北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

激励接收点布局对木棒超声导波信号特征的影响

崔天乐 张厚江

Effects of excitation-reception point layout on characteristics of ultrasonic guided wave signals in wooden sticks

Cui Tianle, Zhang Houjiang

引用本文:
崔天乐, 张厚江. 激励接收点布局对木棒超声导波信号特征的影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(8):182-191. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250201
Cui Tianle, Zhang Houjiang. Effects of excitation-reception point layout on characteristics of ultrasonic guided wave signals in wooden sticks[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(8):182-191. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250201

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250201

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

金中都水关遗址木结构无损检测与评估
Nondestructive testing and condition assessment of the wooden structures of Jinzhongdu Watergate Site
北京林业大学学报, 2022, 44(11): 140-151. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220251

古建筑木结构无损检测内容与研究进展
Content and research progress in nondestructive testing of wooden structures in ancient architecture
北京林业大学学报, 2024, 46(4): 1-13. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20240015

辐射松层板抗弯性能的指接参数优化及无损检测研究
Optimization of finger joint parameters and nondestructive testing of bending properties of radiata pine laminates
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 148-160. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210351

故宫养心殿墙体木柱缺陷状况无损检测研究
Nondestructive testing of defect condition of wall wood columns in Yangxin Hall of the Palace Museum, Beijing
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 127-139. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210028

基于红外热成像的古建筑望板腐朽状况无损检测研究
Nondestructive testing of the decay condition of ancient building roof boarding based on infrared thermal imaging
北京林业大学学报, 2023, 45(7): 139-152. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220516

基于红外热成像的古建筑墙内暗柱材料缺失检测
Material deficiency test of fully-concealed wood column in walls of ancient buildings based on infrared thermal imaging
北京林业大学学报, 2024, 46(3): 132-144. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230307

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250201

激励−接收点布局对木棒超声导波信号特征的影响

崔天乐　张厚江
（北京林业大学工学院，北京林业大学木材无损检测国际联合研究所，北京 100083）

摘要:【目的】工程木柱作为建筑结构中的关键承重构件，其缺陷会直接影响结构的安全性与耐久性。然而，传统的无损检测方法在检测效率和操作空间方面存在明显局限性，难以满足工程木柱检测的实际需求。目前，工程木柱无损检测中，超声导波激励与接收布点缺乏系统的理论支撑，这限制了超声导波技术在工程木柱检测中的有效应用。因此，亟需深入研究超声导波在工程木柱中的传播特性，以优化激励与接收布点方案。本研究拟通过探明超声导波在木柱中的传播特性，为工程木柱无损检测的激励−接收布点方案提供科学依据。**【方法】**首先通过理论分析总结实心圆柱体内超声导波的传播模态，随后搭建超声导波检测平台，以樟子松木棒为试件，开展侧面单点、侧面多点及端面激励 3 类试验，系统考察激励−接收点布局对信号特征的影响。**【结果】**(1)无论侧面还是端面激励，木棒内都会同时产生弯曲模态波(F 波)和纵向模态波(L 波)，只是两者占据的主导地位不同；侧面激励以 F 波为主，端面激励以 L 波为主。因此，可依据目标模态的检测需求，合理选择激励位置。(2)侧面单点激励时，激励点与接收点的间距越大，F 波与 L 波区分越明显。因此，检测时应将激励与接收装置布设于棒体两端，或尽可能拉开距离，以进一步放大模态分离效果。(3)侧面多点激励时，在同一横截面圆周上对称增加激励点数，可以增强 L 波，抑制 F 波，且抑制效果随点数增加而增强。因此，若需激发 L 波却无法在端面布设激励源，可在端面邻近侧面布置一周对称激励。(4)端面激励时，导波接收点在端面或其邻近侧面，测得的超声导波信号相似。因此，当端面激励但另一端面不便布设传感器时，可选择在另一端面邻近侧面进行接收。**【结论】**激励−接收点位置及其数量对木棒中超声导波的模态波组成及其幅值占比具有明显的影响，这一特征规律可直接指导工程木柱的超声导波检测布点设计，为后续的木材无损检测奠定方法基础。

关键词：无损检测；超声导波；木棒；激励−接收点布局；信号特征；导波模态
中图分类号：TU366.2；TB553　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)08−0182−10
引文格式：崔天乐，张厚江. 激励−接收点布局对木棒超声导波信号特征的影响［J］. 北京林业大学学报，2025，47(8)：182−191. Cui Tianle, Zhang Houjiang. Effects of excitation-reception point layout on characteristics of ultrasonic guided wave signals in wooden sticks［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(8): 182−191.

