

基于动力特性的木地板损伤检测

张建中

(北京林业大学 工学院, 北京 100083)

摘要: 由于役木地板结构在使用过程中会发生局部开裂等损伤从而对木地板结构的安全产生不利影响, 因此对木地板结构进行健康监测十分重要, 而识别木地板的损伤位置与损伤程度则是结构监测的关键。为实现木地板结构损伤的定位与定量, 将木地板结构简化成简支梁, 从梁的受迫振动方程出发, 利用振型叠加法计算损伤前后简支梁在简谐激励下的响应, 以单元刚度的降低来模拟梁的局部损伤, 通过引入损伤系数矩阵, 利用结构损伤前后的固有频率和未损伤结构的振型数据计算刚度影响系数, 进行损伤位置与损伤程度的判定, 克服了频率作为全局量在损伤识别应用上的不足。数值模拟结果表明, 该方法能够快速准确地识别出木地板结构的单一位置和多个位置的局部损伤, 并且对模拟测量噪声不敏感, 因此该方法为木地板结构损伤识别提供了一条可靠的途径。

关键词: 木地板损伤; 损伤检测; 刚度影响系数

中图分类号: TB122

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2014)-02-0217-04

Damage Detection of Simply Supported Beam Based on Dynamic Response

ZHANG Jian-zhong

(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Assume there are different damage positions and extents in wood floor structure, and put the wood floor structure as simply supported beam. Vibration model addition method was used for the forced vibration analysis of wood floor structures. Natural frequencies of structures before and after damage and vibration mode data of undamaged beam were used to calculate the stiffness influence coefficients which be used to detect the location and the level of the local damage(s). It is found that the local damage(s) can be identified successfully from the stiffness influence coefficients. These results have important significance in detecting and recognizing the structural damage of wood floor structures.

Key words: wood floor damage; damage detection; stiffness influence coefficients

木地板结构损伤识别是其结构健康监测系统的核心, 而识别损伤的程度与损伤定位又是木地板结构损伤检测系统的关键^[1]。基于动力特性的结构损伤检测技术的关键问题在于选取一个可测、易测、对结构损伤敏感的参数^[2-4]。用于损伤识别的物理量可以是全局量, 但用于损伤定位的物理量则必须是局域量, 并满足对局部损伤敏感和位置坐标的函数这两个基本条件^[5-6]。较常用的损伤识别参数有结构的固有频率、位移模态振型、应变模态振型以及振型曲率等。在木地板结构损伤检测方面, L. A. Sol-

tis^[7]等研究了木地板结构的振动特性, 研究发现自由振动试验简单易行, 但获得的信号不强, 受迫振动能够获得连续的强信号, 但是不能直接获取阻尼数据。M. O. Hunt^[8]等研究了原位木地板系统的性能特点。

当结构发生损伤时, 其刚度和质量均发生变化。基于固有频率变化进行损伤识别时, 忽略结构质量的变化, 仅考虑损伤引起的结构刚度的降低, 导致结构的固有频率降低, 因此可以通过比较结构损伤前后固有频率的变化来识别结构的损伤^[9]。一方面,

基于固有频率变化的损伤检测方法的优点是:固有频率在结构模态参数中最容易测得,且具有较高的精度^[10],用固有频率的改变量作为判别指标相对于振型更为准确^[11]。另一方面,将频率作为损伤指标也有以下一些缺点:结构各阶频率对各处损伤的敏感性不同^[12];作为结构广义刚度和广义质量的瑞利商,频率反映的是结构的整体动态特性,难以反映结构的局部损伤,因此,用单一或不完整的频率数据难以获得结构损伤的位置与程度信息^[13];由于高阶频率比低阶频率对损伤敏感^[14],而复杂结构的高阶频率难以测得导致损伤难以准确识别;不同位置、不同程度的损伤可能引起相同的频率变化^[15],从而不能确定损伤的位置。

