

变刚度复杂梁结构损伤检测方法研究*

冯侃, 励争, 高桂云, 苏先樾

(北京大学 工学院 力学与空天技术系, 湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京 100871)

(胡文瑞推荐)

摘要: 提出了适用于复杂梁结构损伤检测的子段模态应变能法 SSEM (subsection strain energy method), 并分析了该方法的适用性条件. 通过对变截面梁的有限元计算, 以及对纤维增强复合材料风机叶片缩比模型的试验分析, 验证了 SSEM 方法确定的结构损伤指标对损伤准确定位的可靠性. 该基于振动的变刚度复杂梁结构的损伤检测方法, 可应用于工程实际中梁和类梁整体结构的损伤检测.

关键词: 损伤检测; 模态应变能; 变刚度梁; 纤维增强复合材料; 风机叶片

中图分类号: O321; O327 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2011.04.008

引 言

随着科学、工业的迅猛发展, 航空航天、国防工业、机械制造等诸多领域对结构损伤检测的需求越来越多. 无损检测技术在工程领域中的推广应用, 不仅可以提高结构的安全性能, 延长服役时间, 降低维修成本, 而且更能有效预防由于结构破坏导致的灾难性事故. 目前, 国内外较常采用的无损检测技术包括 C-scan、声发射、超声波检测等. 但这些方法主要针对结构局部区域的损伤进行检测, 并且很难用于实时、在役条件下整体结构的损伤评估. 而基于振动模态识别的方法可以对工程结构的整体^[1], 包括表面和内部, 进行损伤检测, 因此受到了广泛的关注.

Ratcliffe^[2]在对一维梁损伤定位时, 提出了一种基于拟合曲线与实际测量值误差以判定损伤位置的方法 (gapped smoothing method, GSM). Yoon 等将该方法推广到二维情形^[3]. 虽然该方法仅需测量损伤情况下的振型, 不需要与健康状态下的参数进行比较, 但是测量精度不高. Wang 和 Qiao^[4]将 GSM 法与 ULS (uniform load surface) 结合, 提出 SGSM (simplified gapped-smoothing method) 方法. 此外, 一些先进的信号处理方法, 也被应用到基于振动的损伤检测方法中. 如应用连续小波变换处理振动信号, 提取损伤信息^[5], 或采用 HHT 方法进行损伤定位^[6]等. Ghoshal 等^[7]曾尝试利用激励器和压电片激振, 通过分析传递函数、比较振型等方法,

* 收稿日期: 2011-01-25; 修订日期: 2011-02-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2007CB714603)

作者简介: 冯侃(1985—), 男, 江苏人, 博士生 (E-mail: campbell_feng@126.com);

励争(1964—), 女, 教授(联系人, E-mail: lizheng@pku.edu.cn).

对风机叶片中的损伤进行定位,但是,目前将基于振动的无损检测法应用于大型复杂梁或类梁结构的损伤检测工作还有待进一步发展.

Stubbs 等^[8]提出了一种基于模态应变能的损伤检测方法 SEM (strain energy method).该方法与前面介绍的工作不同,不需要结构的具体材料、几何尺寸等信息,只需测得结构的前几阶振型即可求出相应的损伤指标,进而准确判断损伤位置.虽然 SEM 方法具有明确的物理意义,而且可对材料和几何信息不确定的梁结构进行损伤评估,但该方法只适用于均匀的等截面梁,极大地限制了该方法在工程实际中的应用.本文基于振动模态分析的技术,改进 SEM 方法,提出 SSEM(subsection strain energy method)方法,以适用于变刚度梁或类梁结构的损伤检测.

