋. 拱结构的稳定和振动[M]. 北京:人民交通出版社,1991:192-195.

[责任编辑:刘蔚媛]