Effects of excitation-reception point layout on characteristics of ultrasonic guided wave signals in wooden sticks

Cui Tianle　Zhang Houjiang
(School of Technology, Joint International Research Institute of Wood Nondestructive Testing and Evaluation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］As a key load-bearing component in building structures, defects in engineered wooden columns will directly affect the structural safety and durability. However, traditional non-destructive testing methods have certain limitations in terms of detection efficiency and operational space, making it difficult to meet the practical requirements for inspecting engineering timber columns. Currently, the layout of ultrasonic guided wave excitation and reception in the non-destructive testing of engineering timber

收稿日期: 2025−06−05　**修回日期:** 2025−08−13
基金项目: 故宫博物院科研项目(201909012)。
第一作者: 崔天乐。主要研究方向：木材无损检测。Email：13120482398@163.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学工学院。
责任作者: 张厚江，教授，博士生导师。主要研究方向：木材无损检测。Email：hjzhang6@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

columns lacks systematic theoretical support, which restricts the effective application of ultrasonic guided wave technology in this field. Therefore, there is an urgent need for in-depth research on the propagation characteristics of ultrasonic guided waves in engineering timber columns to optimize the layout schemes for excitation and reception. This paper aims to investigate the propagation characteristics of ultrasonic guided waves in timber columns to provide a scientific basis for layout schemes of excitation and reception in the non-destructive testing of engineering timber columns. [**Method**] First, the propagation modes of ultrasonic guided waves in solid cylinders were summarized through theoretical analysis. Subsequently, an ultrasonic guided wave detection platform was built, with P*inus sylvestris* var. *mongolica* wooden sticks as test pieces, to carry out three types of tests: single-point lateral excitation, multi-point lateral excitation, and end-face excitation. The effects of excitation-reception point layout on signal characteristics was systematically investigated. [**Result**] (1) Whether excited from the side or the end face, both flexural mode waves (F-waves) and longitudinal mode waves (L-waves) were generated simultaneously in the wooden sticks, but they differed in their dominant positions; side excitation was dominated by F-waves, while end-face excitation was dominated by L-waves. Therefore, the excitation position can be reasonably selected according to the detection requirements of target mode. (2) In the case of single-point lateral excitation, the greater the distance between the excitation point and the reception point was, the more obvious the distinction between F-waves and L-waves was. Hence, during detection, the excitation and reception devices should be arranged at both ends of the stick, or the distance between them should be increased as much as possible to further amplify the mode separation effect. (3) For multi-point lateral excitation, symmetrically increasing the number of excitation points on the circumference of same cross-section can enhance L-waves and suppress F-waves, and the suppression effect can be strengthened with point number invreasing. Therefore, if it is necessary to excite L-waves but it is not possible to arrange an excitation source on the end face, a symmetrical excitation can be arranged on the adjacent side of the end face. (4) In the case of end-face excitation, the ultrasonic guided wave signals measured by the guided wave reception points on the end face or its adjacent side were similar. Thus, when the end face is excited but it is inconvenient to arrange a sensor on the other end face, the reception can be performed on the side adjacent to the other end face. [**Conclusion**] The positions and quantities of excitation-reception points have a significant impact on the composition of modal waves and their amplitude proportions of ultrasonic guided waves in wooden sticks. This characteristic law can directly guide the design of ultrasonic guided wave detection point layouts for engineered wooden columns, laying a methodological foundation for subsequent non-destructive testing of wood.