1 子段模态应变能方法(SSEM, subsection strain energy method)

1.1 子段模态应变能方法(SSEM)

基于 Bernoulli-Euler 梁理论,长为 l 梁的弯曲应变能由下式给出:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx, \tag{1}$$

其中, EI 是梁的截面抗弯刚度, w 是截面弯曲挠度. 对于第 i 阶固有振型 $\varphi_i(x)$, 其应变能为

$$U_i = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx. \tag{2}$$

对于变刚度梁,先沿梁长进行分段,分为 N_d 子段(图 1),使得每一子段上的抗弯刚度可以近似认为常数. 这样,对于第 j 子段,第 i 阶模态的应变能为

$$U_{ij} = \frac{1}{2} \int_{a_j}^{a_{j+1}} (EI)_j \left(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx \approx \frac{1}{2} (EI)_j \int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx. \tag{3}$$

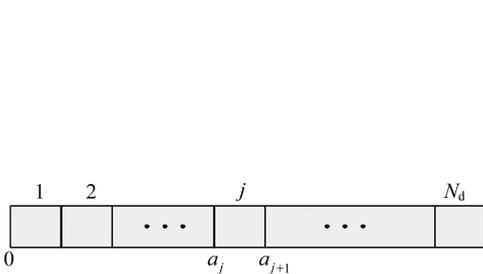


图 1 梁分为 N_d 子段

Fig. 1 A beam divided into N_d elements

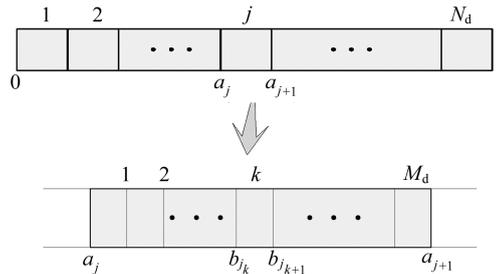


图 2 对每一子段进行细分

Fig. 2 Subdivision of the j th subsection

对于每一子段,再进行细分,分为 M_d 小段(见图 2),则可以得到在第 i 阶模态下,第 j 子段上第 k 小段的应变能为

$$U_{ij_k} = \frac{1}{2} \int_{b_{j_k}}^{b_{j_{k+1}}} (EI)_k \left(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx \approx \frac{1}{2} (EI)_k \int_{b_{j_k}}^{b_{j_{k+1}}} \left(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx. \tag{4}$$

若定义系数 f_{ij_k} 为

$$f_{ij_k} = \int_{b_{j_k}}^{b_{j_{k+1}}} \left(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx / \left(\frac{1}{2} (EI)_j \int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx \right). \tag{5}$$

假设在健康和含损伤的梁中, EI 在第 j 子段上沿着梁长度方向均是常数且近似相等, 则有

$$\frac{f_{i_{j_k}}^*}{f_{i_{j_k}}} = \frac{\int_{b_{j_k}}^{b_{j_{k+1}}} \left(\frac{\partial^2 \varphi_i^*}{\partial x^2} \right)^2 dx / \left(\frac{1}{2} (EI)_j \int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\frac{\partial^2 \varphi_i^*}{\partial x^2} \right)^2 dx \right)}{\int_{b_{j_k}}^{b_{j_{k+1}}} \left(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx / \left(\frac{1}{2} (EI)_j \int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx \right)} \approx \frac{\int_{b_{j_k}}^{b_{j_{k+1}}} \left(\frac{\partial^2 \varphi_i^*}{\partial x^2} \right)^2 dx / \left(\int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\frac{\partial^2 \varphi_i^*}{\partial x^2} \right)^2 dx \right)}{\int_{b_{j_k}}^{b_{j_{k+1}}} \left(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx / \left(\int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx \right)},$$

其中 $()^*$ 表示存在损伤的结构模态参数。

考察前 m 阶模态, 定义第 j 子段上第 k 小段的损伤指标为

$$\beta_s \equiv \beta_{j_k} = \frac{\sum_{i=1}^m f_{i_{j_k}}^*}{\sum_{i=1}^m f_{i_{j_k}}}. \quad (6)$$

上式中为了方便表示, 将损伤指标缩减为 β_s , 其中下标 $s = (j-1) \times M_d + k$, $j = 1, \dots, N_d$; $k = 1, \dots, M_d$, 故 β_s 一共包含 $N_d \times M_d$ 项。由式(6) 计算出的 β_s 可以看作损伤引起的结构模态应变能改变的分散度, 进而确定损伤产生的位置。

