

# 开裂缺陷对木材振动性能的影响

钟旻良,秦丽丽,刘镇波\*

(东北林业大学 生物质材料科学与技术教育部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:**采用快速傅立叶变换频谱仪(FFT)对含天然缺陷的杨木木材试件进行试验模态分析,得出试件的6阶共振频率、每个敲击点的虚频图和一阶模态振型。通过分析虚频图、共振频率和一阶模态振型,与无开裂木材相比,开裂木材的共振频率更低。无开裂试件的虚频图在每阶共振频率处有且只有1个峰值,且虚频曲线平滑性良好。而对于含开裂缺陷的试件,位于开裂缺陷上的敲击点的虚频图在第4、第5、第6阶共振频率上会出现2个峰值,而其他无开裂的敲击点的虚频图在任何一个共振频率上都只有1个峰值。研究表明,可以通过共振频率、模态振型来检测木材开裂缺陷,通过每个敲击点的虚频图在共振频率上峰值的变化情况可以判断出开裂的位置。

**关键词:**天然缺陷;开裂;共振频率;虚频图;模态振型

**中图分类号:**S781.5      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2016)05-0261-06

## Influence of Crack on Vibration Properties of Wood

ZHONG Min-liang, QIN Li-li, LIU Zhen-bo\*

(Key Laboratory of Bio-based Material Science and Technology of National Ministry of Education,  
Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

**Abstract:** A fast Fourier transform (FFT) analyzer was used to conduct testing modal analysis on the popular specimens with natural defects to obtain six order resonance frequencies and imaginary frequency figures of every tapping point and the first modal shape. Through the analyses of the imaginary frequency figures, resonance frequencies and the first modal shapes, it was found that compared with specimens with no cracks, those with cracks showed smaller resonance frequency. The imaginary frequency figures of the wood without cracks showed only one peak at every resonance frequencies, and the imaginary frequency figures showed good smooth. But for the wood without crack, the imaginary frequency figures of point located on the crack showed two peaks at fourth, fifth and sixth resonance frequency. On the contrary, points not located on crack showed only one peak at any resonance frequency. The research demonstrated that it was possible to detect crack of wood through resonance frequency and modal shape. And the position of the crack could be located through the changes of peaks on imaginary frequency figures of every tapping point at resonance frequencies.

**Key words:** natural defect; crack; resonance frequency; imaginary frequency figure; modal shape

木材缺陷严重影响木材力学性能,不利于木材的合理利用<sup>[1]</sup>。木材缺陷的无损检测一直是中外学者研究的热点,国内外学者一直在探索新的更适合于木材检测的方法,获得了重要的成果<sup>[2-5]</sup>。

振动法是一种重要的木质材料无损检测方法,综合了传感器、电子学、信号分析、快速傅里叶变换(FFT)、现代结构振动理论,以及电子计算机技术等多方面的学术成果,形成了自身的理论和方法<sup>[6-7]</sup>。

收稿日期:2015-11-30    修回日期:2016-01-20  
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目资助(2572014CB02);哈尔滨科技创新人才专项基金研究项目(RC2012LX-002001)。  
作者简介:钟旻良,男,硕士,研究方向:木材无损检测。E-mail:minliang.zhong@foxmail.com  
\*通信作者:刘镇波,男,副教授,博士,研究方向:木材声学、木材物理学。E-mail:liu.zhenbo@foxmail.com

利用弯曲振动法,测出有缺陷和无缺陷木材的共振频率、木材弹性模量、衰减系数及阻尼等声学参数,分析结果验证了弯曲振动法检测木材缺陷的可行性<sup>[8-11]</sup>。X. J. MENG<sup>[12]</sup>等对具有不同孔洞位置的木材进行声学测试,从采样数据中提取时间—频率特征向量,对数据进行聚类分析,利用最大隶属度原则判断木材孔洞的位置,表明利用声学参数可以检测木材孔洞缺陷。X. Y. YANG<sup>[13-14]</sup>等研究了节子、孔洞缺陷对木材固有频率、弹性模量、模态振型的影响,研究表明节子、孔洞缺陷会降低木材弹性模量,含节子、孔洞的木材模态振型与无缺陷木材有明显的差异。申珂楠<sup>[15]</sup>等通过三点弯矩试验实际测量多种木材试样损伤与断裂信号,并针对不同种类信号的频谱特性得出木材在损伤断裂过程中的特点,实现了对木材损伤断裂过程的在线监控。研究结果表明,三点弯矩试验过程中信号呈现3种形态,可根据不同形态信号分析得出木材具体损伤断裂过程的阶段<sup>[15]</sup>。说明了木材发生断裂时的信号会发生明显的改变,换言之,可以通过信号的改变来判断木材内部结构是否发生断裂。

