

竹木板材动态模量在线检测系统

赵玮, 郑强, 徐锋*, 刘云飞*

(南京林业大学信息科学技术学院, 南京 210037)

摘要: 竹木板材作为一种原料, 被广泛用于生产家具、地板及工程装修等。其中, 弹性模量和剪切模量是其重要的力学性能指标。为快速无损测定竹木板材的动态弹性模量和动态剪切模量, 设计了一种基于 FPGA 的板材动态弹性模量和剪切模量测试系统。系统通过全桥电阻应变传感器拾取板材的冲击响应信号, 信号经过调理电路放大后输入 FPGA 开发板, 进行模数转换及频谱变换, 得到振动信号的一阶模, 最后计算得到竹木板材的动态弹性模量和动态剪切模量。为方便用户使用, 该系统增加了上位机显示体系, 实现信号采集、频谱分析、一阶模提取、模量计算等功能, 执行一次测试仅需几秒。为验证测量方案的可行性, 与分离刚度法测试进行了对比, 其弹性模量的相对误差在 0.14%~2.59%, 平均误差为 1.46%; 剪切模量的相对误差在 0.32%~7.45%, 平均误差为 4.18%。实测数据表明, 该动态模量在线检测系统可以有效地测量竹木板材的动态弹性模量和动态剪切模量, 处理速度快、应用灵活、稳定性强, 可满足生产过程的实时检测需求。

关键词: 竹木板材; 在线检测; 弹性模量; 剪切模量; FPGA

中图分类号: S781.9

文献标志码: A

文章编号: 2096-1359(2023)03-0150-06

Online detection system for dynamic modulus of bamboo and wood panels

ZHAO Wei, ZHENG Qiang, XU Feng*, LIU Yunfei*

(College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: As raw materials, bamboo and wood panels are widely used in the production of furniture, flooring, and engineering decoration. Among them, the elastic modulus and shear modulus are important mechanical property indexes, and elastic modulus is a physical quantity that reflects the deformation capacity of materials under load, while shear modulus is a physical quantity that reflects the ability of materials to withstand shear strain. The traditional static method for measuring elastic modulus and shear modulus has drawbacks of long measurement time, tedious measurement process, strict requirements on the dimensional specifications of the specimens, and destructive. Dynamic method is suitable for production process detection because of its short measurement time and no damage to materials. At present, the dynamic testing method has become an important means and development direction for the examination of panels' modulus. The impact stress wave method is a dynamic nondestructive testing method with the advantages of simple operation and easy testing, which can be used for the determination of elastic modulus and shear modulus of panels. This study developed an online detection system for measuring the dynamic elastic modulus and shear modulus of bamboo and wood panels based on field programmable gate array (FPGA). The system used the full-bridge resistance strain sensor to pick up the impulse response signal of the panels, amplified the signal through the conditioning circuit, and built a programmable on-chip system with the NIOS II soft core processor as the core through the customized A/D module, JTAG, PLL, FIFO and other IP cores inside the FPGA chip. Through the design to complete the analog-to-digital conversion, spectrum transformation, first-order modulus acquisition and modulus calculation and other functions, finally realized the dynamic elastic modulus and shear modulus of bamboo and wood panels online real-time detection. For the convenience of users and the realization of its interactive functions, the system used QT to develop a visual operation interface to realize the functions of signal acquisition, spectrum analysis, first-order mode extraction and modulus calculation, and it took only a few seconds to execute a test. In order to verify the feasibility of the measurement scheme, it was compared with the separation stiffness method test, and the average error of its elastic modulus was 1.46%, and the average error of shear modulus was 4.18%. The system has the advantages of fast processing, flexible application and strong stability, which can meet the demand for real-time detection in the production process.

Keywords: bamboo-wood panel; online detection; elastic modulus; shear modulus; FPGA

收稿日期: 2022-11-08

修回日期: 2022-12-01

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0600904)。

作者简介: 赵玮, 女, 研究方向为信号处理。通信作者: 刘云飞, 男, 教授; 徐锋, 男, 副教授。E-mail: lyf@njfu.com.cn

竹木板材因色差较小、物理性能稳定以及高力学强度,成为家具生产和工程装修业中重要的原材料。弹性模量和剪切模量是板材的重要力学性能指标^[1],弹性模量是反映材料承受载荷时形变能力的物理量^[2],剪切模量是反映材料抵挡切应变能力的物理量。目前板材弹性模量及剪切模量的测量方法可分为静态法和动态法两种^[3]。其中,静态法测量精度高,但是测量时间较长,测量过程烦琐,对试件的尺寸规格都有严格的要求,且具有破坏性;动态法测量时间短,不会对材料造成破坏,适用于生产过程检测^[4]。