在实际的木地板健康检测中,固有频率是最容易测得且精度较高的模态参数。为了克服频率不能作为局部损伤指标进行损伤定位及程度判别的不足,将木地板结构简化为简支梁,从梁的受迫振动方程出发,利用振型叠加法计算简支梁在简谐激励下的响应。将梁的局部损伤模拟为单元刚度的降低,通过引入损伤系数矩阵,利用结构损伤前后的固有频率变化和未损伤结构的振型数据直接计算刚度影响系数矩阵,进行损伤定位与损伤程度的定量判别。对木地板结构的单位位置和多位置局部损伤进行识别,数值模拟表明,本研究方法能够有效地识别出木地板的局部损伤。

1 理论分析

设有抗弯刚度为 EI ,单位体积质量为 ρ ,横截面积为 A ,长度为 L 的梁,忽略剪切变形和转动惯量及阻尼的影响,在外部激励 $f(x,t)$ 的作用下作弯曲振动。梁弯曲振动的微分方程为^[16]:

$$\rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}] = f(x,t) \tag{1}$$

设在给定边界条件下的固有频率为 ω_r ,相应的振型函数为 $Y_r(x)$,引进正则坐标 $q_r(x)$,下标 r 代表对应于第 r 阶固有频率,根据振型叠加法,可将式(1)和给定边界条件的解 $y(x,t)$ 变换为:

$$y(x,t) = \sum_{r=1}^N Y_r(x) q_r(t) \tag{2}$$

将式(2)代入式(1),得:

$$\sum_{r=1}^N \rho A Y_r(x) \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N \frac{d^2}{dx^2} [EI \frac{d^2 Y_r(x)}{dx^2}] q_r(t) = f(x,t) \tag{3}$$

式(3)两边同乘以 $Y_s(x)$,下标 s 代表对应于第 s 阶固有频率,在整个区间 $(0 < x < L)$ 内积分,并考

虑正交条件^[17]:

$$\int_0^L \rho A Y_r(x) Y_s(x) dx = \delta_{rs} \tag{4}$$

$$\int_0^L Y_s(x) \frac{d^2}{dx^2} [EI \frac{d^2 Y_r(x)}{dx^2}] dx^2 = \omega_r^2 \delta_{rs} \tag{5}$$

式中 δ_{rs} 为克朗尼格 δ 符号。

得到独立的常微分方程组为:

$$\ddot{q}_r(t) + \omega_r^2 q_r(t) = Q_r(t) \quad (r = 1, 2, \dots, N) \tag{6}$$

式 $Q_r(t) = \int_0^L f(x,t) Y_r(x) dx \quad (r = 1, 2, \dots, N)$ (7)

$Q_r(t)$ 定义为对应于正则坐标 $q_r(t)$ 的广义力。

对于边界条件为 $Y_r(0)=0, \frac{d^2 Y_r(0)}{dx^2}=0, Y_r(L)=0, \frac{d^2 Y_r(L)}{dx^2}=0$ 的简支梁,其正则振型函数为:

$$Y_r(x) = \sqrt{\frac{2}{\rho A L}} \sin \frac{r\pi x}{L} \tag{8}$$

如图 1 所示简支梁在 $x=x_1$ 处有一集中的简谐激励 $F_0 \sin \omega t$,该集中力可以表示为:

$$f(x,t) = F_0 \sin \omega t \delta(x-x_1) \tag{9}$$

式中: $\delta(x-x_1)$ 为 δ 函数, F_0 为激励的幅值, ω 为激励力的频率。

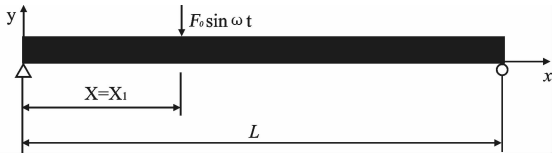


图 1 简支梁模型

Fig. 1 Simply-supported beam model

将式(9)代入式(7),于是广义力 $Q_r(t)$ 斜为:

$$Q_r(t) = \sqrt{\frac{2}{\rho A L}} F_0 \sin \frac{r\pi x_1}{L} \sin \omega t \tag{10}$$

