

# 足尺中密度纤维板振动模态分析

管 成,周卢婧,张厚江\*

(北京林业大学 工学院,北京 100083)

**摘 要:**为了利用振动法无损检测足尺中密度纤维板整板的弹性模量,对足尺中密度纤维板的振动特性进行研究。为了求解足尺中密度纤维板在自由振动下的模态参数,对3种厚度的足尺中密度纤维板,分别进行计算模态分析和试验模态分析,并对其自由振动形式下,前3阶模态振型和频率进行对比和分析。结果表明:1)3种不同厚度的足尺中密度纤维板表现出了相同的振动模态形式:第一阶、第二阶振型都是沿着长度方向的弯曲振动,第三阶振型则是沿着宽度方向的弯曲振动;2)计算模态分析和试验模态分析所得到的频率结果有一定的差距,其中,第一阶模态计算频率稍小于试验频率,第二和第三阶模态计算频率均大于试验频率;但计算模态频率与试验模态频率间有很好的相关性,决定系数达到了0.981 6。

**关键词:**足尺中密度纤维板;振动模态;计算模态分析;试验模态分析

**中图分类号:**S781.6      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2015)03-0228-06

## Analysis of the Vibration Modal of the Full-sized Medium Density Fiberboard

GUAN Cheng, ZHOU Lu-jing, ZHANG Hou-jiang\*

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

**Abstract:** In order to nondestructively detect elastic modulus of the whole full-sized medium density fiberboard by using vibration method, this paper studied the vibration characteristics of the fiberboard. To solve modal parameters of the fiberboard in the condition of free vibration, the calculation modal analysis and experimental modal analysis of the full-sized medium density fiberboards with three kinds of thickness were conducted, respectively. The first three order modal vibration mode and frequency had also been compared and analyzed. The results showed as follows: 1) the full-sized medium density fiberboards with three different thickness showed the same vibration modal form; both of the first and second order vibration modes had the bending vibration along the length direction, while the third order vibration mode had the bending vibration along the width direction; 2) the results of the frequency through calculated modal analysis and experimental modal analysis had a certain difference in frequency; the first order modal calculated frequency was slightly lower than the test frequency, and the second and third order modal calculation frequency was higher than their test frequency. There was a good correlation existing between calculated modal frequency and test modal frequency with the decision coefficient of 0.981 6.

**Key words:** full-sized medium density fiberboard; vibration modal; calculated modal analysis; experimental modal analysis

足尺中密度纤维板(MDF)是一种以木质纤维 合成树脂,经过纤维分离、施胶、干燥、铺装成型、热压、锯边和检验等工序制成的密度在0.45~0.88 g

收稿日期:2014-09-01 修回日期:2014-09-26

基金项目:林业公益性行业科研专项(201304512)。

作者简介:管成,男,在读硕士,研究方向:木材无损检测技术。E-mail:648911029@qq.com

\* 通信作者:张厚江,男,博士,教授,研究方向:木材无损检测。E-mail:hjzhang6@bjfu.edu.cn

•  $\text{cm}^{-3}$  之间,幅面为  $2\,440\text{ mm}\times 1\,220\text{ mm}$  标准尺寸的成品人造板材<sup>[1]</sup>。由于其具有内部结构均匀、密度适中、尺寸稳定性好、表面平整光滑、机械加工性能好等特点,在建筑、家具制造、包装、装修等行业应用广泛<sup>[2]</sup>。在这种情况下,我国的研究人员对中密度纤维板的生产工艺和材料性能等方面已经进行了较多的研究<sup>[3-7]</sup>。不同的使用环境对人造板的力学性能要求也不尽相同。因此,足尺中密度纤维板作为人造板中的一种,对足尺中密度纤维板的力学性能进行检测,为材料使用提供理论依据十分必要。弹性模量是表示足尺中密度纤维板力学性能的重要指标之一,它是指人造板在比例极限内的应力与应变之间的关系<sup>[8]</sup>。传统的检测方法大都采用力学试验机对规定尺寸的小试样进行静态变形试验,其缺点是检测时间长、测定过程复杂、属于破坏性检测,且不适于在线快速检测。依据振动法测定木质材料的力学性能,过去几十年来已经被证明是一种成功的方法<sup>[9-10]</sup>。测定结果显示振动法测得的弹性模量与传统静态弯曲测得的弹性模量间有非常好的一致关系。目前,国内外进行的大量利用振动原理测量人造板力学性能的研究主要是针对人造板小试件<sup>[11-14]</sup>,而有关基于振动原理的足尺中密度纤维板力学性能检测的研究报道尚少。采用 ANSYS 软件对 3 种厚度的足尺中密度纤维板自由振动的模态进行计算分析,并与试验模态分析的结果进行对比,来确定足尺中密度纤维板自由振动的模态,为今后利用振动法无损检测足尺中密度纤维板整板的力学性能奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 技术原理