在板材模量动态检测方面,国内外学者已开展了相关研究,如王思敏等^[5]应用共振法测试了毛竹材分层动态杨氏模量,得出竹材不同层声学振动性能的差异,研究指出对小尺寸竹材试样可通过测试动态杨氏模量来估测静态力学性能;余观夏等^[6]基于振动法,运用传感器、数据采集卡、计算机及 Labview 虚拟仪器实现了动态杨氏模量和剪切模量的测定;王岍等^[7]采用单片机外围电路对数据进行采集,通过上位机处理数据,开发了一个可以自动采集处理数据的动态杨氏模量测试仪;Hodoušek 等^[8]利用压电传感器和硬件采集设备将冲击锤撞击试样产生的应力波信号采集到计算机系统,进行事后分析得到加拿大胡杨 (*Populus × canadensis*) 和鲁西塔尼柏树 (*Cupressus lusitanica*) 的动态杨氏模量;Kánnár 等^[9]应用 Fakopp-PLG 动态杨氏模量测量仪测试了杨树的动态杨氏模量,研究指出动态法测试结果与静态法具有相同的范围,两者具有显著的相关性。

尽管当前国内外学者对于板材动态模量的测试研究取得了较好成果,但他们大多采用专用仪器或控制系统结合计算机完成,这些仪器或系统存在体积大、价格昂贵,或功能单一、实时性较差等缺点,难以推广使用。因此,本研究以 FPGA (field programmable gate array, 现场可编程门阵列) 为核心,采用软硬结合的方式构建竹木板材动态弹性模量和剪切模量实时检测系统。该系统采用全桥电阻应变传感器拾取板材的冲激响应信号,通过调理电路对信号进行放大,在 FPGA 芯片内部通过定制 A/D 模块、JTAG、PLL 和 FIFO 等 IP 核搭建了一个以 Nios II 软核处理器^[10]为核心的可编程片上系统,同时通过设计完成模数转换、频谱变换、一阶模获取以及模量计算等功能,最终实现对竹木板材动态弹性模量和剪切模量的在线实时检测。该系统处理速度快、应用灵活、稳定性强,可满足生产过程

的实时检测需求。

1 测量原理及总体设计

1.1 测量原理

根据 ASTM E1876 “Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration” 标准^[11],采用敲击法测出材料的动态弹性模量和剪切模量。用应力锤敲击板材对应的位置,敲击位置的不同,所产生的振动也不同。板材模量的具体测量方法如图 1 所示。对于矩形截面材料,在测量弹性模量时,分别在距试样两端 0.224 倍长度处放置支架,并选取试样一端 0.224 倍长度的中点处放置应变传感器,当用应力锤敲击试样中心点时,应变传感器接收到的主要为弯曲振动的信号,如图 1a 所示;测量剪切模量时,在试样长度和宽度的中点(扭转节点平面)处放置支架,在试样 0.224 倍长度的边缘处放置应变传感器,当用应力锤敲击距试样另一端 0.224 倍长度的中点处时,应变传感器接收到的主要为扭转振动的信号,如图 1b 所示。将采集到的两个时域信号进行 FFT 频谱分析,可以得到弯曲振动和扭转振动时的频谱,进而求得动态弹性模量和动态剪切模量。

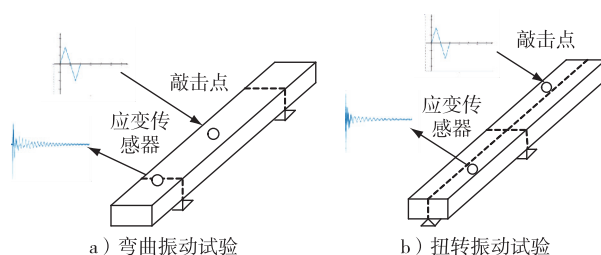


图 1 板材模量测量

Fig. 1 Plate modulus measurement

对于矩形截面的试样,在一阶模的情况下,动态弹性模量为:

