

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2009.04.009

基于基础激励的结构损伤检测局部损伤因子法

王山山¹, 万里波²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 云南省建筑科学研究院地基结构研究室, 云南 昆明 650223)

摘要:提出了基于振动理论的结构损伤检测局部损伤因子法。局部损伤因子法可同时判定结构损伤的存在, 反映结构损伤的程度及确定结构损伤的位置。局部损伤因子法考虑了结构本身非线性的影响和检测系统噪声的影响, 提高了结构损伤检测的精度。用局部损伤因子法检测结构损伤时只需要 2 个传感器同时工作即可, 测试仪器设备较少, 测试方便、经济, 适合于结构损伤的现场检测。模型实验表明, 在基础激励条件下局部损伤因子法对结构损伤检测是有效的。

关键词:结构损伤 损伤检测 基础激励 局部损伤因子 动力特性

中图分类号: TU311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)04-0405-05

结构是建筑物中起骨架作用并承受荷载的部分。结构在使用过程中由于各种原因会产生不同程度的损伤, 这些结构中存在的损伤会影响建筑物的正常使用, 严重的损伤还会产生灾难性的后果。结构损伤的检测可及时发现结构中存在的隐患, 并为处理和加固有损伤的结构提供依据。

结构的损伤会导致结构的动力特性及动力响应发生变化, 由此可通过检测结构动力特性及动力响应来确定结构的损伤。这种基于振动理论的结构损伤检测方法开始时主要利用频率、振型等模态参数来确定结构的损伤^[1-4]。由于这些模态参数是结构的全局参数, 对结构的损伤不敏感, 为提高结构损伤检测的精度, 又发展出改进的模态参数法、模态应变能法、直接利用结构动力响应的频响函数法等^[5-6]。对于结构而言, 损伤往往是从结构的部件或局部开始的, 因此对结构局部损伤的检测更为重要。上述方法虽然提高了损伤检测的精度, 但对结构局部的损伤则不敏感。Pandey 等^[7]采用曲率模态分析方法对简支梁和悬臂梁的损伤进行了研究, 结果表明曲率模态对局部参数变化较传统的模态分析方法更为敏感, 在结构的损伤检测及损伤定位中具有优越性。笔者对工程中常用的刚架结构, 采用数值计算和模型实验相结合的方法进一步研究, 结果表明曲率模态振型不仅对结构单个位置, 而且对多个位置同时发生损伤的检测依然有很好的效果^[8]。但这种方法主要适合于以受弯为主的结构, 对复杂结构则无能为力, 且这种方法在检测时需要较多的传感器。

针对结构局部损伤检测, 笔者提出了一种新的结构损伤检测方法——局部损伤因子法^[9], 并在立体框架结构模型中, 用实验的方法验证了该方法的正确性。根据局部损伤因子大小可判定结构损伤的存在和程度, 同时通过移动传感器的位置测定局部损伤因子的变化, 可以确定损伤的位置。在此因子中已考虑了结构本身非线性的影响和检测系统噪声的影响, 提高了结构损伤检测的精度。在线结构实时时只需要 2 个传感器同时工作即可, 测试仪器设备较少, 测试方便、经济, 适合于结构损伤的现场检测。但是在以前的研究中, 激励点都是处在结构上, 这给实际的应用带来一定的困难。因为现代结构正朝着大型化、复杂化的方向发展, 要在结构上施加足够能量的激励在实际操作中往往是一件困难的事情。这是因为一方面这需要功力很大的起振机, 另一方面这种大型设备的安装也不方便。现在对大型在线结构检测, 多采用环境激励的方法来研究结构的动力特性^[10], 取得了很好的效果。本文对使用环境激励的方法进行结构损伤检测的可行性进行了初步探讨。环境激励均处在结构的基础部位, 因此重点研究在基础激励情况下, 使用局部损伤因子法对结构的损伤进行检测的可行性及有效性。

收稿日期: 2008-06-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB714104) 国家自然科学基金(50608027)