基于振动模态与弹性模量间的关系,梁振动模态与其自身的弹性模量间有密切的关系。“自由—自由”振动梁被支撑在波节位置(图 1)<sup>[15]</sup>,该梁的弹性模量 MOE 与其振动模态的第一阶固有频率  $f$  间的关系式为:

$$MOE=\frac{f^2ML^3}{12.65I}$$

(1)

式中,其他 3 个参数都是梁的已知物理参数。 $M$ :梁的质量; $L$ :梁的长度; $I$ :惯性矩。

进而通过测量梁的振动模态的第一阶固有频率,就可计算出梁的弹性模量。类似检测原理已经在规格材、小件薄板木质材料的弹性模量检测中,有了良好的研究成果和应用效果<sup>[9-14]</sup>。

了解足尺中密度纤维板的振动模态后,应当就可通过振动方式无损、快捷地检测其弹性模量。那

么,足尺中密度纤维板的振动模态是什么,即为本文进行的基础研究。

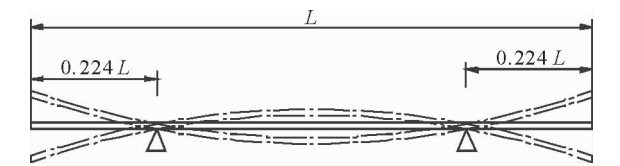


图 1 自由—自由梁一阶弯曲振动  
Fig. 1 Free-free beam first bending vibration

### 1.2 研究方法

1.2.1 试验材料 选取从市场随机购买的 3 种厚度的足尺中密度纤维板(MDF)进行模态分析。足尺人造板的长度和宽度均为  $2\,440\text{ mm}\times 1\,220\text{ mm}$ 。MDF6 代表厚度为 6 mm 的足尺中密度纤维板。依据足尺中密度纤维板试件实际数值,并查阅相关文献<sup>[16]</sup>,确定 3 种厚度的足尺中密度纤维板的弹性模量和泊松比,并根据所购足尺中密度纤维板的质量以及体积计算足尺中密度纤维板的平均密度(表 1)。

表 1 试件编号和参数				
Table 1 Specimen number and parameters				
试材编号	厚度 /mm	弹性模量 /GPa	泊松比	平均密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
MDF6	6	4.13	0.015	0.760 7
MDF12	12	3.84	0.060	0.721 4
MDF20	20	2.28	0.125	0.675 3

1.2.2 计算模态分析 计算模态分析实际上是一种理论建模过程,主要是运用有限元法对振动结构进行离散,建立系统特征值问题的数学模型,用各种近似方法求解系统特征值和特征矢量。由于阻尼难以准确处理,因此,通常均不考虑小阻尼系统的阻尼,解得的特征值和特征矢量即系统的固有频率和固有振型矢量。本次计算模态分析采用的是有限元软件 ANSYS 对所研究的足尺中密度纤维板进行模态分析,即确定其固有频率和振型。模态分析包括建立模型、加载与求解、扩展模态和观察结果等几个步骤。

1.2.2.1 有限元模型的构建 在 ANSYS 软件中,令长度方向为  $x$  轴,宽度方向为  $y$  轴,厚度方向为  $z$  轴,分别构建长度为  $2\,440\text{ mm}$ ,宽度  $1\,220\text{ mm}$  和 3 种厚度不同的足尺中密度纤维板。定义模型单元属性为 Solid 20node 186。由于板是连续系统,基于连续系统振动理论的前提,材料属性选为线弹性各向同性材料,所要设置的参数包括弹性模量,泊松比和密度(表 1)。