通过将 β_s 标准化后, 可以定义第 s 小段结构标准化的损伤指标为

$$Z_s = (\beta_s - \bar{\beta}_s) / \sigma_s, \quad (7)$$

其中 $\bar{\beta}_s$ 和 σ_s 为 β_s 的平均值和标准差。

本文提出的子段模态应变能 SSEM 方法同 Stubbs 提出的 SEM 方法^[8] 相比, 改进之处有以下几点:

1) 式(5)定义了与 SEM 方法^[8] 不同的基于模态应变能的系数 $f_{i_{j_k}}$ 。SEM 方法假设每一小段与整体梁的模态应变能之比在健康和含损伤情况下保持不变。这一假设欠合理。

2) 先分子段(见图1), 只要子段划分合理, 是可以近似满足每一子段上梁的抗弯刚度近似相同。这样, 对于变刚度梁的问题通过子段划分便可以分析。然而, SEM 方法要求整个梁都需要满足抗弯刚度相同。对于梁这种细长杆件, 这一条件只有在均质等截面梁中能够实现。

3) 式(7)定义的损伤指标不需要已知梁的材料和几何的具体信息, 因而可以适用于复杂梁的损伤评估。而 SEM 方法的等刚度条件限制了其只适用于材料、几何很简单的均质等截面梁问题的分析。

1.2 SSEM 方法的适用性分析

本文以典型的刚度呈线性变化的均匀梯形梁(图3)为例, 说明 SSEM 方法在变刚度梁中的适用性。若已知梁长度为 L , 根部截面刚度为 $EI(0)$, 端部截面刚度为 $EI(L)$ 。设

$$EI(L) = k \times EI(0) \quad (0 \leq k \leq 1), \quad (8)$$

其中, k 为截面刚度变化系数, 则梁的刚度分布为

$$EI(x) = \frac{EI(L) - EI(0)}{L} x + EI(0) = EI(0) \left(\frac{k-1}{L} x + 1 \right).$$

梁的弯曲应变能为

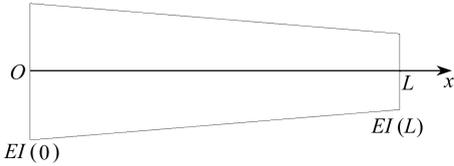


图3 梯形变截面梁

Fig. 3 A trapezoid beam

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx = \frac{1}{2} EI(0) \int_0^L \left(\frac{k-1}{L} x + 1 \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx,$$

式中 w 为弯曲挠度。

若不考虑截面变化,将梁当做均匀刚度计算,取抗弯刚度为 $EI(0)$, 则应变能为

$$U' = \frac{1}{2} EI(0) \int_0^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx.$$

采用 U' 代替 U 产生的相对误差为

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{|U - U'|}{U} = \frac{\left| EI(0) \int_0^L \left(\frac{k-1}{L} x + 1 \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx - EI(0) \int_0^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx \right|}{EI(0) \int_0^L \left(\frac{k-1}{L} x + 1 \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx}.$$

经整理得到

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{- \int_0^L \left(\frac{k-1}{L} x \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx}{\int_0^L \left(\frac{k-1}{L} x + 1 \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx} = \frac{1}{1 - \left\{ \int_0^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx / \left(\int_0^L \left(\frac{1-k}{L} x \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx \right) \right\}}.$$

由于 $(1-k)x/L$ 单调上升且非负,由积分第二中值定理可知

$$\int_0^L \left(\frac{1-k}{L} x \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx = \frac{1-k}{L} L \int_c^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx = (1-k) \int_c^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx,$$

式中 $c \in [0, L]$, 则有

$$\frac{\Delta U}{U} = - \frac{1}{1 - \left\{ \int_0^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx / \left((1-k) \int_c^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx \right) \right\}}.$$

显然

$$\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 \geq 0,$$

有

$$\int_0^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx / \left[\int_c^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx \right] \geq 1,$$