Key words: nondestructive examination; ultrasonic guided wave; wooden sticks; excitation-reception point layout; signal characteristics; guided wave modes

木材作为一种天然、各向异性的工程材料，在多种工程场景中发挥着重要作用，从古建筑中的承重木柱[1]到传统电力传输中的木制电线杆[2]，再到土木工程中的木桩基础[3]。尤其是古建筑木结构，其承载着丰富的历史和文化价值，对其进行无损检测不仅有助于评估结构的安全性和耐久性，还能为修复和保护工作提供科学依据。然而，传统的木柱无损检测方法存在诸多不足，例如检测效率低、操作空间需求大等[4]，难以满足现代工程对木柱无损检测的高要求。

近年来，超声导波技术作为一种先进的无损检测方法，在金属管道、铁轨、复合材料板等工程领域得到了广泛研究和应用[5]。该技术具有传播距离远、衰减小的特点，能够实现大范围、高效率的非破坏性检测。例如：马骋[6]利用超声导波对混凝土钢筋进行检测，实现了对钢筋腐蚀状态的定性判断和腐蚀程度的定量评价；汪佳宇等[7]通过超声波换能器研究了钢筋机械损伤的位置和深度；Chen[8]等则证明了扭转模态导波在大直径管道中检测微小缺陷的高效性。这些研究成果为超声导波在木材无损检测中的应用提供了宝贵思路，但木材的各向异性结构和复杂缺陷类型使其检测难度远高于金属材料。目前，超声导波在木材检测中的研究仍处于初步探索阶段，现有研究多集中于木材力学性能参数的评估，例如：

Veres 等[9]通过建模和实验验证了木材的频散特性，Dahmen 等[10]利用兰姆波(板材中的超声导波)测量木材的弹性常数。虽然，Li 等[11]和 Bakar 等[12]分别研究了超声导波在木电线杆和木棒中应用的可能性，但对于超声导波在木柱中传播形式和规律的探讨还处于空白状态。为将导波技术真正应用于工程木柱检测，首要任务是厘清超声导波在木柱中的传播机理及其模态演化规律。然而，实际工况复杂多变[13]，木柱的几何尺寸、材料非均质性及边界条件共同限制了激励–接收传感器的布设空间，并进一步制约了可激发与可接收的导波模态。因此，优化激励–接收布局不仅是提升检测灵敏度的关键，更是实现导波技术现场有效性的先决条件。唯有在受限空间内合理布设激励点与接收点，才能最大限度生成并捕获所需模态，从而为超声导波用于木柱无损检测奠定可行基础。

基于上述背景，本研究拟以缩小尺度的木棒为替代试件，首先系统归纳超声导波在实心圆柱体内的传播模态；随后通过试验逐一考察激励–接收点的位置、数量对导波信号特征的影响，从而为后续将超声导波技术推广至工程木柱的无损检测积累必要的基础数据与方法依据。

1 理论基础与分析

1.1 超声导波在实心圆柱体中的模态

当激励方向垂直于圆柱体表面时，不同位置的激励点均可在实心圆柱体内同时激发纵向模态 $L(n, m)$与弯曲模态 $F(n, m)$两类导波(图 1)，其中 n 表示周向阶数，m 为模态族序号。

当激励方向垂直于实心圆柱体端面时，主要激发的是纵向模态导波。图 2 给出了该模态在圆柱体

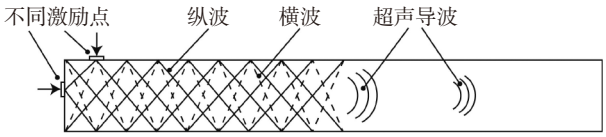


图 1 超声导波的形成与传播示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the formation and propagation of ultrasonic guided wave

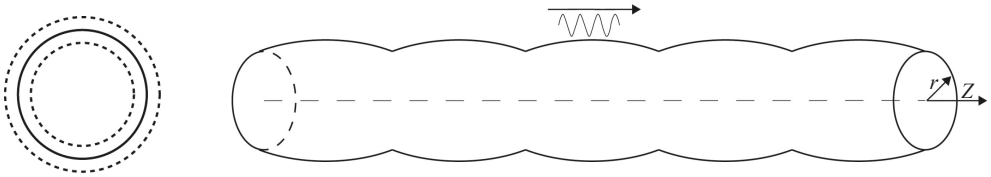
内的传播示意：各质点的振动关于中心轴对称，不会发生任何角度上的周向偏转，仅产生径向和轴向位移，周向位移始终为零。由于纵向模态呈轴对称，其周向阶数 $n = 0$，通常记作 $L(0, m)$。