结构离散是有限元建模的中心任务,即网格划分<sup>[17]</sup>。对模型进行网格划分时,采用 Mesh Tool 中

Smart size 命令对模型进行网格化。能够充分利用 ANSYS 软件的自适应功能,使网格划分更为合理<sup>[18]</sup>。划分网格后的模型(图 2)。

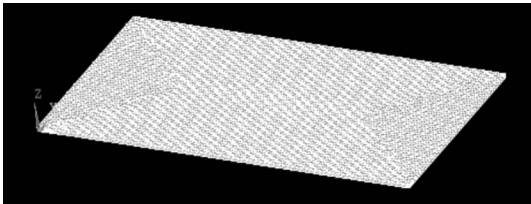


图 2 足尺中密度纤维板有限元模型

Fig. 2 Full-sized MDF finite element model diagram

1.2.2.2 边界条件的设置 鉴于要分析的是自由振动下的足尺中密度纤维板的振动模态,所以不需要外加载荷。根据“自由—自由”梁振动的约束情况,在足尺中密度纤维板全长的 22.4% 处以及 77.6% 处,即在两条节线处,限制沿  $z$  轴方向的自由度(图 3),在 2 条节线处采用线支撑。

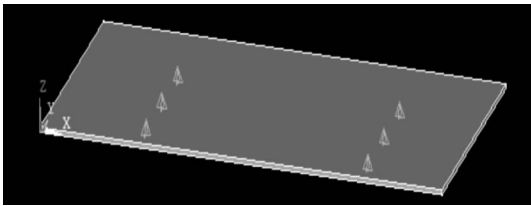


图 3 设置边界条件后的有限元模型

Fig. 3 Set the boundary condition of finite element model

1.2.2.3 模态求解方法的选定 ANSYS 提供了 7 种模态求解方法:子空间法(subspace)、分块法(block lanczos)、缩减法(reduced/householder)、动态功率法(power dynamics)、非对称法(unsymetric)、阻尼法(damp)和 QR 阻尼法(QR damp)。大多数分析过程选用子空间法、分块法或缩减法。分块法经常应用在具有实体单元或壳单元的模型中。基于所构建的模型就是实体模型,采用分块法提取有限元模型的前 3 阶模态,分析截止频率设定为 100 Hz。

1.2.3 试验模态分析 试验模态分析是计算模态分析的逆过程,通过试验测得激励和响应的时间历程,运用数字信号处理技术求得频率响应函数或脉冲响应函数,得到系统的非参数模型,然后运用参数识别方法,求得系统模态参数并进一步确定系统的物理参数。

试验模态分析采用丹麦 B&K 公司生产的 3560C 型 PULSE 系统。该系统的平台包括硬件和软件 2 个部分。硬件部分为信号采集系统,其前端通过网线与计算机连接(图 4)。软件部分由软件平台及其应用软件构成,主要包括基本振动测试模块、

模态测试模块以及后处理模块等。试验所用激振器是脉冲锤,传感器采用加速度传感器。脉冲锤和加速度传感器(图 5)。



图 4 B&K 测试平台硬件部分

Fig. 4 B&K test platform hardware



图 5 脉冲锤和加速度传感器

Fig. 5 Pulse hammer and acceleration sensor

试验中按照多点激励单点拾振的方法,通过移动脉冲锤来分次获取足尺中密度纤维板各点间的激励和响应信号,由 3560C 信号采集系统采集脉冲锤激励信号和加速度传感器的响应信号,最后在计算机中用 B&K 公司开发的 pulse 软件分析输入输出信号,求解系统的频率响应函数并将该函数导入 ME'scope 后处理软件中,计算足尺中密度纤维板的振动模态参数。