国内外研究中,对节子、孔洞缺陷研究较多,而对开裂的研究较少。开裂是木材纤维和纤维之间的

分离所形成的裂隙。树木在生长过程中,由于风引起树干的振动、形成层的损伤、生长应力、剧烈的霜害等自然原因或干燥等引起含水率的变化在树干内部产生应力,使木质部破坏后产生裂纹。采用含较多天然缺陷的杨木为试验材料,用FFT分析仪对杨木进行振动模态分析,分析开裂对振动模态虚频信号、频率和一阶模态振型的影响,以达到木材开裂定位检测的目的。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验采用的树种为杨木(*Populusussurien-sis*),杨木含有大量的节子和裂纹等天然缺陷。试验选取3块杨木方材,试件含水量为15%,试验前将试件放置在温度20℃、相对湿度65%的条件下6个月。将其加工成1 m×40 mm×40 mm的小方材。A组:Y-1、Y-2、Y-3,B组:Y-4、Y-5、Y-6,C组:Y-7、Y-8、Y-9分别从3块杨木方材A、B、C中加工得到。开裂长度为 $L_A>L_B>L_C$ ,其中Y-2有3处开裂,Y-3有2处开裂、Y-4有2处开裂,A组、B组试件均含有节子,且均为活节,C组是无缺陷试件。试件的规格尺寸如表1所示。

表 1 试件的规格尺寸

Table 1 Size of specimens

试件		长度/cm	宽度/mm	厚度/mm	质量/g	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	密度变异系数/%
A	Y-1	101	37.57	37.26	594	420.1	1.98
	Y-2	100	38.09	37.42	624	438.7	
	Y-3	98	37.89	37.59	611	437.7	
B	Y-4	100	38.26	36.98	626	442.4	1.25
	Y-5	100	37.88	37.78	615	429.7	
	Y-6	101	37.60	37.50	627	439.8	
C	Y-7	100	41.82	37.23	705	452.8	2.00
	Y-8	101	38.74	37.98	648	436.1	
	Y-9	101	37.47	37.25	644	456.8	

表1中,Y-2、Y-3、Y-4密度与其他无开裂试件的密度比较,表明开裂对密度的影响无明显规律。计算密度变异系数,3组试件密度变异系数最大为2.00%。由此可以排除密度变异对模态振型的影响。

表2为各个试件节子与开裂缺陷的位置和面积

(面积计算近似为圆)的相关信息,试件开裂宽度均约为1 mm,开裂长度用直尺测量,开裂深度用插入薄铁片的方法测量(铁片插入深度即为开裂深度),以开裂的长度和开裂的深度来表征试件开裂的程度。图1为Y-1、Y-2、Y-3、Y-4的实物图。

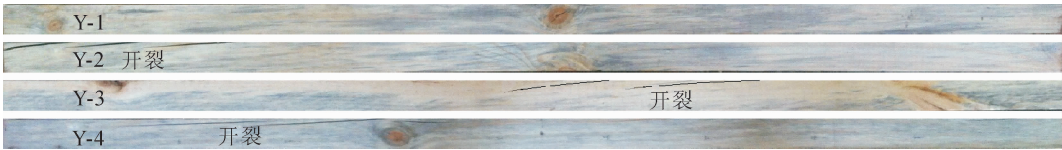


图 1 Y-1、Y-2、Y-3、Y-4 的实物

Fig. 1 Tangential section of Y-1, Y-2, Y-3 and Y-4

表 2 试件缺陷位置与面积  
Table 2 Specimens defects and sizes

试件	节子			开裂	
	位置(点-点)	面积/cm <sup>2</sup>	总面积/cm <sup>2</sup>	位置(点-点)	长度/cm;深度/mm
Y-1	1-2;19-21	2.54;2.54	5.08	—	—
Y-2	19-22	10.61	10.61	1-9	25;15
Y-3	3-5;39-43	3.27;9.28	12.55	20-32	31;5
Y-4	14-17	11.33	11.33	3-17	36;3
Y-5	8-10;39-41	3.79;5.67	9.46	—	—
Y-6	3-5;36-40	1.53;14.44	15.97	—	—
Y-7	22-23	3.14	3.14	—	—
Y-8	21-22	3.14	3.14	—	—
Y-9	—	—	—	—	—