设由于梁的损伤所引起的在损伤位置弹性模量的减少为:

$$E_d(x) = E(1 - \alpha) \tag{11}$$

式中: E_d 是损伤状态的有效弹性模量, α 与损伤分布状态有关,称之为刚度影响系数,当 $\alpha=1$ 代表梁完全损伤;当 $\alpha=0$ 则代表梁完好无损。假设损伤不引起质量的变化,且损伤沿梁的厚度均匀分布。将式(11)代入式(1),利用完好的正则振型,可以解得损伤梁的常微分方程组:

$$\ddot{\bar{q}}_r(t) + \omega_r^2 \bar{q}_r(t) - \sum_{r=1}^N \lambda_{rs} \bar{q}_r(t) = Q_r(t) \tag{12}$$

式中: $\bar{q}_r(t)$ 为含损伤梁的正则坐标,左边第 3 项反映出损伤的影响,将 λ_{rs} 定义为损伤系数矩阵:

$$\lambda_{rs} = EI \int_0^L \alpha Y''_r(x) Y''_s(x) dx \tag{13}$$

由上式可以看出,正则振型对抗弯刚度不再具有正交性,这是含损伤结构的一个重要特征。

由式(12)进一步得到未损伤梁固有频率 ω_r 和损伤梁的固有频率 ω_{rs} 存在如下关系:

$$\det[\omega_r^2 - \bar{\omega}_{rs}^2 \delta_{rs} - \lambda_{rs}] = 0 \tag{14}$$

由上式可知,损伤系数矩阵 λ_{rs} 依赖于损伤沿梁的分布情况,由刚度影响系数 α 确定。将梁分成 n 个单元,每个单元长度为 L/n ,设梁在第 i 个单元处存在沿厚度方向的损伤 α_i ,则(13)式可化为:

$$\lambda_{rs} = \sum_{i=1}^S (EI \int_{(i-1)L/n}^{iL/n} Y''_r(X) Y''_s(x) dx) \alpha_i = K_{rs} \alpha_i \tag{15}$$

忽略多处损伤之间的相互耦合影响,式(15)可以写成:

$$\lambda_{rs} = \sum_{i=1}^S (EI \int_{(i-1)L/n}^{iL/n} Y''_r{}^2(X) dx) \alpha_i = K_{rs} \alpha_i \tag{16}$$

将式(15)代入式(16),得到刚度影响系数矩阵

$$\alpha_i = K_{rs}^{-1} (\omega_r^2 - \bar{\omega}_{rs}^2) \tag{17}$$

至此,无论是通过试验测试还是理论计算,只要知道未损伤结构的固有频率以及振型数据和损伤结构的固有频率,通过式(17),就可以将结构局部损伤的损伤位置和损伤程度确定下来,在实际应用中,未损伤结构的固有频率和振型数据可以根据系统的参数通过有限元方法确定,只需要通过试验测得损伤结构的固有频率,即可通过式(17)计算出损伤的定位与定量。其计算流程如图 2 所示。

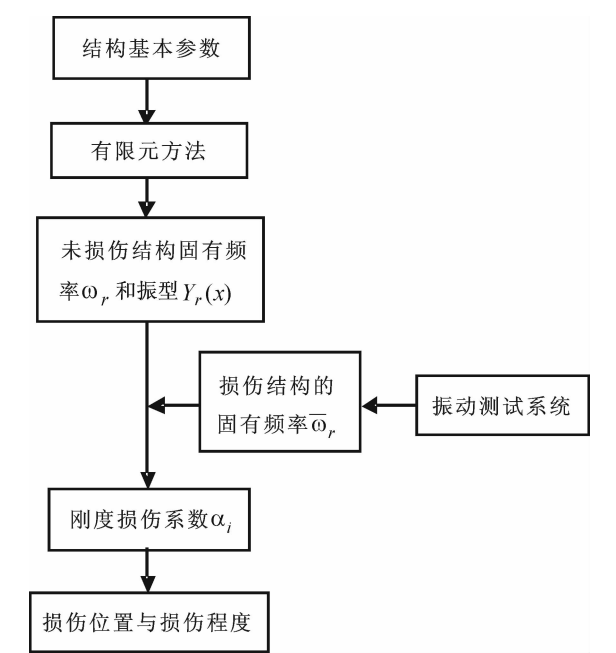


图 2 损伤识别计算流程

Fig. 2 Calculating frame chart of damage identification

2 数值模拟

考虑铺装工程木地板结构,将其简化成如图 1 所示的简支梁结构,经过有限元离散为 20 个均匀梁单元(图 3)。系统参数为:弹性模量 $E=20\text{GPa}$,密度 $\rho=830\text{ kg/m}^3$,长 $L=0.6\text{ m}$,横截面宽 $b=0.095\text{ m}$,高 $h=0.018\text{ m}$ 。外激励为简谐激励,其大小为 $F_{(1)}-10\sin\omega t$, $\omega=20\text{ Hz}$ 作用于第 11 号节点处。