正式检测试验之前,在足尺中密度纤维板上划分网格(图 6)。所有线与线的交点均为激振点,计 60 点。足尺中密度纤维板的几何中心为拾振点,即为粘贴加速度传感器的位置。将足尺中密度纤维板摆放在足尺人造板力学性能检测试验装置上,保证足尺中密度纤维板的支撑位置是在全长的 22.4% 处以及 77.6% 处。按照布置激励点的先后顺序,用脉冲锤在画好点的足尺中密度纤维板上依次敲击,得到所有激励点的频率响应函数,完成数据采集。

在用脉冲锤敲击每个激励点的过程中,两次要敲在同一个点,同一个方向,减小随机误差。将各点的频率响应函数数据导出到 ME'scope 中进行模态参数识别和振型模拟。

基于木质材料力学性能检测目的的振动参数,通常只用到低阶振型和频率<sup>[19-21]</sup>,所以这里只讨论足尺中密度纤维板的前三阶振动模态。

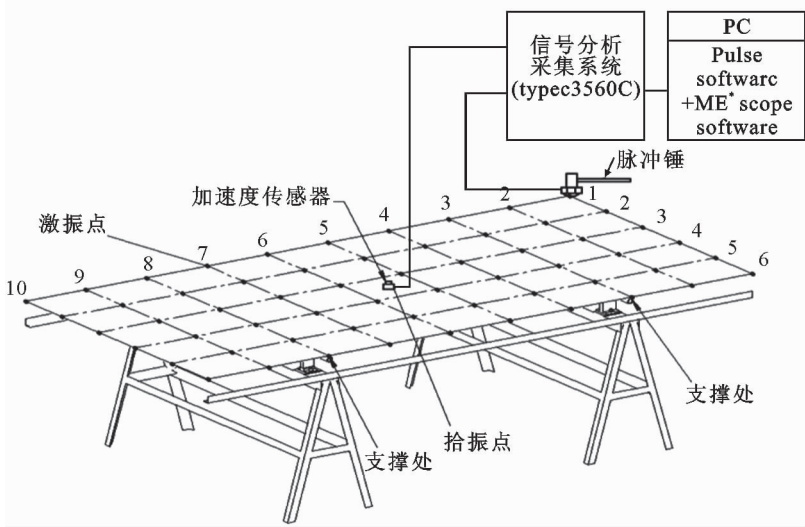


图 6 足尺中密度纤维板试验模态分析系统

Fig. 6 Experimental modal analysis system's diagram of full-sized MDF

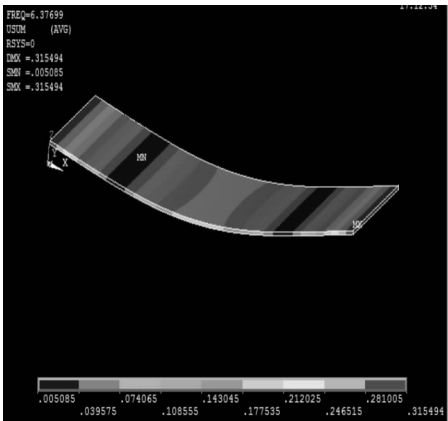
2 结果与分析

2.1 模态振型

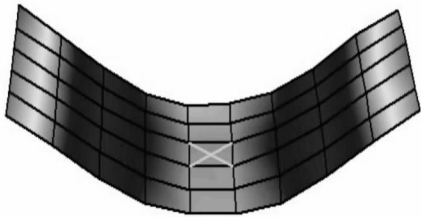
MDF20 板材第一阶、第二阶和第三阶振动模态的计算模态振型和试验模态振型的对比(图 7、图 8 和图 9)可以看出,计算模态振型和试验模态振型的同阶次振型是一致的:第一阶、第二阶模态振型为沿长度方向的弯曲振动,第三阶模态振型为沿宽度方

向的弯曲振动。其他 2 种厚度的板材 MDF6 和 MDF12,计算模态分析和试验模态分析结果呈现与此相同的规律。

由于计算模态振型是通过软件计算的结果,试验模态振型是检测试验的测试结果,所以,3 个图从侧面相互印证了计算模态分析和试验模态分析两种方法的可用性。



a. 计算模态分析的第一阶振型



b. 试验模态分析的第一阶振型

图 7 MDF20 板材第一阶模态振型

Fig. 7 MDF20's the first order modal vibration mode

2.2 模态频率

对 3 种厚度的足尺中密度纤维板进行有限元计算模态分析和试验模态分析得到的第一阶的模态参数(表 2)。3 种不同厚度的足尺中密度纤维板的第一阶模态参数计算模态分析得到的频率与试验模态