$$E = 0.9465 (mf_i^2/b) (L^3/t^3) T_1 \quad (1)$$

式中: E 为动态弹性模量, Pa; m 为材料的质量, g; b 为材料的宽度, mm; L 为材料的长度, mm; t 为材料的厚度, mm; f_i 为弯曲共振基频, Hz; T_1 为在弯曲振动时因受到杆厚度的影响而增加的对理想模型的修正因子。当 $L/t \geq 20$ 时:

$$T_1 = 1 + 6.585(t/L)^2 \quad (2)$$

扭转振动时,在一阶模的情况下,动态剪切模量为:

$$G = \frac{4Lmf_i^2}{bt} [b/(1+A)] \quad (3)$$

式中: G 为动态剪切模量, Pa; f_i 为扭转共振基频; B 和 A 均为形状参数。

$$A = \frac{[0.5062 - 0.8776(b/t) + 0.3504(b/t)^2 - 0.0078(b/t)^3]}{[12.03(b/t) + 9.892(b/t)^2]} \quad (5)$$

1.2 系统总体设计

系统采用软硬结合的方式进行设计, 总体框图如图2所示。硬件系统包括片外的信号采集与调理电路的设计和片内 FPGA 系统的设计。图2左侧的虚线框为片外硬件电路, 通过全桥电阻应变传感器拾取板材冲击应力波产生的信号, 经调理电路对信号进行放大后传入 FPGA 进行处理。FPGA 片内系统分为硬核设计和软核设计两个部分^[12]: 在硬核设计中(图2中FPGA模块中虚线框的硬核模块), 采用 Verilog 语言编写 A/D 转换模块、JTAG、PLL 锁相环和 FIFO 寄存器 4 个模块的 IP 核, 通过 SOPC Builder 设计工具 Qsys 搭建基于 Nios II 的硬件系统, 将经 A/D 转换后的信号暂存在 FIFO 寄存器中。在软核设计中(图2的 Nios II 软核模块), 使用 C 语言编写程序, 对 FIFO 寄存器中的数据进行傅里叶变换, 并利用最大值算法获取频谱的一阶模, 计算出板材的动态弹性模量和动态剪切模量。为方便用户使用, 本系统增加了上位机显示系统, 实现其交互功能。

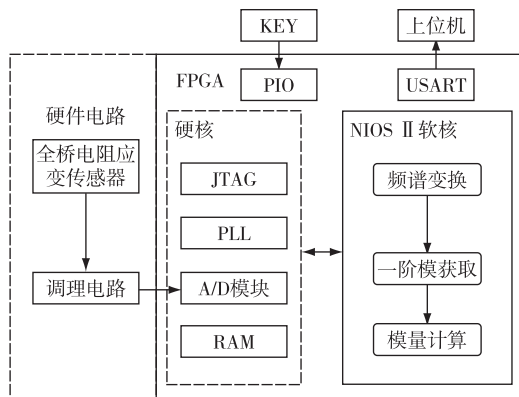


图2 系统总体框架

Fig. 2 Overall block diagram of the system

2 硬件系统设计

2.1 信号采集与放大

在本系统中, 使用电阻应变片传感器进行信号采集, 电阻应变片传感器测量精度高、体积小、质量轻, 不会对试件造成额外的附加载荷^[13], 适合用于测量板材形变。将电阻应变传感器粘贴在板材表面, 当板材受到冲击产生形变时, 粘贴在上面的电阻应变片传感器也随之发生机械形变, 引起应变片阻值发生相应的变化。因应变引起的电阻变化非

$$B = \frac{b/t + t/b}{4(t/b) - 2.52(t/b)^2 + 0.21(t/b)^6} \quad (4)$$

常小, 将其连接成差动全桥电路, 以提高其电压输出, 再采用差模放大电路对电桥输出信号进行放大, 其测量电路如图3所示。其中放大电路由两级组成。第一级为两个运放共同构成双端输入双端输出差分放大电路, 具有抑制因温度、干扰等引起的共模信号的能力。第二级为双端输入单端输出放大电路, 可以进一步对输入信号进行放大, 同时由同向端引入直流参考电压, 保证了零应变时输出电压为零。