当激励垂直作用于实心圆柱体侧面且为单点激励时，主要激发的是弯曲模态导波。圆柱的对称性使得两侧质点的水平运动相互抵消(如 a、c 两点)，宏观上仅呈现垂直方向的横截面位移(图 3a)。弯曲模态导波在向前运动的过程中主要包含径向、轴向两个方向的介质质点位移；受曲率、泊松效应及模式耦合的影响，还会产生微弱的周向分量[14](图 3b)。因此，弯曲模态呈非轴对称分布，周向阶数 $n \geqslant 1$。一般情况下，研究 $n = 1$ 时的模态，即 $F(1, m)$模态。

若在实心圆柱体侧面的同一横截面上，以幅值、频率和相位均相同的两点对称激励，则对称位置的质点将产生反向位移，从而增强质点轴向位移(图 4a)。若在同一横截面实施多点对称激励，各激励点的幅值、频率与相位保持一致，质点轴向位移将进一步增强，会出现类似于端面激励的纵向模态横截面质点运动(图 4b)。

1.2 木棒频散曲线绘制

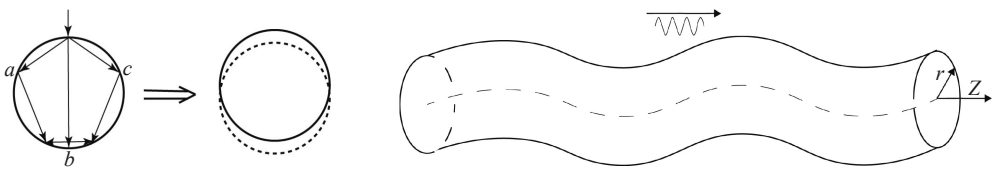
鉴于木材是一种各向异性材料，常在研究中被简化为正交各向异性模型。其物理性质在 3 个主轴



a 横截面运动　　b 纵向运动

图 2 实心圆柱体中超声导波纵向模态传播示意图

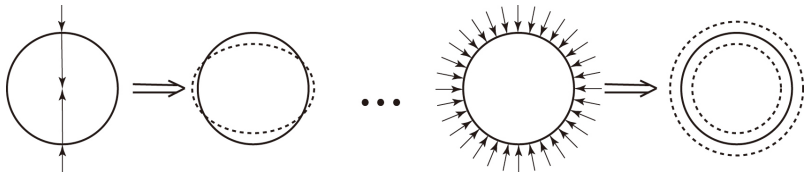
Fig. 2 Schematic diagram of longitudinal-mode ultrasonic guided wave propagation in a solid cylinder



a 侧面单点激励横截面运动　　b 纵向运动

图 3 实心圆柱体中超声导波弯曲模态传播示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flexural-mode ultrasonic guided wave propagation in a solid cylinder



a 两点对称激励　　b 多点对称激励

图 4　侧面两点及多点对称激励时横截面位移示意图

Fig. 4　Cross-sectional displacement diagrams under two-point and multi-point symmetric excitation on the lateral surface

方向上各不相同，3 个主轴方向分别为纵向(L)、径向(R)和弦向(T)。其中，纵向 L 是沿着木材纹理或纤维排列的方向，径向 R 为垂直于年轮方向，而弦向 T 则与年轮相切。由于木材纤维主要沿纵向排列，使得其顺纹方向与径向的弹性模量存在显著差异，相较而言，径向与弦向之间的差异较小。因此，在本研究中将木材简化处理为横观各向同性材料[15]。

在横观各向同性材料中，超声导波的传播受到弹性常数约束关系的影响，该关系如式(1)所示。将式(1)代入已有的解，可推导出横观各向异性材料对应的柔度矩阵 $\boldsymbol{S}$，其中 E、ν、G 分别为给定方向上的杨氏模量、泊松比和剪切模量。由于横观各向同性材料在径向与弦向上的力学性能相同，因此满足 $E_{\mathrm{R}}=E_{\mathrm{T}}$，$\nu_{\mathrm{LR}}=\nu_{\mathrm{LT}}$，$G_{\mathrm{LR}}=G_{\mathrm{LT}}$，将这些等式代入柔度矩阵后，可得式(2)所示的简化柔度矩阵[16]。根据刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 与柔度矩阵 $\boldsymbol{S}$ 互为逆矩阵的关系，有 $\boldsymbol{K}=\boldsymbol{S}^{-1}$。