作者简介: 王山山(1965—), 男, 安徽淮北人, 副教授, 博士, 主要从事结构损伤检测研究。

1 理论依据

设 $x(t)$ 为结构基础处的随机振动信号, $y(t)$ 为结构上的随机振动信号, 且 $x(t)$, $y(t)$ 均为各态历经的平稳随机过程^[7]. 定义 $x(t)x(t+\tau)$ 的数学期望为随机过程 $x(t)$ 在时刻 t 和 $t+\tau$ 之间的自相关函数. 即

$$R_{xx}(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)] \quad (1)$$

对于各态历经的平稳随机振动过程, R_{xx} 与 t 无关, 只是时差 τ 的函数. 故自相关函数为

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (2)$$

定义 $x(t)y(t+\tau)$ 的数学期望为 2 个随机过程 $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间的互相关函数. 即

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t+\tau)] \quad (3)$$

对于各态历经的平稳随机振动过程, R_{xy} 与 t 无关, 只是时差 τ 的函数. 故互相关函数为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \quad (4)$$

定义平稳随机过程 $x(t)$ 的自相关函数的傅立叶变换为随机振动自功率谱密度函数 $S_{xx}(\omega)$, 即自功率谱密度为

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

同样定义平稳随机过程 $x(t)$ 和 $y(t)$ 互功率谱密度为

$$S_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (6)$$

由此可得 $x(t)$ 和 $y(t)$ 间的广义相干函数为

$$\eta_{xy}^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)} \quad (7)$$

$\eta_{xy}(\omega)$ 的大小表示结构部件与结构基础之间的线性程度. $\eta_{xy}(\omega) = 1$ 时表明结构部件与结构基础之间完全线性, $\eta_{xy}(\omega) = 0$ 时表明结构部件与结构基础之间完全非线性, $0 < \eta_{xy}(\omega) < 1$ 表明结构部件与结构基础之间有不同程度的非线性. 由于结构局部或部件发生损伤时, 表现为结构局部或部件的刚度下降, 从而使结构部件与结构基础之间非线性程度增大, 这就预示着可根据系数 $\eta_{xy}(\omega)$ 的大小来检测结构的损伤.

为了消除因结构本身非线性影响和检测系统噪声的影响, 设结构无损伤时系数为 $\eta_{xy}(\omega)_i$, 令

$$\beta_i = 1 - \eta_{xy}(\omega)_i \quad (8)$$

则 β_i 表示完好无损伤结构部件与基础之间因结构本身非线性和检测系统噪声而产生的影响, 称为系统影响系数.

设 $\eta_{xy}(\omega)_d$ 为具有损伤结构部件与基础之间的系数, 令

$$\alpha_1 = 1 - \eta_{xy}(\omega)_i + \beta_i \quad (9)$$

则有

$$\alpha_1 = 2 - \eta_{xy}(\omega)_i - \eta_{xy}(\omega)_d \quad (10)$$

或

$$\alpha_1 = 2 - \frac{|S_{xy}(\omega)_i|}{\sqrt{S_{xx}(\omega)_i S_{yy}(\omega)_i}} - \frac{|S_{xy}(\omega)_d|}{\sqrt{S_{xx}(\omega)_d S_{yy}(\omega)_d}} \quad (11)$$

式中: $S_{xx}(\omega)_i$, $S_{xx}(\omega)_d$ ——完好与损伤结构的随机振动信号 $x(t)$ 的自功率密度; $S_{yy}(\omega)_i$, $S_{yy}(\omega)_d$ ——完好与损伤结构的随机振动信号 $y(t)$ 的自功率密度; $S_{xy}(\omega)_i$, $S_{xy}(\omega)_d$ ——完好与损伤结构的随机振动信号 $x(t)$, $y(t)$ 的互功率密度. 定义 α_1 为局部损伤因子(LDF).

由 α_1 的定义并通过立体框架结构损伤检测的实验可知^[7], 根据局部损伤因子的大小变化可判定结构损伤的存在, 同时还可反映结构局部损伤的程度. 移动传感器的位置, 还可以确定 α_1 在何处发生突变, 从而可以确定损伤的位置.