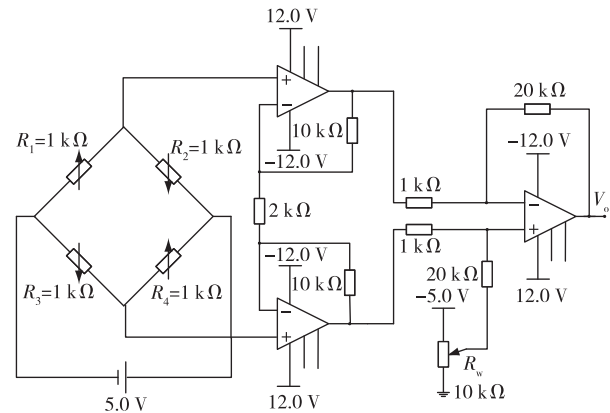


图3 测量电路

Fig. 3 Measurement circuit

2.2 ADC 模块设计

数据采集系统中 ADC 模块采用 FPGA 开发板内部的 ADC 芯片 (PCF8591), 该芯片具有 4 个模拟输入、1 个模拟输出和 1 个串行 I²C 总线接口, 是一个 8 bit 的逐次逼近 A/D 转换器。ADC 模块主要实现两个功能: 一是根据芯片的时序图设置采样速率, 将放大后的模拟信号转换为数字信号; 二是将数字信号缓存在 FIFO 寄存器, 调用异步 FIFO 寄存器, 使得读写操作在两个不同的时钟域, 实现数据的顺序存储。在 Quartus II 软件中应用 Verilog 硬件语言编写 ADC IP 核的代码。首先编写两个代码文件 adc、adc_fifo 定义 ADC 硬件模块, 其中 adc 为顶层结构, 其对应的结构包含对子结构的例化、互联和信号输出, 其作用是读 ADC 模块的时序, 采集信号的数据。另一 adc_fifo 模块主要负责调用异步 FIFO 寄存器, 存储采集的数据用于后续计算。再通过添加时钟信号、总线接口信号、输出端口等, 实现 A/D 转换功能。

2.3 Qsys 硬件系统搭建

系统采用 Cyclone IV 系列芯片, 资源丰富, 能

够满足在线检测系统的需求。而系统架构的搭建需要先通过 Quartus II 软件中的 SOPC Builder 设计工具创建 Qsys 工程,完成对各个 IP 核的配置。在 Qsys 工程中,首先添加采用流水线技术、单指令流的 32 位 Nios II 软核处理器;然后添加自定义的 ADC 模块的 IP 核以及系统自带的 IP 核,包括 FIFO 寄存器、通信模块 JTAG、ADC 模块和 PLL 锁相环等。再建立各个模块的连接,包括时钟、复位、数据总线和指令总线与各个模块之间的连接,按照优先级设置各中断等级,生成 Qsys 系统。Qsys 系统总体硬件配置如图 4 所示,包含时钟源、Nios II 处理器(含时钟输入、复位、中断、存贮)、片上存贮、JTAG 模块、PLL 锁相环、ADC 模块、PIO 并口等。最后返回 Quartus II 软件的顶层系统,在顶层文件中实现对各个模块的例化、引脚的分配等。

Name	Description	Export	Clock	Base	End
clk_0	Clock Source	exported			
nios2_qsys	Nios II Processor		clk_0	0x0000_3000	0x0000_2fff
onchip_mem...	On-Chip Memory (...)		clk_0	0x0000_1000	0x0000_1fff
sysid_qsys_0	System ID Periph...		clk_0	0x0000_3038	0x0000_303f
jtag_uart_0	JTAG UART Intel ...		clk_0	0x0000_3030	0x0000_3037
pll_0	PLL Intel FPGA IP		clk_0		
adc	ADC Controller f...		clk_0	0x0000_3000	0x0000_301f
pio	PIO Parallel I/...		clk_0	0x0000_3020	0x0000_302f

图 4 Qsys 系统总体硬件配置
Fig. 4 Qsys hardware configuration

3 系统软件设计

系统的软件设计基于 Nios II SBT for Eclipse 平台,采用 C 语言编写,主要负责对整体流程的控制和管理,包括数模转换、频谱变换、一阶模获取、模量计算和对 IP 核的调用控制等。

3.1 软件系统初始化

系统软件的初始化主要是采用 C 语言完成数据采集和数据存储命令的发送及控制,当系统上电时,给出一个触发一轮的测量信号,开始一轮的测量。FPGA 内部的 ADC 模块提供 A/D 工作的时钟,同时 Nios II 软核处理器配置各个模块的地址,地址配置完成后发送命令给芯片,按照 ADC 芯片的时序,完成一次测量,并将测量结束的信号传递给 adc_fifo 模块,向 FIFO 寄存器中写入测量数据。