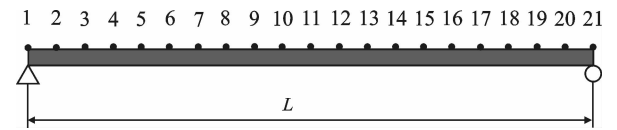


图 3 简支梁单元划分

Fig. 3 Element division of simply-supported beam

2.1 单位置损伤识别

研究单一损伤的识别,假定梁的第 7 号单元的刚度减少 50%来模拟局部损伤,结构完好时和损伤时的前 6 阶固有频率(表 1)。由表 1 可以看出,当梁结构存在局部损伤时,固有频率会降低。本文利用前 6 阶模态数据(固有频率和振型)来进行识别,不考虑模拟测量噪声的影响,将得到的刚度影响系数 α_i 作为识别指标(图 4)。

从图 4 可以看出,第 7 号单元的刚度影响系数 $\alpha_7=0.5$,而其他单元的刚度影响系数均为零,说明局部损伤被成功地识别出来,并且没有出现其他单元的误判。该模拟结果表明本此方法能够成功识别木地板结构的单一位置损伤。

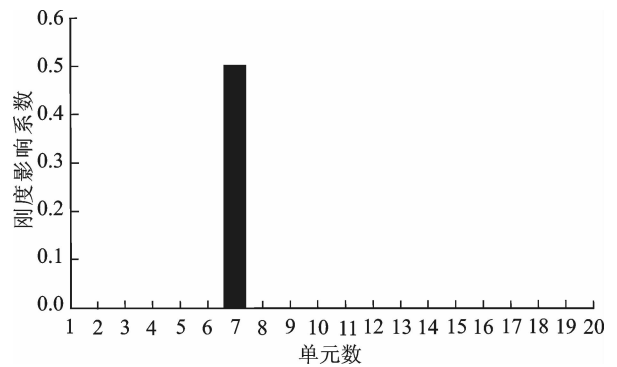


图 4 单位置损伤的识别

Fig. 4 Damage identification of single damage state

2.2 多位置损伤识别

研究多位置损伤的识别,假定梁的第 4 号和第 14 号单元的刚度分别减少 30%和 50%来模拟局部损伤。其前 6 阶固有频率也在表 1 中列出。同样不考虑模拟测量噪声的影响(图 5)。

从图 5 可以看出,第 4 号单元和第 14 号单元的刚度影响系数分别为 $\alpha_4=0.3$ 和 $\alpha_{14}=0.5$,而其他

单元的刚度影响系数均为零,说明两处局部损伤被成功地识别出来,并且没有出现其他单元的误判,做到了精确的定位与定量。该模拟结果表明,本文此法能够成功识别木地板结构的多位置局部损伤。

表 1 有无损伤时系统前 6 阶固有频率(H_z)的比较

Table 1 Comparison of the first six natural frequencies of damaged and undamaged structure

模态阶数	无损伤	单损伤	多损伤
1	111.29	107.44	106.87
2	445.18	429.63	422.50
3	1 001.69	1 000.51	980.77
4	1 780.91	1 730.51	1 710.18
5	2 783.09	2 694.23	2 682.67
6	4 008.76	3 991.52	3 983.71