分析得到的频率有差距,前者比后者稍小。相对差距最小的是厚度为 6 mm 的足尺中密度纤维板,为 0.8%,相对差距最大的是厚度为 20 mm 的足尺中密度纤维板,为 8.9%,厚度为 12 mm 的居中,为 4%。

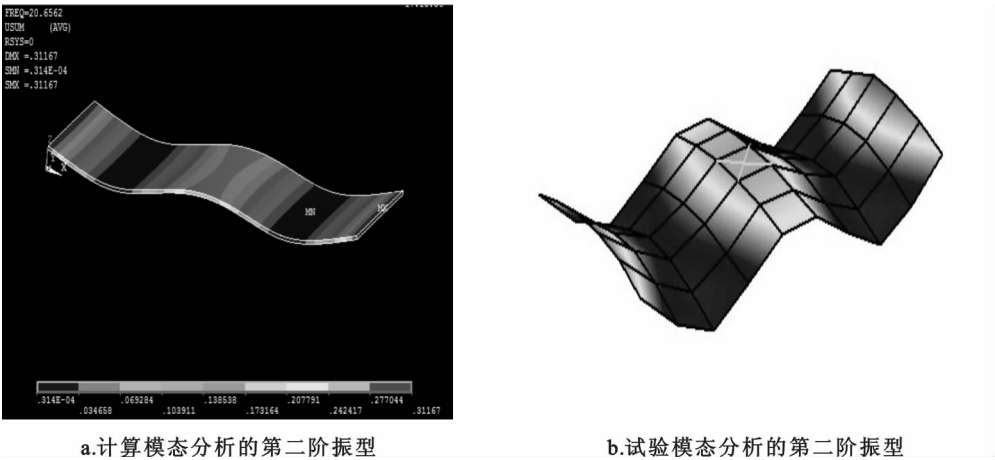


图 8 MDF20 板材第二阶模态振型

Fig. 8 MDF20's the second order modal vibration mode

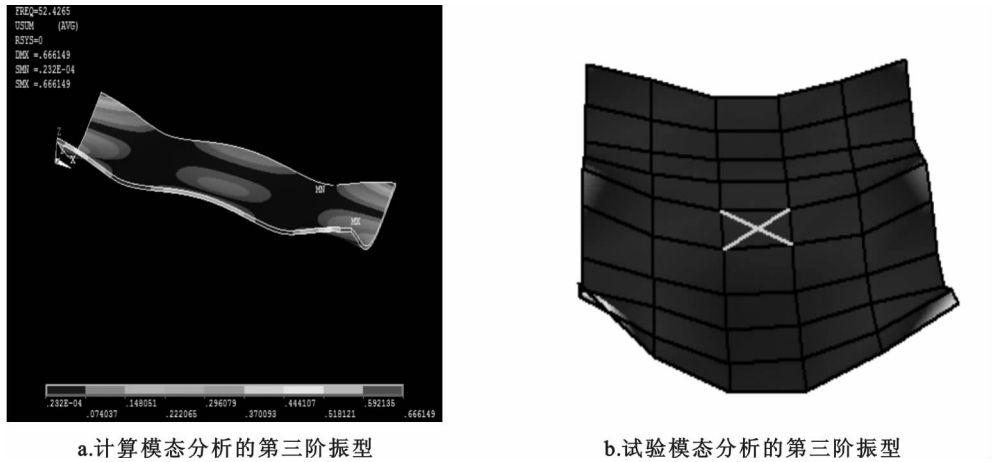


图 9 MDF20 板材第三阶模态振型

Fig. 9 MDF20's the third order modal vibration mode

表 2 足尺中密度纤维板第一阶的模态参数

Table 2 Full-sized MDF's the first order modal parameters				
试件 编号	第一阶 振动形式	计算 频率/Hz	试验 频率/Hz	相对 差距/%
MDF6	沿长度方向弯曲	2.43	2.45	0.8
MDF12	沿长度方向弯曲	4.79	4.99	4.0
MDF20	沿长度方向弯曲	6.38	7.00	8.9