3.2 频谱变换

频谱变换采用快速傅里叶变换(FFT)算法^[14]实现。FFT 利用旋转因子 $W_N = e^{-j \times 2\pi / N}$ 的对称性和周期性等性质将离散傅里叶变换(DFT)的计算逐次分解成较小点数的 DFT,以减少运算次数。本研究采用时域抽取的基-2 FFT 算法,算法主要由输入模块、旋转因子模块、位反转模块、蝶形运算模块、输出模块等组成。

FFT 频域变换模块使用 C 语言在 Eclipse 软件

中编写,将信号采集到的数据按照倒序的方式输入,根据输入信号的长度确定 FFT 的级数,并调用旋转因子进行蝶形运算,每一级含有 $N/2$ 个蝶形单元。每一级蝶形单元根据旋转因子的不同进行分组,每组有相同的结构和旋转因子,当一级蝶形运算结束后,判断是否继续,如果继续,对数据进行分组(位反转)之后再继续进行蝶形运算。最后对 FFT 运算后的数据进行绝对值求解,得到实际的幅度值。

3.3 一阶模获取及模量计算

时域信号经傅里叶变换得到的幅值谱中第一个较大的极值点对应的频率就是信号的基频,编写 Max() 函数搜寻频谱的最大幅值,得到最大幅值对应的采样点(n),再通过公式(6)计算出频率 f_n ,即为信号的基频。

$$f_n = (n - 1) \times N \tag{6}$$

式中, f_n 、 N 分别为采样频率及总采样点数。

将求得的弯曲振动、扭转振动信号的基频 f_f 、 f_t 分别代入公式(1)和公式(3),即可求出试样的弹性模量和剪切模量。

3.4 基于 Qt 的用户界面设计

Qt 是一个跨平台的 C++ 图形用户界面的应用程序框架^[15], 主要用来开发图形用户界面(Graphical User Interface, GUI) 程序,它使用特殊的代码生成扩展宏来构建面向对象的框架,具有运算速度快、可移植性强、方便等特点。本研究在 Windows 平台下开发了一个控制数据采集和显示的 Qt 用户界面,如图 5 所示。在 Qt 中,使用 QCustomPlot 控件绘制采集到的原始信号以及频谱变换后的波形,使用 addGraph() 函数添加图层,使用 Plot() 函数绘制曲线。使用 QLabel 控件将板材的动态弹性模量或剪切模量实时显示在主窗口。

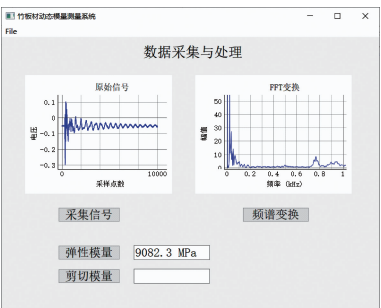


图 5 Qt 图形界面
Fig. 5 Qt graphical interface

4 结果与分析

本试验以江西宜春某厂生产的竹地板为例,试

验前将试件置于实验室气干,应用称质量法测得试件密度,按照尺寸将试验材料分为 4 组,如图 1 所示,粘贴全桥电阻应变传感器,通过在线检测系统对试样的动态弹性模量和动态剪切模量进行测量。试验材料分为 4 组,每组有 2 个重复试样,每个试样测量 5 次,取平均值,结果如表 1 所示。

表 1 试件弹性模量和剪切模量的测试值
Table 1 Test values of elastic modulus and shear modulus of specimens

试件序号	板材尺寸/ mm×mm×mm	密度/ (kg·m ⁻³)	动态弹性模量/ MPa	动态剪切模量/ MPa
1-1	1 011×109×11	712	9 082.30	359.28
1-2	1 011×109×11	712	9 213.60	353.04
2-1	900×109×11	712	9 047.40	331.23
2-2	900×109×11	712	8 874.50	336.60
3-1	1 022×120×15	671	9 899.90	560.17
3-2	1 022×120×15	671	10 245.00	573.83
4-1	900×120×15	671	10 160.00	537.91
4-2	900×120×15	671	10 141.00	545.15