1.2 试验仪器和方法

模态振型是结构体系的一种固有属性,它与固有频率相对应,为所对应的固有频率体系额自身振动的形态,每一阶固有频率都对应一种振型。在数学上,模态参数是力学系统微分方程的特征值和特征向量;而在试验方面则是试验测得的系统之极点(固有频率)和振型(模态向量)。采用模态分析技术对木材缺陷进行检测一般需要激励设备、传感系统和分析系统 3 大类仪器,本试验采用主要设备是日本小野测器的双通道快速傅立叶变换分析仪(CF-5220Z),激振器为美国 DYTRAN 公司的应力锤 5800B4,信号传感器为 DYTRAN 公司加速度传感器 3035B。

用 2 个自制的等高三角形硬纸片支撑试件,支撑方式为线支撑,支撑处距试件端部 0.224 倍长度的位置。木材试件两端各留出 8 cm,在试件的中间 84 cm 等距离分布 43 个点,点之间的距离为 2 cm。试验装置示意如图 2 所示。

试验分为 2 步:第 1 步是进行频响分析测得试件的频域图,从频域图中读出共振频率;第 2 步是从左至右依次敲击每个试件的 43 个点。频响函数可

以解释为许多分量之和,其中每个分量都等效于一个单自由度系统。频响函数可以用几种方法表示:以实部、虚部作为频率函数的实频、虚频图,以幅值(经常以对数刻度)和相位作为频率函数的幅频、相频图和以频率作为参变量的实部对虚部的曲线图。而在进行模态参数识别时,通过实频虚频曲线进行参数辨识,是一种直观有效的方法。本试验通过 FFT 仪器获取木材每一个点的虚频曲线,敲击 Y-1 试件第 30 点时所获得的虚频图(图 2)。图 3 中第 1 阶到第 6 阶的共振频率对应 6 个虚数峰值。

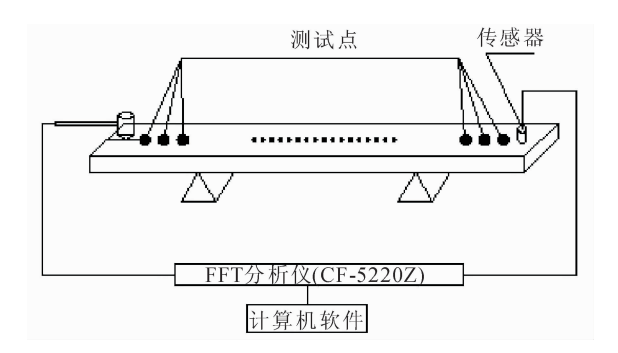


图 2 模态试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental apparatus

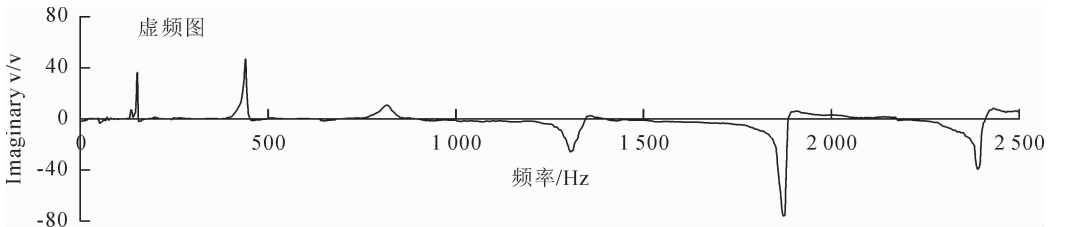


图 3 无开裂试件(Y-1 敲击点 30)的虚频图

Fig. 3 Image of imaginary part of specimens (point 30 on Y-1) without cracks

通过对试验得到的虚频曲线进行数据处理,从试件的敲击点 1 到敲击点 43 依次获取试件的一阶共振频率处的虚数峰值,进行归一化处理。以敲击点的序号  $x(x=1,2,3,\cdots,43)$  为横坐标,以虚频图