2 实验研究与分析

2.1 实验方法

本文采用实心柱和质量块的组合结构来代表承台、高桩码头、厂房等结构.杆件采用等截面直杆,长度为 500 mm,截面尺寸为 12 mm × 12 mm.质量块采用 80 mm × 80 mm × 80 mm 的立方体.杆的一端与质量块一面的中心焊接在一起,另一端作为整个结构的基础.材料均为钢材 Q235,弹性模量 $E = 200 \text{ GPa}$,密度 $\rho = 7\,800 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\mu = 0.3$.结构的损伤用距结构基础 400 mm 处、宽 1 mm,深分别为 1 mm,3 mm,5 mm,7 mm 的裂缝来模拟.环境激励由 DY-300-2-60 电动振动系统产生的施加于结构基础的随机激励来模拟.激励的功率谱密度的大小为 $0.3 (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^2/\text{Hz}$,激振频率带宽为 50 ~ 300 Hz.振动的响应由安装在结构基础处及杆上距基础 450 mm 处(裂缝上方 50 mm)的 2 只 CL-YD-301 型压电晶体加速度计记录.数据采集系统为 DH5920 型多通道并行动态数据采集仪.图 1 为实验模型及传感器安装示意图.

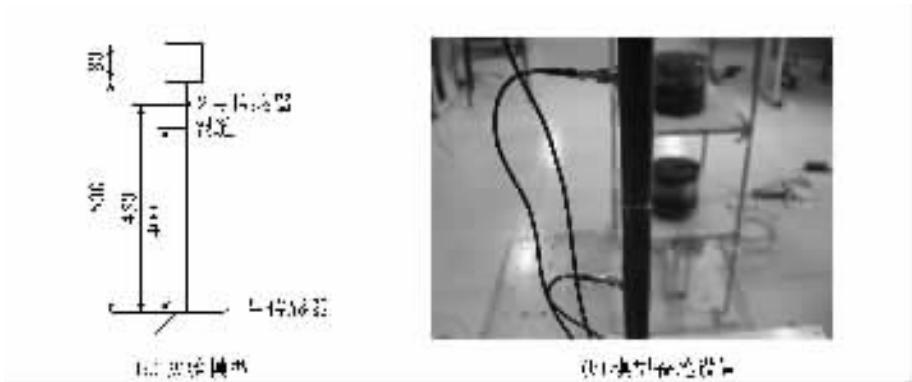


图 1 实验模型及传感器安装示意图(单位:mm)
Fig. 1 Model and arrangement of transducers

2.2 实验结果及分析

图 2 是在设置宽 1 mm、深为 1 mm 裂缝的结构上用功率谱密度为 $0.3 (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^2/\text{Hz}$ 、频率带宽为 50 ~ 300 Hz 激振时的典型响应时程曲线.其他实验结果的时程曲线与此类似.

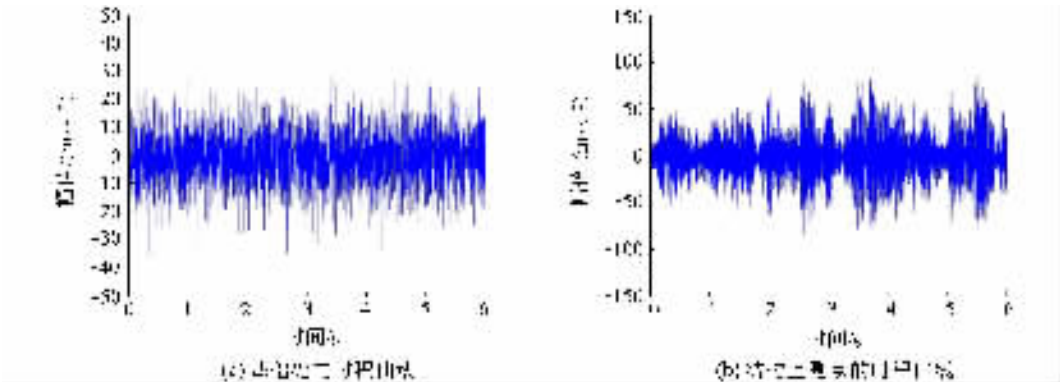


图 2 典型的实验结果
Fig. 2 Experimental results

由以上实验结果,根据式(9~11)可计算出结构损伤的局部损伤因子.图 3 给出了结构在不同裂缝深度的局部损伤因子曲线.