3 种不同厚度的足尺中密度纤维板的计算模态分析得到的第二阶模态频率比试验模态分析得到的第二阶模态频率大,相对差距最大的为 7.1%(表 3)。第三阶模态与第二阶模态一样,计算模态频率比试验模态频率大,同时表现出更大的相对差距,最小的是 21.4%,最大的是 30.9%(表 4)。

计算模态频率与试验模态频率出现这些差距的原因,可能与计算模态分析的假设前提有关。将分析对象中密度纤维板假设为各向同性材料。严格讲,中密度纤维板材在幅面内各个方向上可以看作近似各向同性,而垂直幅面方向的性能与幅面内方向的性能是有一定区别的。可能还有其他因素的影响。

表 3 足尺中密度纤维板第二阶的模态参数

Table 3 Full-sized MDF's the second order modal parameters				
试件 编号	第二阶 振动形式	计算 频率/Hz	试验 频率/Hz	相对 差距/%
MDF6	沿长度方向弯曲	8.26	7.71	7.1
MDF12	沿长度方向弯曲	15.53	14.90	4.2
MDF20	沿长度方向弯曲	20.66	19.60	5.4

表 4 足尺中密度纤维板第三阶的模态参数

Table 4 Full-sized MDF's the third order modal parameters				
试件 编号	第三阶 振动形式	计算 频率/Hz	试验 频率/Hz	相对 差距/%
MDF6	沿宽度方向弯曲	22.64	18.2	24.4
MDF12	沿宽度方向弯曲	40.31	30.8	30.9
MDF20	沿宽度方向弯曲	52.43	41.2	21.4

将 3 种厚度板材、每张板材三阶模态频率,共 9 组模态频率数据相关分析,发现计算模态频率与试验模态频率间有很好的相关性,决定系数达到了 0.981 6,证明计算模态分析和试验模态分析 2 种方法的可用性(图 10)。

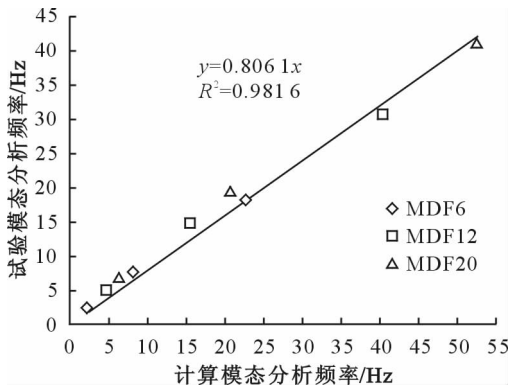


图 10 计算模态频率与试验模态频率间关系

Fig. 10 Relationship between calculated modal frequency and experimental modal frequency

3 结论

通过对 3 种厚度的足尺中密度纤维板计算模态分析和试验模态分析,结果表明,3 种不同厚度的足尺中密度纤维板表现出了相同的振动模态形式,第一阶、第二阶阵型都是沿着长度方向的弯曲振动,第三阶振型则是沿着宽度方向的弯曲振动。但计算模态分析和试验模态分析所得到的频率结果有一定差距,其中,第一阶模态计算频率稍小于试验频率,第二和第三阶模态计算频率大于试验频率。计算模态频率与试验模态频率间有很好的相关性,决定系数达到了 0.981 6。

参考文献:

[1] 梅长彤,周晓燕,金菊婉. 人造板[M]. 北京:中国林业出版社,2005.

[2] 张建,李琴,汪奎宏,等. 中密度纤维板发展概况及环保性能分析[J]. 林业机械与木工设备,2009,37(9):7-10.

[3] 黄洛华,曲岩春,曹忠荣. 火炬松制造中密度纤维板工艺的研究[J]. 木材工业,1999,13(5):11-13.

[4] 吴章康,张宏健,黄素涌,等. 竹木复合中密度纤维板工艺条件的研究[J]. 木材工业,2000,14(3):7-10.