中共振频率对应的纵坐标值归一化处理后的值  $y$  为纵坐标, $y$  为无量纲,做出一阶模态振型图。无缺陷木材的一阶模态振型曲线如图 4 所示,曲线左右对称,对称轴为过点 22 做  $x$  轴的垂线。

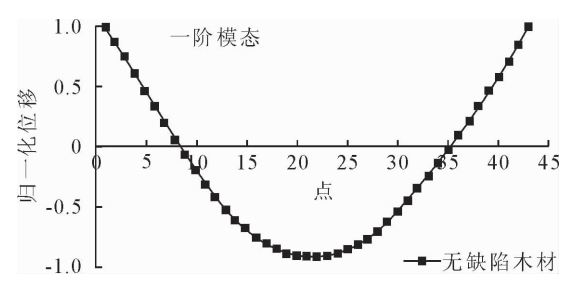


图 4 无缺陷试件的一阶模态

Fig. 4 First-order modal of specimens without defects

2 结果与分析

2.1 试件的共振频率

应用 FFT 分析仪对杨木试件进行频响试验,记录频响图像的前 6 个峰值,测得试件的 6 阶共振频

表 3 试件的前 6 阶共振频率

Table 3 First six resonance frequencies of specimens

试件	六阶共振频率/Hz					
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$
Y-1	156.25	462.5	828.125	1 350	1 890	2 453
Y-2	146.875	453.125	781.25	1 306.25	1 778	2 387.5
Y-3	131.25	440.625	775	1 309	1 778	2 421
Y-4	143.75	406.25	812.5	1 209	1 731	2 350
Y-5	157.5	437.5	830	1 295	1 835	2 450
Y-6	147.5	427.5	797.5	1 255	1 805	2 410
Y-7	162.5	437.5	812.5	1 272	1 831	2 441
Y-8	150	387.5	725	1 187.5	1 709	2 250
Y-9	159.375	396.875	703.125	1 172	1 734	2 359

2.2 试件的模态振型

图 5 为无开裂试件(Y-1、Y-5、Y-6、Y-7、Y-8、Y-

率(表 3)。  
从表 3 中可以看出,相邻阶次共振频率的差值随着频率阶数的增加而增大,各试件之间的一阶共振频率的差异要大于其他阶次的共振频率。C 组试件的共振频率大于 A 组与 B 组试件的共振频率,Y-2、Y-3、Y-4 的一阶频率显著小于其他试件的一阶频率,无缺陷试件中 Y-7 的一阶共振频率最高,为 162.5 Hz;开裂试件中 Y-3 一阶共振频率最低,为 131.25 Hz,相对无缺陷试件最大降低率为 -19.23%;含节子试件中 Y-6 的一阶共振频率最低,为 147.5 Hz,相对无缺陷试件一阶共振频率的最大降低率为 -9.23%。而其他试件的频率变化无明显规律。表明节子和开裂均会降低试件的一阶共振频率,且开裂的降低程度显著大于节子的降低程度。

9)的一阶模态振型,图 6 为开裂试件(Y-2、Y-3、Y-4)的一阶模态振型。

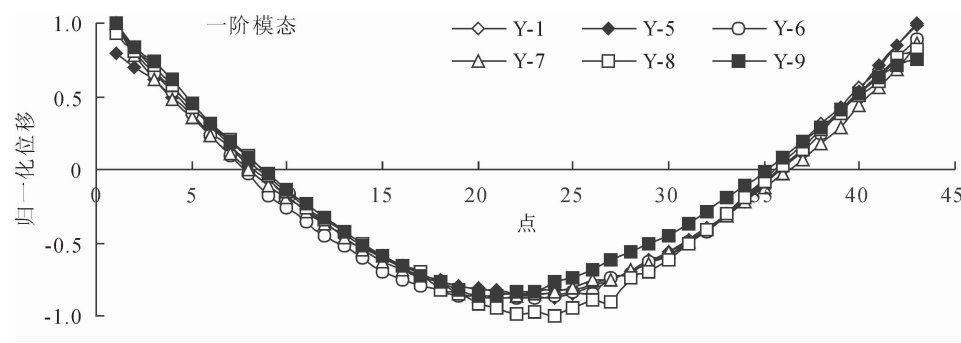


图 5 无开裂试件的一阶模态振型

Fig. 5 First-order modal of specimens without cracks

表 3 中,试件的节子面积为 3.14~15.97 cm<sup>2</sup>。无开裂试件的一阶模态振型形状相似且重合度高,左右对称,起始点和终止点归一化振幅约为 1,对称点在点 22 的位置。开裂试件的一阶模态明显不对称,点 1 的纵坐标为 1,点 43 处纵坐标数值<0.6;开裂试件底部不平滑情况显著,Y-2、Y-3 曲线有明显差异,这是由开裂长度和开裂深度不同导致的平