则可以得到

$$\frac{\Delta U}{U} \leq - \frac{1}{1 - 1/(1-k)} = \frac{1-k}{k}. \quad (9)$$

式(9)表明,在分段情况下,只需每个子段保证 $k > 0.9$, 则将刚度线性变化的梁当作等刚

度梁计算,其模态应变能误差小于 10%,即可采用 SSEM 法对其损伤进行定位。

2 变刚度梁损伤检测的计算分析

本文利用 ANSYS 有限元程序对均匀变截面含裂纹梁做有限元振动分析(图 4)。梁长 $L = 1$ m,厚 0.005 m,梁宽从 0.04 m 到 0.1 m 线性变化。已知材料的弹性模量为 3.6 GPa,Poisson 比为 $\nu = 0.33$,密度为 $\rho = 1\ 076$ kg/m³。考虑在下底端(图 4 左端)固支的悬臂梁情况。设定裂纹位置在距离固支端 0.3 m 处,长度为 0.01 m,宽度 0.002 m。通过有限元方法计算出该悬臂梁的前 6 阶弯曲振型。

首先,我们将梁整个分为一个子段,这相当于将整个梁看作等刚度梁,即等同于 SEM 方法。从式(8)可知梁的刚度变化系数 $k = 0.4$,反映出梁的整体抗弯刚度变化明显。我们再将这一子段等分为 100 个小段,采用式(7)计算出损伤指标 Z_s ,如图 5 所示。

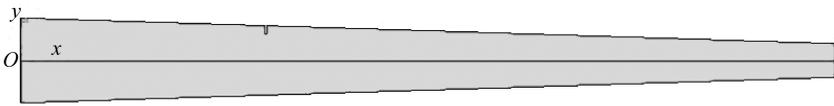


图 4 变截面梁损伤检测

Fig.4 Damage detection in a beam with varying stiffness

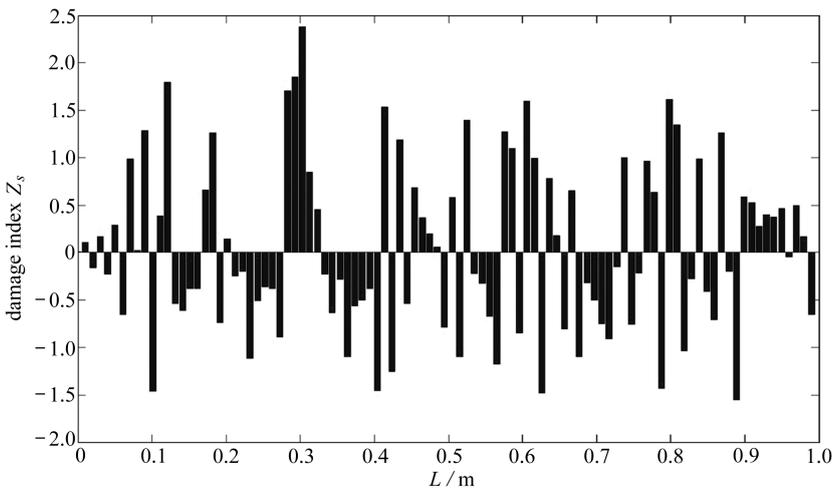


图 5 SEM 方法计算变刚度悬臂梁损伤指标

Fig.5 Damage index calculated by SEM

图 5 中的结果表明,采用 SEM 方法计算变刚度悬臂梁的损伤指标会存在多处损伤指标峰值,难以确定损伤的位置。

若我们将整个变刚度悬臂梁沿轴向等分为 10 个子段,然后将每个子段再等分为 10 个小段。此时由式(8)可知,梁中每一个子段中的截面刚度变化 $k > 0.9$ 。根据 SSEM 方法的式(7)计算出的损伤指标 Z_s ,如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,在位于距固定端的 29.3% 处存在明显的损伤指标峰值。而实际损伤位置在距固定端 30% 处,相对误差为 0.7%。因此,有限元计算结果表明,在对于截面刚度变化很大的梁结构中,子段的合理划分使得 SSEM 方法比 SEM 方法能够更有效地判定损伤的位置。