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i}=\frac{\nu_{ji}}{E_j} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} \frac{1}{E_{\mathrm{L}}} & -\frac{\nu_{\mathrm{LR}}}{E_{\mathrm{L}}} & -\frac{\nu_{\mathrm{LR}}}{E_{\mathrm{L}}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{\mathrm{LR}}}{E_{\mathrm{L}}} & \frac{1}{E_{\mathrm{R}}} & -\frac{\nu_{\mathrm{RT}}}{E_{\mathrm{R}}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{\mathrm{LR}}}{E_{\mathrm{L}}} & -\frac{\nu_{\mathrm{RT}}}{E_{\mathrm{R}}} & \frac{1}{E_{\mathrm{R}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{\mathrm{RT}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{\mathrm{LR}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{\mathrm{LR}}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

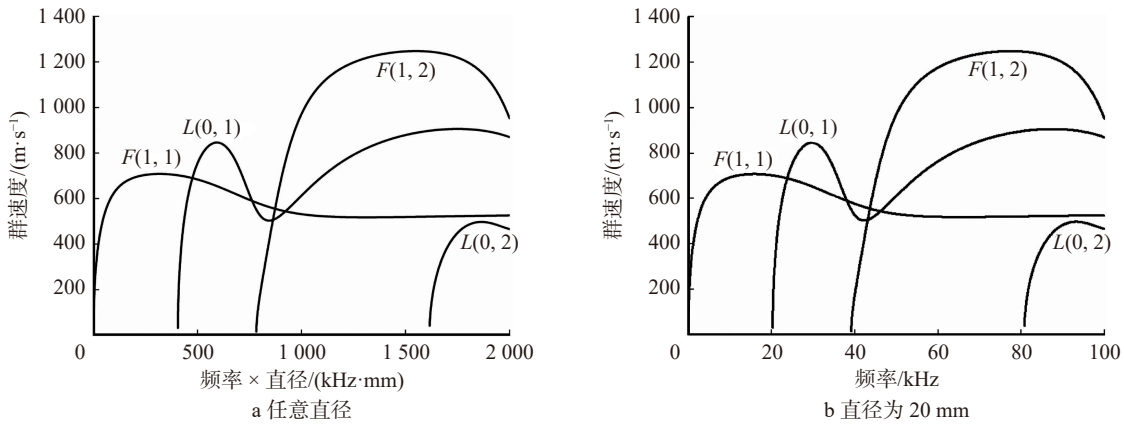
本研究以樟子松为试验对象，其密度取 500 kg/m^3，力学参数列于表 1，数据源自文献[17]与《中国木材志》[18]。视木材为横观各向同性，依据表 1 参数及式(2)，并借助 GUIGUW-V2.2 软件[19]绘制樟子松木棒的群速度–频率频散曲线(图 5)。图 5a 横坐标以 kHz·mm 表示，适用于任意直径的樟子松木棒；图 5b 横坐标为 kHz，对应直径 20 mm 的樟子松木棒。曲

表 1　樟子松材料参数

Tab. 1　Material parameters of *Pinus sylvestris*

E_{L}/GPa	E_{R}/GPa	E_{T}/GPa	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	G_{LR}/GPa	G_{LT}/GPa	G_{RT}/GPa
9.171	0.832	0.832	0.02	0.02	0.37	0.607	0.607	0.146

注：E_{L} 为试件顺纹方向弹性模量，E_{R} 为径向弹性模量，E_{T} 为弦向弹性模量，ν_{LR} 为径面的泊松比，ν_{LT} 为切面的泊松比，ν_{RT} 为端面的泊松比，G_{LR} 为径面内的剪切模量，G_{LT} 为切面内的剪切模量，G_{RT} 为端面内的剪切模量。



a 任意直径　　b 直径为 20 mm

图 5　樟子松木棒群速度–频率频散曲线

Fig. 5　Velocity-frequency dispersion curves for *P. sylvestris* sticks

线显示，随频率升高，木棒中可传播的超声导波模态数目会增加。

2 材料与方法

2.1 木棒试件与陶瓷压电片

由于樟子松(*Pinus sylvestris*)是我国北方古建筑木构件常见树种之一，所以本研究木棒试件的树种选用了樟子松。根据《清式营造则例》[20]中记载，古建筑木柱常见的径高比为 1∶10。考虑工程背景和试验研究的便捷性，本研究木棒试件尺寸定为 Φ20 mm × 200 mm。使用北京英业达公司 YM-50 两用型木材含水率检测仪测得木棒试件含水率为 6%。