滑度差异(平滑就是没有尖点、断点,在数学上就是指“可导”(导数存在);相对于 1/2 正弦曲线,曲线中尖点越多,且尖点相对于相邻点在 y 轴上的偏移越大,则曲线平滑度越差)。图 6 中显然 Y-2 有 3 个尖点,且偏移量大于 Y-3、Y-4 中尖点的偏移量;Y-3、Y-4 中尖点不明显,但 Y-3 的尖点相对于相邻点在 y 轴上的偏移大于 Y-4 的尖点。由此可得,不平滑

程度  $Y-2>Y-3>Y-4$ ,说明开裂(开裂长度 $>25\text{ cm}$ ,深度 $>3\text{ mm}$ )对一阶振型的影响要大于节子(节子总面积 $<15.97\text{ cm}^2$ )对一阶振型的影响。对比图

1,分析图 6 的一阶振型曲线可知, $Y-2$ 、 $Y-3$ 、 $Y-4$  的开裂缺陷对其振型的影响主要体现在曲线中部点 15 至点 26 的位置。

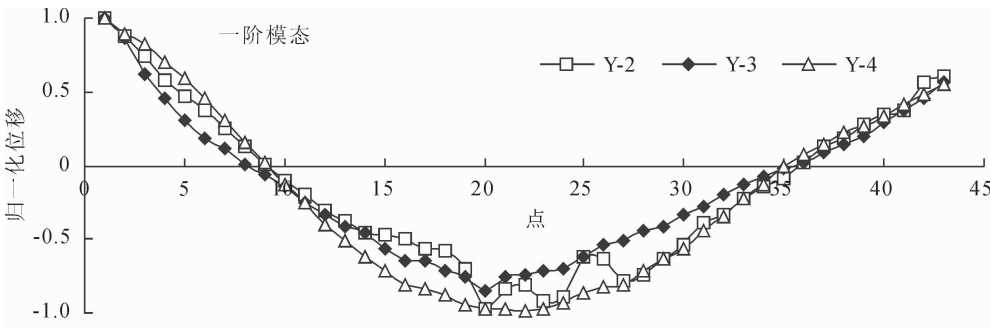


图 6 开裂试件的一阶模态振型

Fig. 6 First-order modal of specimens with cracks

2.3 试件的虚频图

在试验模态分析的敲击过程中,敲击无开裂试件的节子,观察敲击节子所得虚频图发现,节子所在敲击点的虚频图在共振频率处仅有 1 个峰值(图 7,为 Y-1 节子所在点 24 的虚频图),而敲击开裂处后所得虚频图在共振频率处有 2 个峰值。节子不会影响虚频图峰值数量。以开裂深度最小的 Y-4 为例分析开裂对虚频图的影响,若 Y-4 的虚频图有明显变化,即证明开裂对虚频图有显著影响。开裂试件 Y-4 开裂区域为点 3 至点 16,图 8 为无开裂部分敲击点 17 的虚频图,图 9 为开裂试件 Y-4 开裂部位中敲击点 3 的虚频图。

上出现 2 个振动峰值。依次敲击点 4~点 16,分析各点虚频图,在第 4、第 5 阶和第 6 阶共振频率附近其振幅均有 2 个峰值,由此可以判断出开裂的范围是从点 3~点 16。