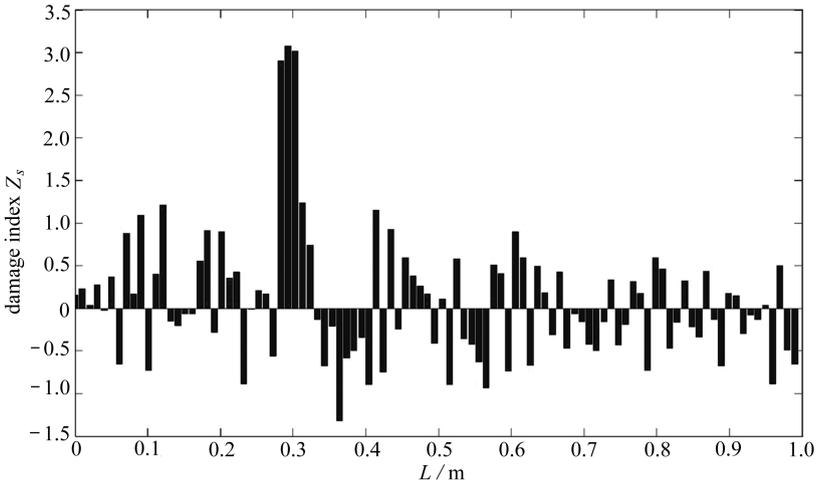


图6 SSEM方法计算变刚度悬臂梁损伤指标

Fig. 6 Damage index calculated by SSEM

3 复合材料风机叶片模型损伤检测的试验分析

由于大型风机叶片的长细比较大,可将叶片简化为变截面刚度的复合材料梁进行分析。本文选取1:40,长为1.02 m的风机叶片缩比模型(图7)。叶片模型悬臂固定于ZDT15-10型精密光学平台上。利用Type 4 810 激振器对结构一点施加激励,并连接CL-YD-312压电力传感器采集输入的力信号。选用PSV-400扫描式激光测振仪系统(SLDV, scanning laser doppler vibrometer)对结构中被测区域选取的19个测点(图7)进行测振。同传统的加速度传感器相比,SLDV系统的非接触式测量将减小对结构的附加影响,提高检测精度。考虑到试件选取的材料对激光的反射率比较弱,我们在试件的被测表面喷涂上一层反光漆,以提高激光信号反射强度。在激光测振的过程中,对每个测点至少读取3次测量值取平均,以减少测量误差,提高精度。



图7 复合材料风机叶片模型及测点布置

Fig. 7 Composite wind turbine blade and the testing points

考虑到结构损伤往往会产生局部的质量改变,我们在叶片背面粘贴附加质量,模拟局部损伤(图8),并分别进行健康和含损伤叶片模型的振动模式分析。模拟损伤的位置大约为距离固支端30%处,是风机叶片最容易发生屈曲等损伤的位置之一^[7]。

从振动响应信号及输入力信号计算得到的频响函数曲线上(图9),我们可以看出,含损伤模型的固有频率与健康叶片模型相比有明显差别,尤其在高阶模态情形。这说明仅通过频响函数的测定,便可以判断结构中是否含有损伤。但若要对损伤准确定位,还需要对模态振型作进一步分析。为了消除部分测量误差,并得到更多的振型数据点,我们对测得的振型数据进行多项式数据拟合。多项式数据拟合的另一个好处是可以使得振型曲线足够光滑,以便进行数据处理。图10为拟合后的前6阶健康和损伤模型的振型图。通过多项式拟合后的数据相对于原始