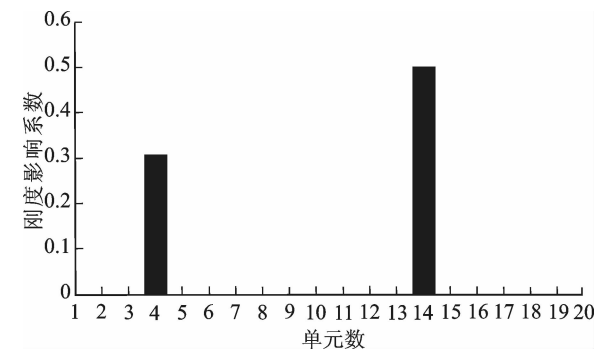


图 5 多位置损伤的识别

Fig. 5 Damage identification of multiple damage state

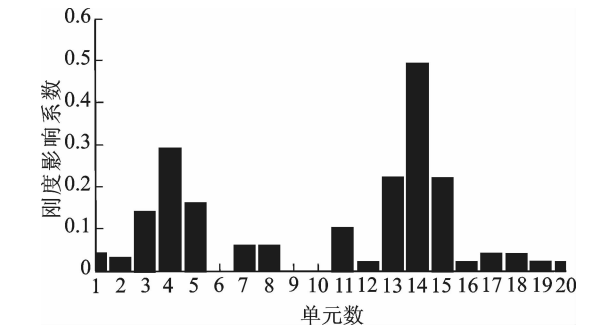


图 6 含 5% 噪声的多位置损伤识别

Fig. 6 Damage identification of multiple damage state with 5% noise

2.3 测量噪声对损伤识别的影响

研究测量噪声对损伤识别结果的影响,重新考虑多损伤的识别。在数值仿真中,将模拟所得的固有频率中增加 5% 的人工噪声来模拟实际的测量数据,经过计算(图 6)。

从图 6 可以看出,在 5% 的噪声水平下,第 4 号单元和第 14 号单元的刚度影响系数分别为 0.29 和 0.49,由于噪声的影响,出现了对其他未损伤单元的误判,误判单元多位于含损伤的单元周围,如 4 号单元两侧的 3 号和 5 号单元的刚度影响系数分别为 0.14 和 0.16,14 号单元两侧的 13 号和 15 号单元

的刚度影响系数均为 0.21,其他有误判的单元的刚度影响系数均 ≤ 0.1 ,虽然存在单元误判,但不会对损伤的判断产生不良影响,这表明此方法有一定的抗噪能力。

3 结论

基于结构损伤前后的固有频率变化和未损伤结构的振型数据的损伤检测方法,对梁结构的局部损伤进行识别。此方法具有以下特点:

在数值模拟中,利用损伤前后的前 6 阶固有频率和未损伤梁的振型数据,能成功识别出梁结构的局部损伤。

不论对于单位置损伤还是多位置损伤,本研究提出的方法都能快速地检测出损伤位置和损伤程度,具有较高的识别精度。具体地,对于损伤程度为 50% 的单一位置损伤,以及损伤程度分别为 30% 和 50% 的双位置损伤,利用方法提出的刚度影响系数均能做出完全准确的判别。噪声模拟结果表明,在 5% 的噪声水平下,该方法能够减小噪声对识别结果产生的不良影响,刚度影响系数能给出准确的损伤位置和损伤程度,表明该方法有一定的抗噪声能力。

参考文献:

[1] 邱增处,李增超,于瑛,等. 大规格木地板在生产应用中的变形及分析[J]. 西北林学院学报, 2001,16(4):69-71.
QIU Z C, LI Z C, YU Y, *et al.* Distortion of large-sized wood planking in production and application and its analysis[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2001, 16(4): 69-71. (in Chinese)

[2] 朱宏平,余璟,张俊兵. 结构损伤动力检测与健康监测研究现状与展望[J]. 工程力学, 2011,28(2):1-11.
ZHU H P, YU J, ZHANG J B. A summary review and advantages of vibration-based damage identifiactopm methods in structural health monitoring [J]. Engineering Mechanics, 2011,28(2):1-11. (in Chinese)

[3] 徐伟华,刘济科,吕中荣. 基于振动响应的弦结构损伤检测[J]. 振动与冲击, 2009,28(6):29-31.
XU W H, LIU J K, LV ZHONG R. Damage detection of string structure based on measured dynamic responses [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(6):29-31. (in Chinese)

[4] 朱晓冬,王逢瑚,曹军,等. 基于虚拟仪器的木材振动无损检测系统研究[J]. 西北林学院学报 2010, 25(5): 182-186.
ZHU X D, WANG F H, CAO J, *et al.* Nondestructive test system for wood vibration based on virtual instrument[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(5): 182-186. (in Chinese)