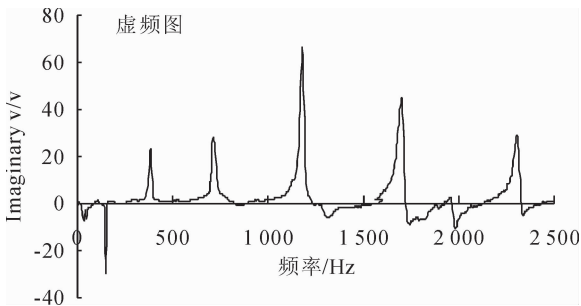


图 8 Y-4 无开裂部分敲击点 17 的虚频图

Fig. 8 Image of imaginary part of point 17 on Y-4 without cracks

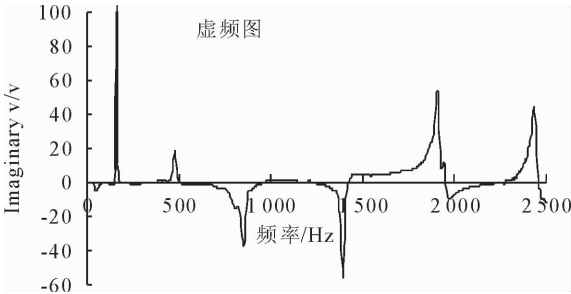


图 7 Y-1 点 24(节子)虚频图

Fig. 7 Image of imaginary part of point 24 on Y-1(knot)

木材是一个致密的整体,当其因振动产生共振时,各点的相对位移会远远大于非共振频率下的相对位移。图 8 中,在点 17 敲击后所得峰值对应的频率与共振频率一一对应。而图 9 中,在点 3 敲击后,木材在第 4、第 5 阶和第 6 阶共振频率时振幅有 2 个峰值,即试件在第 4、第 5 阶和第 6 阶共振频率附近产生了 2 次共振。试件的开裂将一个整体分成了 2 个部分,在第 4、第 5 阶、第 6 阶的频率范围内,这 2 部分会发生不同的共振,这就导致在敲击测试时出现 2 处相连且相似的峰值,即对应了 2 个共振频率,从而导致虚频图在第 4、第 5 阶、第 6 阶的频率

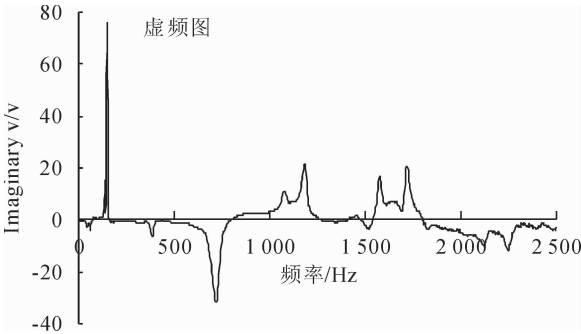


图 9 Y-4 开裂部分敲击点 3 的虚频图

Fig. 9 Image of imaginary part of point 3 on Y-4 with cracks

3 结论与讨论

缺陷会使木材局部密度、力学性能发生变化,如节子、孔洞等缺陷会影响木材的振动性能,含节子或孔洞木材的固有频率低于无缺陷木材的固有频率<sup>[16-18]</sup>。可以通过木材的力学性能和振动性能的变化来对木材缺陷进行检测。通过对杨木的模态分析,分析其共振频率、模态振型和敲击测试时的虚频图,得到以下结论。



开裂会显著降低木材的一阶共振频率。

无缺陷的木材的位移模态振型是 1 条平滑的正弦曲线,木材的位移模态振型在含孔洞缺陷的节点处会产生突变<sup>[19]</sup>,而开裂和孔洞在外观上均可认为是木材的物理变化,但开裂和孔洞对木材一阶振型的影响不同。开裂和节子能使木材的振型曲线变得不平滑,开裂的影响要大于节子的影响,且开裂会破坏一阶振型的对称性。

开裂的木材会在相邻两阶固有频率之间的频率发生共振,比如在第 4 阶和第 5 阶频率时发生共振,在大于第 4 阶频率小于第 5 阶频率的某个频率上也会发生共振。

根据以上结论可以对木材开裂进行定位检测:测出木材的一阶模态振型,一阶振型明显不对称且起始点或终止点的归一化位移<0.6,则可判定木材开裂。根据木材每个敲击点的虚频图可以判断开裂的位置,若虚频图在第 4、第 5、第 6 阶共振频率处有多个峰值,则说明获得该虚频图的敲击点所在位置存在开裂缺陷。

参考文献:

[1] 李坚. 木材科学[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社,1995.

[2] 郭瑞,马肖祥,刑涛,等. 模糊聚类分析在色木孔洞缺陷位置声波检测中的应用[J]. 西北林学院学报,2015,30(4):251-256.

GUO R,MA X X,XING T,*et al.* Application of fuzzy cluster analysis on diagnosing the hole defects in acer mono wood using acoustic testing[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(4):251-256. (in Chinese)

[3] 郭继龙,南生春,杨全文. 木质材料无损检测和评价方法[J]. 木材加工机械,2012(6):51-55.