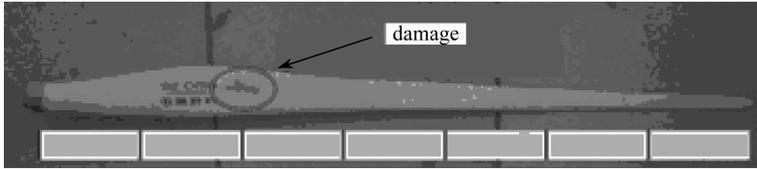


图8 损伤位置及划分示意图

Fig. 8 The damage location and the subsection

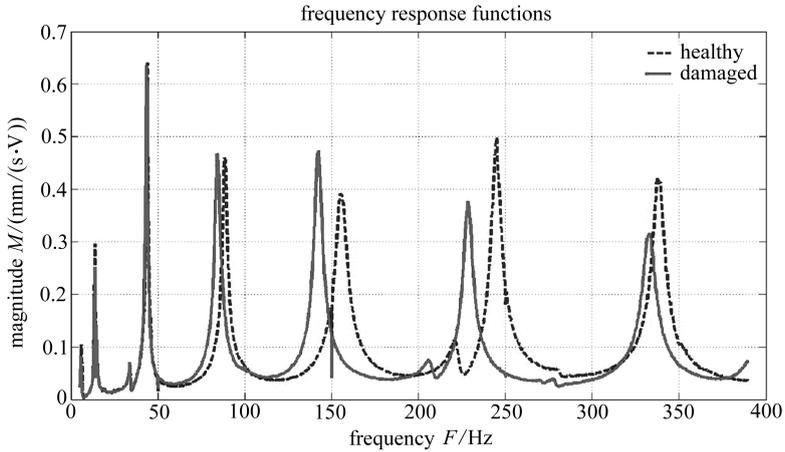


图9 健康及损伤情况下的频响函数

Fig. 9 FRF of healthy and damaged structure

数据点的相对误差小于 0.2%，这说明拟合后的结果可以保证实验数据的精度。

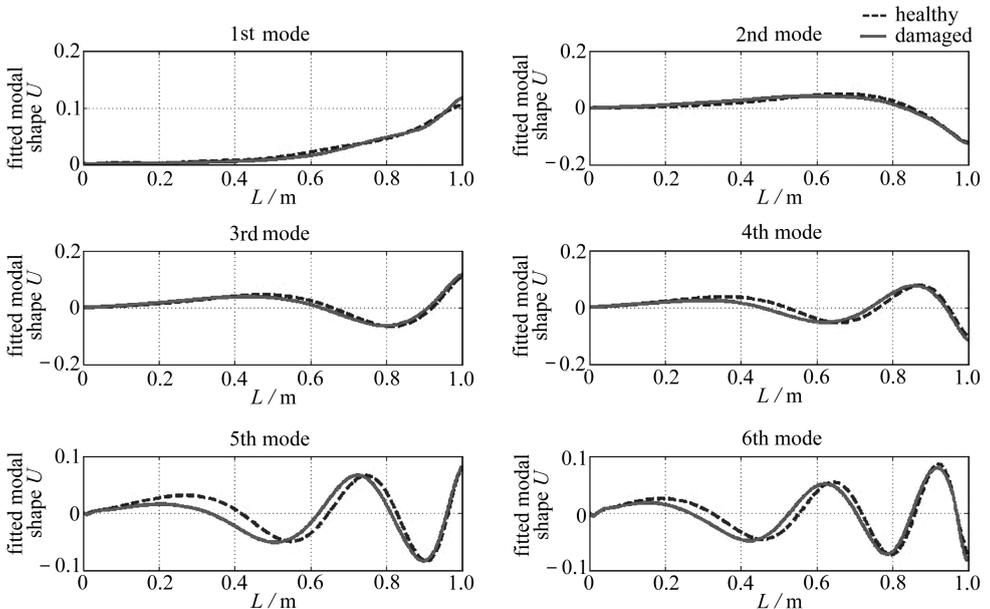


图10 拟合后前6阶健康及损伤振型曲线

Fig. 10 The modal shapes of both healthy and damaged models from the 1st to the 6th mode

通过对比损伤前后的振型曲线我们可以看出,损伤的存在可以导致振型发生变化.尤其在高阶情况下(5、6阶振型),损伤位置附近的振型幅值变化非常明显.为了对损伤位置进行精确

定位,我们分别采用 SEM 与 SSEM 方法对前 6 阶振型进行分析,计算出相应的损伤指标.

我们先将风机叶片模型沿梁长等分为 70 小段,分析前 6 阶振型的模态应变能.利用 SEM 方法^[8],将整个叶片看作等刚度梁,计算损伤指标 Z_s , 如图 11 所示.