采用分离刚度法^[16]对系统检测结果进行验证,分离刚度法测量原理如图 6 所示。当材料受到大小为 P 的力作用时,分别在材料的中点以及两端用千分表测量其挠度。此时根据一阶剪切变形理论,中点 H 处的挠度有:

$$w_H = \frac{Pa^2}{6D} + \frac{kPa}{2C} \tag{7}$$

表 2 试件的测试值与相对误差
Table 2 Test values and relative errors of specimens

组号	厚度/ mm	弹性模量			剪切模量		
		冲击法 E 平均值/MPa	分离刚度法 E 平均值/MPa	相对误差/ %	冲击法 G 平均值/MPa	分离刚度法 G 平均值/MPa	相对误差/ %
1	11	9 147.95	9 332.21	1.97	356.16	329.62	7.45
2	11	8 960.95	9 199.06	2.59	333.92	320.97	3.88
3	15	10 072.45	10 057.97	0.14	567.00	538.43	5.04
4	15	10 150.50	10 034.23	1.15	541.53	539.80	0.32

从表 2 可以看出,板材在线测量系统测得的结果和分离刚度法测得的弹性模量相对误差在 0.14%~2.59%,平均误差为 1.46%;剪切模量的相对误差在 0.32%~7.45%,平均误差为 4.18%。试验表明,两种方法测量结果基本一致,满足工程测试的实际需求。

5 结 论

设计了竹木板材动态模量在线检测系统,为快速及无损检测竹木板材力学性能提供了新的测试方案,结果表明:

式中: D 为弯曲刚度; C 为剪切刚度; k 为修正系数,当材料为矩形横截面时, $k=3/2$ 。将由弯矩引起的纯弯挠度用 w^M 表示,由横向剪力引起的横向剪切挠度用 w^Q 表示,则公式(7)可写成:

$$w_H = w^M + w^Q \tag{8}$$

当 $b=2a/3$ 时,材料的外伸端 A 或 B 点处的挠度就是中点 H 处的纯弯挠度,即:

$$w_A = w_B = w^M = \frac{Pa^2}{6D} \tag{9}$$

这样就实现了两个刚度的分离,从而求出弹性模量(E)和剪切模量(G)。

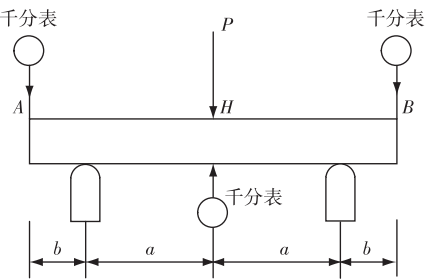


图 6 分离刚度法原理图
Fig. 6 Separating rigidity method principle

分离刚度法的试验使用 SUNS 万能力学试验机,采用三点弯曲法分别测得不同跨距(180,240,300 mm)及不同厚度(11,15 mm)试样下的弹性模量和剪切模量。分离刚度法与系统测量结果对比见表 2。

- 1)采用 FPGA 开发板提供的集成开发环境,应用软硬件结合的设计思想搭建测试系统,具有设计便捷、应用灵活、易于调试等优点,为原型机的研制提供了可靠的解决方案。
- 2)冲击应力波法具有快速、简便等优点,已被用作测试板材动态模量的国际标准,也可用于竹木板材动态弹性模量和剪切模量的测试。
- 3)与分离刚度法相比较,应用冲击应力波法测得的弹性模量、剪切模量的平均相对误差分别为 1.46%和 4.18%,满足工程测试的实际需求。

参考文献(References):