GUO J L,NAN S C,YANG Q W. The methods for wood non-destructive testing technology [J]. Wood Processing Machinery,2012(6):51-55. (in Chinese)

[4] NIEMZ P,MANNES D. Non-destructive testing of wood and wood-based materials[J]. Journal of Cultural Heritage,2012,13(3):26-34.

[5] 管珣,赵茂程. 北美基于应力波技术的木材测试及应力分等的研究进展[J]. 西北林学院学报,2013,28(2):178-181.

GUAN X,ZHAO M C. Advances in the researches of the wood quality testing and stress grading based on the acoustic technology in north America[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(2):178-181. (in Chinese)

[6] HU C S,AFZAL M T. A statistical algorithm for comparing mode shapes of vibration testing before and after damage in timbers[J]. Journal of Wood Science,2006,52(4):348-352.

[7] 徐华东,王立海,倪松远. 模态分析技术在木材性质检测中应用的研究进展[J]. 森林工程,2007,23(6):15-17.

XU H D,WANG L H,NIS Y. Literature review on application of modal analysis technology in the wood testing[J]. Forest Engineering,2007,23(6):15-17. (in Chinese)

[8] 朱晓冬,曹军,王逢瑚,等. 基于振动模态分析的落叶松节子定

位的无损检测[J]. 林业科学,2009,45(5):169-172.

ZHU X D,CAO J,WANG F H,*et al.* Location nondestructive testing of knot of larch lumber with vibration modal analysis [J]. Scientia Silvae Sinicae,2009,45(5):169-172. (in Chinese)

[9] 刘镇波,刘一星,于海鹏,等. 实木板材的动态弹性模量检测[J]. 林业科学,2005,41(6):126-131.

LIU Z B,LIU Y X,YU H P,*et al.* Research on the dynamic modulus of elasticity measurement of lumber[J]. Scientia Silvae Sinicae,2005,41(6):126-131. (in Chinese)

[10] MEHRAN R,LOIC B. Orientation and position effects of a local heterogeneity on flexural vibration frequencies in wooden beams[J]. Cerne,2015,21(2):339-344.

[11] 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)

[12] MENG X J,XING T,XING Y Q,*et al.* Application of fuzzy cluster analysis on diagnosing the locations of the hole defects in Acer mono wood using acoustic testing[C]//Software Engineering and Service Science (ICSESS). 2014 5th IEEE International Conference on. Beijing:IEEE,2014:958-962.

[13] YANG X Y,ISHIMARU Y,IIDA I,*et al.* Application of modal analysis by transfer function to nondestructive testing of wood I: determination of localized defects in wood by the shape of the flexural vibration wave [J]. Journal of Wood Science,2002,48(4):283-288.

[14] YANG X Y,AMANO T,ISHIMARU Y,*et al.* Application of modal analysis by transfer function to nondestructive testing of wood II:modulus of elasticity evaluation of sections of differing quality in a wooden beam by the curvature of the flexural vibration wave [J]. Journal of Wood Science,2003,49(5):140-144.

[15] 申珂楠,赵海龙,丁馨曾,等. 木材损伤断裂过程声发射信号小波析取[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2015,36(3):33-37.

SHEN K N,ZHAO H L,DING X Z,*et al.* Acoustic emission signal wavelet disjunction in wood damage and fracture process[J]. Journal of Henan University of Science and Technology:Nat. Sci. Edi. ,2015,36(3):33-37. (in Chinese)

[16] 徐华东,王立海. 局部缺陷对木梁动弹性模量的影响[J]. 建筑材料学报,2011,14(5):653-658.

XU H D,WANG L H. Effects of local defects on dynamic modulus of elasticity of wood[J]. Journal of Building Materials,2011,14(5):653-658. (in Chinese)

[17] 崔英颖. 基于振动法进行木材应力分等和缺陷检测的研究[D]. 北京:北京林业大学,2006.

[18] 张志文,苗媛媛. 节子对木材振动性能的影响[J]. 东北林业大学学报,2011,39(6):112-113.

ZHANG Z W,MIAO Y Y. Influence of knot on vibration properties of wood[J]. Journal of Northeast Forestry University,2011,39(6):112-113. (in Chinese)

[19] 徐华东. 基于模态分析的红松方材内部孔洞缺陷检测[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2008.