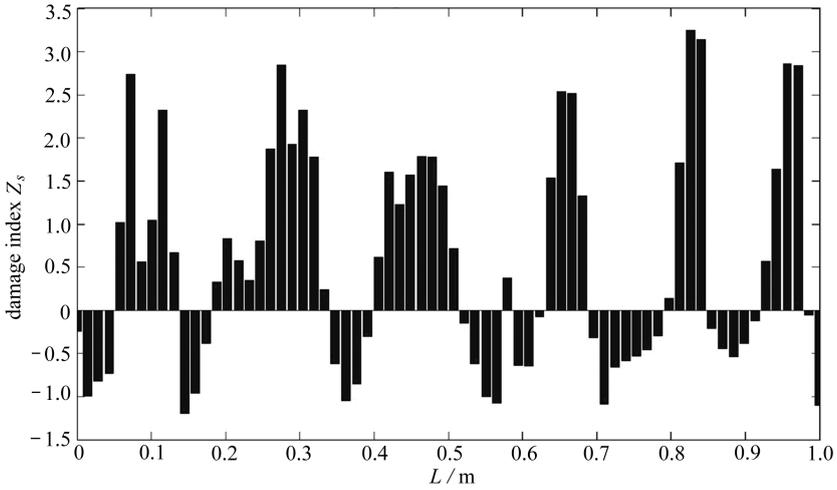


图 11 SEM 方法得到的损伤指标 Z_s (共分 70 段)

Fig. 11 Damage index calculated by SEM(contains 70 elements)

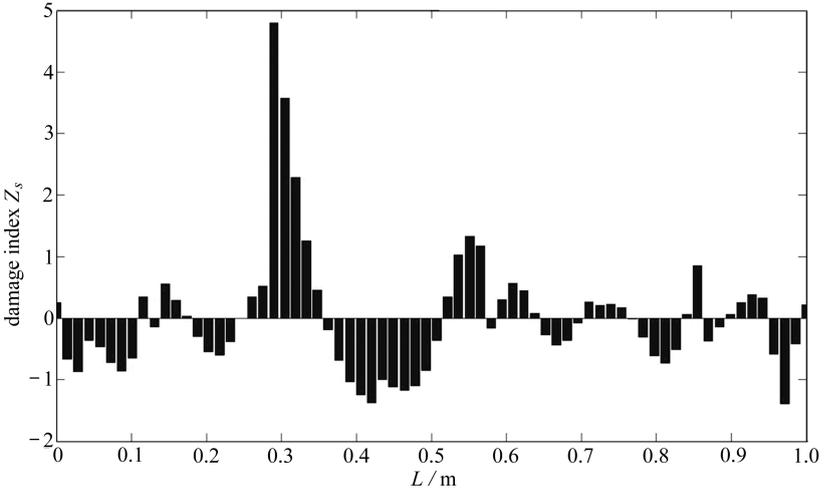


图 12 SSEM 方法得到的损伤指标(共分 7×10 段)

Fig. 12 Damage index calculated by SSEM(contains 7×10 sub-elements)

虽然在损伤处(约 30% 处)的损伤指标存在峰值,但由于 SEM 方法的理论局限,使得损伤指标在其他无损伤位置也存在峰值.这将引起对结构损伤的误判,无法对损伤进行准确定位.同样将风机叶片模型沿梁长等分为 70 小段,但对该 70 小段进行分组.我们先将整个叶片模型沿轴向等分为 7 个子段,每个子段再等分为 10 个小段(见图 8).根据公式(7)中的 SSEM 方法计算出的损伤指标 Z_s , 如图 12 所示.