[5] 吴章康,张宏健,黄素涌,等. 桉树中密度纤维板性能研究[J]. 云南林业科技,2001(1):58-60.

[6] 黄晓东,刘雁. 福建市场常见装饰装修板材燃烧热释放率研究[J]. 西北林学院学报,2002,17(2):79-82.

HUANG X D, LIU Y. Burning heat release rate of some decorative board on Fujian market [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2002, 17(2):79-82. (in Chinese)

[7] 肖忠平,卢晓宁,陆继圣. IPBC 对木质材料的防腐处理工艺研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(5):140-143.

XIAO Z P, LU X N, LU J S. Preservative treatment of wood and wood-based composites with IPBC [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(5):140-143. (in Chinese)

[8] 顾继友,胡英成,朱丽滨. 人造板生产技术与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2009.

[9] MOSLEMI A A. Dynamic viscoelasticity in hardboard [J].

Forest Products Journal, 1967,17(1):25-33.

[10] ROSS R J, PELLERIN R F. Nondestructive testing for assessing wood members in structures;a review[R]. FPL-Gen. Tech. Rep-70. MADISON W I;USDA,Forest Service,Forest Products Laboratory,1994.

[11] 池德汝,童昕,林新青. 基于振动原理的人造板力学性能无损检测技术的研究[J]. 福建工程学院学报,2007,5(6):575-577.

[12] TURK C, HUNT J F, MARR D J. Cantilever-beam dynamic modulus for wood composite products:part 1 apparatus[R]. USDA Forest Products Laboratory, Research Note FPL - RN - 0308. 2008.

[13] 郭志仁,张厚江, Hunt J F,等. 薄板类中密度纤维板动静态弹性模量的检测[J]. 林业科学,2011,41(1):177-180.

GUO Z R, ZHANG H J, HUNT J F, *et al.* Measurement of dynamic and static modulus for thin medium density fiberboard [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 41(1):177-180. (in Chinese)

[14] HUNT J F, ZHANG H J, GUO Z R, *et al.* Cantilever beam static and dynamic response comparison with mid-point bending for thin MDF composite panels [J]. BioResources, 2013, 8(1):115-129.

[15] 刘士昕,过梅丽.“自由-自由”振动梁的动态粘弹仪[J]. 复合材料学报,1988,5(1):21-25.

LIU S X, GUO M L. The dynamic viscoelastic apparatus for free-free vibrating beam [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1988, 5(1):21-25. (in Chinese)

[16] SEBERA V, TIPPNER J, ŠIMEK M, *et al.* Poisson’s ratio of the MDF in respect to vertical density profile [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2014,72(3):407-410.

[17] 杜平安. 结构有限元分析建模方法[M]. 北京:机械工业出版社,1998.

[18] 倪松远,王立海,徐华东. 基于 ANSYS 的木塑复合板振动特性分析[J]. 东北林业大学学报,2011,39(6):49-51.

NI S Y, WANG L H, YU H D. Vibration properties of wood-plastic composite based on ANSYS software [J]. Journal of Northeast Forestry Universtry, 2011, 39(6):49-51. (in Chinese)

[19] 张厚江,申世杰,崔英颖,等. 振动方式测定木材弹性模量[J]. 北京林业大学学报,2006,27(6):91-94.

ZHANG H J, SHEN S J, CUI Y Y, *et al.* Measuring elastic modulus of wood using vibration method[J]. Journal of Beijing Forestry Universtry, 2006,27(6):91-94. (in Chinese)

[20] 闫海成,张厚江,朱磊,等. 薄型刨花板的动静态弹性模量检测[J]. 浙江农林大学学报,2012,29(1):83-87.

YAN H C, ZHANG H J, ZHU L, *et al.* Dynamic and static modulus measurements for thin particleboard [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2012, 29(1):83-87. (in Chinese)

[21] 王正,杨小军,梁星宇. 各向同性人造板材料弹性模量测量及其标准差评价[J]. 西南林业大学学报,2012,32(1):83-87.

WANG Z, YANG X J, LIANG X Y. Measurement of static elasticity modulus of the isotrope wood-based panels and comprehensive evaluation of standard deviation [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2012, 32(1):83-87. (in Chinese)