从图 3 可以看出,完好结构(裂缝深度为 0)在激励频带上的局部损伤因子的值均为零.裂缝深度为 1 mm 时局部损伤因子的最大值为 5%,对应频率为 97 Hz.裂缝深度为 3 mm 时最大值为 8%,对应频率为 95 Hz.裂缝深度为 5 mm 时最大值为 12%,对应频率为 182 Hz.裂缝深度为 7 mm 时最大值为 29%,对应频率为 154 Hz.图 3 的结果证实了在基础激励条件下用局部损伤因子法检测结构损伤的有效性.

从图 3 还可发现,在基础激励条件下,最大局部损伤因子对应的频率是会发生变化的.根据式(5)计算出当裂缝深度为 3 mm 时,结构裂缝上方传感器振动响应的自功率谱,如图 4 所示.

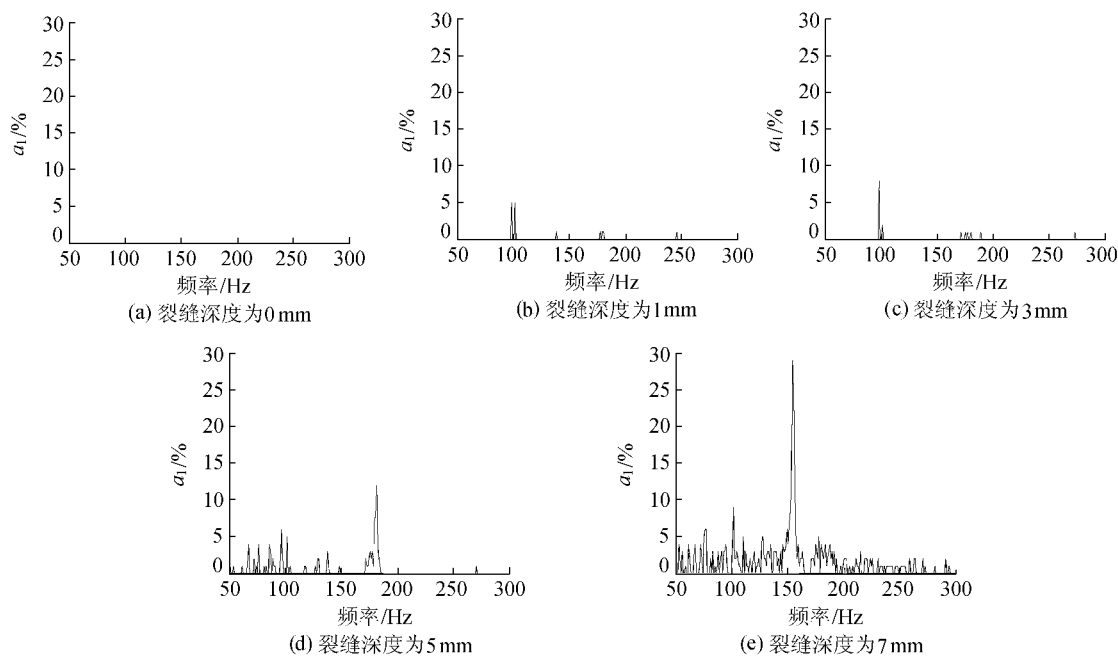


图 3 不同损伤时结构的局部损伤因子

Fig. 3 LDF values of structure with cracks of different depths

从图 4 可知,结构在 94.73 Hz,279.30 Hz 产生共振,此对应为两阶弯曲模式.综合图 3 与图 4 可知,在结构损伤程度较小时,如裂缝深度为 1 mm 和 3 mm 时,局部损伤因子最大值发生在激励频带中结构共振频率附近.当结构损伤程度较大时,如裂缝深度为 5 mm 和 7 mm 时,局部损伤因子最大值出现的频率与结构的共振频率无关.进一步的数值分析可知,此时由于截面刚度削弱较多,局部损伤因子最大值出现在扭振模式.图 5 为对应于裂缝深度为 5 mm 和 7 mm 时,局部损伤因子最大值出现时模式所对应的扭振振型图.