从图 12 中损伤指标 Z_s 最大幅值点,我们可以确定损伤位于梁长距固定端的 29.0% 处.而实际损伤位置在距固定端 27.4% 处(图 8),相对误差为 1.6%.在无损伤处,损伤指标也存在一定幅值,其产生的原因较复杂.由于叶片模型弯曲刚度的变化梯度较大,在 SSEM 方法中将

每一子段的刚度近似为常数会引入一定误差。在实际测量中,测量本身以及数据拟合也会产生一些误差。但无损伤处的损伤指标值相对损伤处的峰值很小,并不影响对损伤位置的准确判断。

4 结 论

本文提出了针对变刚度梁结构损伤检测的 SSEM 方法,并在理论上分析了其适用性。通过计算及试验的结果分析,得出以下结论:

1) 对于变刚度梁结构的损伤检测问题,SEM 方法很难对结构损伤进行有效定位;而 SSEM 方法则可以很好地消除由于截面刚度变化带来的影响,能更可靠地判定损伤位置,并能显著提高损伤定位精度。

2) 根据适用性条件(公式(9)),可以预估变刚度梁结构所需划分的子段数;在保证损伤定位精度的前提下,可以提高该方法使用的效率。均匀线性变化截面梁的有限元计算结果,说明了子段划分对检测结果的影响。

3) 由公式(7)可以看出,SSEM 方法不需要结构材料、几何尺寸等信息,只需测得结构的各阶振型即可求出结构的损伤指标。因此,该方法将非常方便地应用于实际非均匀、复杂梁或类梁结构的损伤检测中。

4) 大型风机叶片模型是内含腹板的薄壳结构,结构复杂,材料具有复杂的非均匀性和各向异性等特性,对其进行无损检测难度非常大。尤其作为非均匀结构,缺少相应的数据分析方法。然而,采用 SSEM 方法,在没有具体材料和结构几何信息的条件下,可以准确判定复合材料风力机叶片的损伤位置。

5) 在本文提出的一维梁结构的 SSEM 损伤检测方法的基础上,我们可以将其推广到二维和三维的情形,实现对实际大型复杂结构的损伤检测。

参考文献:

- [1] Farrar C R, Doebling S W. An overview of modal-based damage identification methods[C]// *Proceedings of the DAMAS Conference*, Sheffield, UK, 1997.
- [2] Ratcliffe C P. Damage detection using a modified Laplacian operator on mode shape data[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, **204**(3): 505-517.
- [3] Yoon M K, Heider D, Gillespie J W, Ratcliffe C P, Crane R M. Local damage detection using the two-dimensional gapped smoothing method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, **279**(1/2): 119-139.
- [4] Wang J L, Qiao P Z. Improved damage detection of beam-type structures using uniform load surface[J]. *Structure Health Monitor*, 2007, **6**(2): 99-110.
- [5] Fan W, Qiao P Z. A 2-D continuous wavelet transform of mode shape data for damage detection of plate structures[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, **46**(25/26): 4379-4395.
- [6] Chen H G, Yan Y J, Jiang J S. Vibration-based damage detection in composite wingbox structures by HHT[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, **21**(1): 307-321.
- [7] Ghoshal A, Sundaresan M J, Schulz M J, Pai P F. Structural health monitoring techniques for

- wind turbine blades[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, **85**(3): 309-324.
- [8] Stubbs N, Kim J T, Farrar C R. Field verification of a nondestructive damage localization and sensitivity estimator algorithm [C]//*Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference*. Nashville, Tennessee, USA, 1995: 210-218.

Damage Detection Method in Complicated Beams With Varying Flexural Stiffness

FENG Kan, LI Zheng, GAO Gui-yun, SU Xian-yue

(*State Key Laboratory for Turbulence and Complex Systems; Department of
Mechanics and Aerospace Engineering, College of Engineering,
Peking University, Beijing 100871, P. R. China*)

Abstract: A damage detection method for complicated beam-like structures was proposed based on the subsection strain energy method (SSEM), and its applicable condition was introduced. For a beam with continuously varying flexural stiffness and an edge crack, the SSEM was applied to detect the crack location effectively by numerical modal shapes. As a complicated beam, the glass fiber-reinforced composite model of a wind turbine blade was studied by an experimental modal analysis. The SSEM was used to calculate the damage index from the measured modal parameters, and to locate the damage position in the blade model successfully. The results indicate that the SSEM based on the modal shapes can be used to detect the damage in complicated beams or beam-like structures in engineering applications.

Key words: non-destructive testing; modal strain energy; varying flexural stiffness beam; fiber reinforced composite material; wind turbine blade