- [1] 冷春晖, 易敏, 张露, 等. 材性快速评估技术在刨花楠活立木木材密度和弹性模量预测中的应用[J]. 林业工程学报, 2018, 3(6): 56-61. DOI: 10.13360/j.issn.2096-1359.2018.06.009.
- LENG C H, YI M, ZHANG L, et al. Application of wood properties rapid assessment technology in prediction of wood density and modulus of elastic of standing tree of *Machilus pauhiol* [J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(6): 56-61.
- [2] 田昭鹏, 王朝晖, 王金林, 等. 漠河产兴安落叶松弹性模量分级与力学性能[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(3): 211-215. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2017.03.39.
- TIAN Z P, WANG Z H, WANG J L, et al. Classification in modulus of elasticity and mechanical properties of larch lumber in Mohe [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(3): 211-215.
- [3] AIRA J R, ARRIAGA F, ÍÑIGUEZ-GONZÁLEZ G. Determination of the elastic constants of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood by means of compression tests [J]. Biosystems Engineering, 2014, 126: 12-22. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.07.008.
- [4] 逢海峰, 赵辉, 张美玲. 板材弹性模量数控检测设备研究的发展[J]. 林业机械与木工设备, 2005, 33(3): 8-11. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2953.2005.03.002.
- PANG H F, ZHAO H, ZHANG M L. A study on the development of numerically controlled testing equipment of plank elastic modulus [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2005, 33(3): 8-11.
- [5] 王思敏, 蒋身学. 毛竹材声学振动特性研究[J]. 竹子研究汇刊, 2011, 30(1): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6567.2011.01.001.
- WANG S M, JIANG S X. Timber acoustic vibration properties of Moso bamboo [J]. Journal of Bamboo Research, 2011, 30(1): 1-4.
- [6] 余观夏, 林扬帆, 苏峻, 等. 振动法同时测定动态杨氏模量和剪切模量[J]. 物理实验, 2011, 31(3): 1-3. DOI: 10.3969/j.issn.1005-4642.2011.03.001.
- YU G X, LIN Y F, SU J, et al. Simultaneous measurement of dynamic Young modulus and shear modulus using vibration method [J]. Physics Experimentation, 2011, 31(3): 1-3.
- [7] 王岍, 韩立立, 王天任. 动态杨氏模量测量仪智能化改进研究[J]. 计量技术, 2016(8): 21-23. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0771.2016.08.06.
- WANG Q, HAN L L, WANG T R. Research on intelligent improvement of dynamic Young's modulus measuring instrument [J]. Measurement Technique, 2016(8): 21-23.
- [8] HODOUŠEK M, DIAS A M P G, MARTINS C, et al. Comparison of non-destructive methods based on natural frequency for determining the modulus of elasticity of *Cupressus lusitanica* and *Populus × canadensis* [J]. BioResources, 2016, 12(1): 270-282. DOI: 10.15376/biores.12.1.270-282.
- [9] KÁNNÁR A, CSIHA C. Comparative analysis of static and dynamic modulus of pannónia poplar timber from different plantations [J]. Wood Research, 2021, 66(2): 195-202. DOI: 10.37763/wr.1336-4561/66.2.195202.
- [10] 付扬, 李成. 基于 Nios II 软核的音频播放系统设计与实现[J]. 现代电子技术, 2020, 43(10): 59-62. DOI: 10.16652/j.issn.1004-373x.2020.10.015.
- FU Y, LI C. Design and implementation of audio playing system based on Nios II soft core [J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(10): 59-62.
- [11] ASTM. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration: ASTM E1876[S]. ASTM, 2015.
- [12] 张莉, 周燕云, 黄晓辉. 采用 Qsys 实现的时间管理系统[J]. 现代电子技术, 2021, 44(10): 15-18. DOI: 10.16652/j.issn.1004-373x.2021.10.004.
- ZHANG L, ZHOU Y Y, HUANG X H. Time management system realized by Qsys [J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(10): 15-18.
- [13] 第五强强, 张伟伟. 基于应变片的弹性体分布式位移测量方法[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(3): 422-427. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2758.2017.03.010.
- DIWU Q Q, ZHANG W W. Measurement of distributed displacement for elastic body based on strain gauges [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(3): 422-427.
- [14] 袁泉, 郭子祺, 姚谦, 等. 基于并行处理的 FFT 快速算法[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(16): 4709-4714. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2008.16.072.
- YUAN Q, GUO Z Q, YAO Q, et al. Highly effective FFT algorithm based on parallel techniques [J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(16): 4709-4714.
- [15] 刘依晗, 丑武胜, 董明杰. 基于 QT/E 串口通信的手持监控器[J]. 现代电子技术, 2013, 36(20): 110-112. DOI: 10.16652/j.issn.1004-373x.2013.20.028.
- LIU Y H, CHOU W S, DONG M J. QT/E-based handheld monitor for serial communication with lower computers [J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(20): 110-112.
- [16] 卫佩行, 王泉中, 周定国. 分离刚度法测试杨木单板层积材木梁剪切模量的试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(S2): 177-180.
- WEI P X, WANG Q Z, ZHOU D G. Shear modulus's measurement of laminated veneer lumber from poplar through separating rigidity [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(S2): 177-180.

(责任编辑 田亚玲)