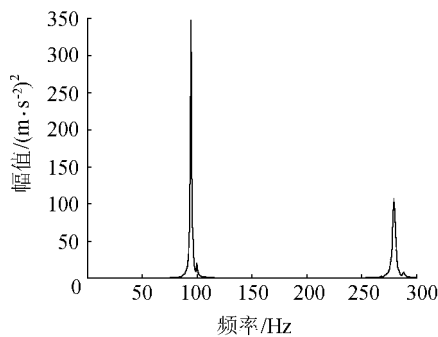


图 4 损伤结构响应的自功率谱

Fig. 4 Auto spectra of damage structure responses

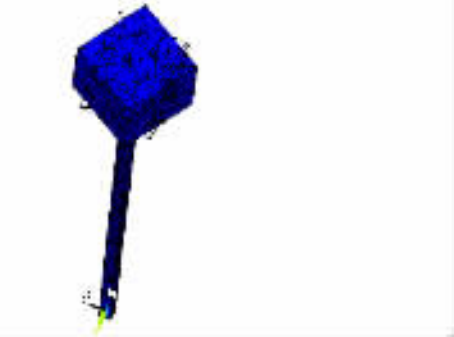


图 5 结构的扭振振型图

Fig. 5 Mode shape of structural torsional vibration

由以上分析可知,局部损伤因子最大值在频域中出现的位置不是固定不变的,随着结构损伤程度的不同,局部损伤因子的最大值出现在不同的振动模式.

3 结 论

结构的损伤改变了结构的动力特性和动力响应,振动测试可以检测出这些改变.基于振动理论的结构损伤检测的局部损伤因子法可判定结构损伤的存在,同时还可反映结构局部损伤的程度.通过移动传感器的位置测定局部损伤因子的大小,可以确定损伤的位置.由于局部损伤因子中已考虑了结构本身非线性的影响和检测系统噪声的影响,所以提高了结构损伤检测的精度.检测时只需要 2 个传感器同时工作,测试仪器设备较少,测试方便、经济,适合于结构损伤的现场检测.通过模型实验进一步证实,局部损伤因子法对基于基础激励的结构损伤检测是有效的.由于基础激励与现场测试常常使用的环境激励都是各态历经的平稳随机过程,这为实际现场结构损伤检测使用局部损伤因子法提供了保证.

参考文献：

[1] HEARN G, TESTA R B. Modal analysis for damage detection in structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1991,117(10) 3042-3063.

[2] SALAWN O S. Detection of structural damage through changes in frequency : a review[J]. Engineering Structures, 1997,19(9) 718-723.

[3] 王山山, 任青文. 黄河大堤防渗墙质量无损检测方法研究[J]. 河海大学学报 :自然科学版, 2004,32(4) 405-409.

[4] 王山山, 任青文. 基于振动理论的水工结构无损检测技术研究综述[J]. 河海大学学报 :自然科学版, 2004,32(5) 550-556.

[5] THYAGARJAN S K, SCHULZ M J, PAI P E, et al. Detecting structural damage using frequency response functions[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998,210(1) 162-170.

[6] CARDEN E P, FANNING P. Vibration based condition monitoring : a review[J]. Structural Health Monitoring, 2004,3(4) 355-377.

[7] PANDEY M B, SAMMAN M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2) 321-332.

[8] 王山山, 任青文. 基于曲率模态振型的刚架结构损伤检测[J]. 动力学与控制学报, 2005,3(2) 81-86.

[9] WANG Shan-shan, REN Qing-wen, QIAO Pi-zhong. Structural damage detection using local damage factor[J]. Journal of Vibration and Control, 2006,12(9) 955-973.

[10] YAM L H, LEUNG T P, LI D B, et al. Use of ambient response measurements to determine dynamic characteristics of slender structures [J]. Engineering Structures, 1996,18(3) 145-150.

Structural damage detection using local damage factor
method based on base excitation

WANG Shan-shan¹, WAN Li-bo²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Foundation Structure Department of Yunnan Institute of Building Research, Kunming 650223, China)

Abstract : The local damage factor (LDF) method for structural damage detection based on the vibration theory was introduced. The LDF method could be employed to simultaneously determine the presence, severity and location of potential structural damage. The influence of structural nonlinearity and system noise was considered in the LDF method. Thus, the accuracy of damage detection was improved. Structural damage detection using the LDF method needs less equipment (only two transducers), and it is convenient, economical and suitable for the field. The experimental results show that structural damage detection using the LDF method based on base excitation is effective.

Key words : structural damage ; detection ; base excitation ; local damage factor ; dynamic characteristics