基于陶瓷压电片的逆压电效应和压电效应原理，选用 PZT-5H 型陶瓷压电片(浙江绍兴神镭超声波设备有限公司生产)作为超声激励器件和导波传感接收器件。该压电片包括圆形与方形两种形状，其中圆形陶瓷压电片直径为 10 mm，厚度为 0.5 mm，方形陶瓷压电片尺寸为 10 mm × 5 mm × 0.5 mm。圆形陶瓷压电片粘贴于木棒试件的端面，粘贴时需确保压电片中心与端面中心重合。方形陶瓷压电片用于粘贴在木棒试件的侧面，粘贴前要在木棒侧面相应位置打磨出一个平整的矩形区域，其尺寸略大于压电片尺寸，以便压电片能完全贴合。压电陶瓷片先用 502 胶水粘贴，再用木材专用胶进行二次粘贴，以确保压电陶瓷片与木棒牢固结合。图 6 为不同形状陶瓷压电片粘贴后的情形。两种陶瓷压电片的其他主要技术参数如表 2 所示。



图 6 不同形状陶瓷压电片粘贴后的情形

Fig. 6 Situation of bonded piezoelectric ceramic patches with different geometries

表 2 PZT-5H 型陶瓷压电片技术参数

Tab. 2 Technical parameters of PZT-5H type ceramic piezoelectric sheet

相对介电常数	机电耦合系数	居里温度/℃	压电应变常数
3 400	0.62	220	650

2.2 研究方法

2.2.1 试验平台的搭建

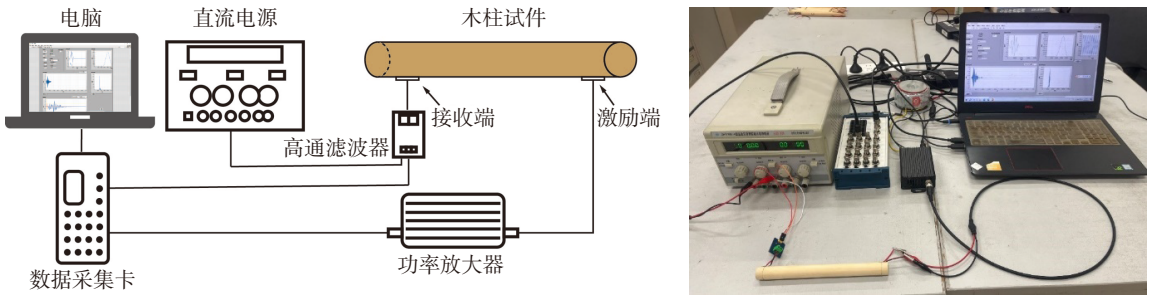
超声导波检测试验平台主要由硬件与软件两部分构成(图 7)。硬件包括 NI 数据采集卡(USB-6218)、郑州飞逸功率放大器(FPA101A)、陶瓷压电片(PZT5)、高通滤波器、直流稳压电源(DH1718E-4)和计算机。软件使用 LabVIEW 语言自主编写，存储于计算机内。软件控制数据采集卡模拟信号输出端口，按预设要求发出激励信号，经功率放大器放大 20 倍后，得到峰值 ±50 V 的激励电压信号，并施加在作为激励器件的陶瓷压电片上，实现超声导波的激发。导波信号的接收依靠作为传感器件的陶瓷压电片，在导波传播过程中随检测点振动产生电信号。该电信号通过由直流电源供电的高通滤波器传送至数据采集卡模拟信号接收端口，由软件控制实现同步采集，采样频率为 250 kHz。随后，采集到的信号通过计算机程序进行放大、滤波、降噪和截取等处理，最终呈现在 LabVIEW 的前面板上。

2.2.2 激励信号的选择

激励信号采用汉宁(Hanning)窗调制的五周期正弦信号，函数关系如式(3)所示。根据图 5 中的频散曲线，在 20 ~ 40 kHz 之间会同时产生 $F(1, 1)$ 和 $L(0, 1)$ 两个模态的导波，并且在 30 kHz 附近两个模态的群速度相差较大。经预试验尝试，最终选择频率 30 kHz 的激励信号，图 8 为数据采集卡模拟信号输出端口输出的激励信号示意图。

$$y(t)=\frac{1}{2}\left(1-\cos\left(\frac{2\pi ft}{N}\right)\right)\sin(2\pi ft) \tag{3}$$

式中：f 表示频率，N 表示周期数，t 表示时间参数。



a 试验平台示意图 b 试验平台照片

图 7 超声导波试验平台示意图及照片

Fig. 7 Schematic diagram and photos of ultrasonic guided wave test platform

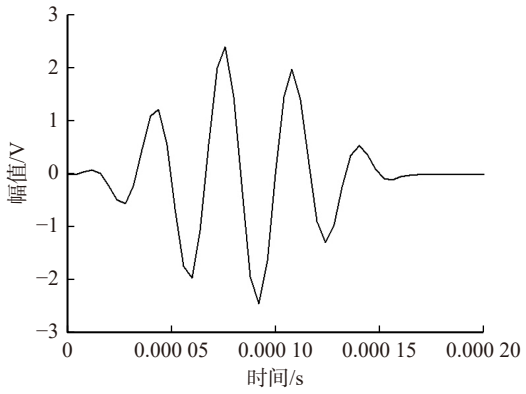


图 8　30 kHz 超声导波激励信号图

Fig. 8　Diagram of 30 kHz ultrasonic guided wave excitation signal

2.2.3　激励和接收点布局对超声导波信号特征影响的试验设计

木柱在工程结构中不同应用场景对超声激励点和导波接收点布置有不同限制。针对具体应用环境合理布置激励点和信号接收点，对提高导波信号的可读性与分析有效性至关重要。本研究共设计 3 类试验，包括侧面单点激励试验、侧面多点激励试验、端面激励试验。

在 Φ20 mm × 200 mm 樟子松木棒试件上，在相应位置粘贴相应的陶瓷压电片。矩形压电片粘贴于木棒侧面，共计 4 个（图 9）。其中 E_1 作为激励点，E_1 处压电片中心距离试件端面为 10 mm；R_1、R_2 和 R_3 作为接收点，R_3 处压电片中心距离试件另一端面为 10 mm，R_1、R_2 和 R_3 处相邻压电片之间中心距离为 45 mm。圆形压电片粘贴于木棒两端，E_E 作为激励点，R_E 作为接收点。在激励点 E_1 所在的木棒试件横截面外圆周上，均匀粘贴压电片共计 8 个，分别进行多组数量的侧面激励试验研究（图 10、表 3）。

2.2.4　导波信号的处理

试验采集到的信号包含较多的噪声，为获取稳定且便于分析的检测信号，在信号采集的同时，进行相应的信号预处理——主要有硬件滤波和软件信号处理。首先，利用高通滤波器在信号传到采集卡前进行硬件滤波，消除信号的零点漂移问题。然后，利用软件对信号进行放大、小波去噪和带通滤波等处理。采集到的超声导波信号幅值较小，为了便于试验时及时观察变化情况，利用 LabVIEW 软件将其放大 100 倍。通过小波去噪将信号分解为不同频率的小波分量，以降低噪声的影响，得到信噪比更高的超声导波信号。选择 3 阶 Butterworth IIR 带通滤波器，其上下截止频率均距激励频率 2.5 kHz，可进一步滤除低频漂移与高频噪声。

在侧面多点激励试验研究中，为了更好地衡量各模态的主要占比情况，定义 L 模态峰值占比：同一个导波信号中，L 模态的峰值与其 F 模态的峰值之比，如式（4）所示。

$$\zeta = \frac{V_{\mathrm{L}}}{V_{\mathrm{F}}} \tag{4}$$

式中：V_{L} 为 L 模态的峰值，V_{F} 为 F 模态的峰值。

此外，在侧面多点激励试验研究中，为了更好地对 L 波的增强情况及占比情况进行观察，以每一个导波信号中 F 波峰值为基准，对其进行归一化处理，如公式（5）所示。

$$V_{\mathrm{norm}} = 2 \times \frac{V - \min(V_{\mathrm{F}})}{\max(V_{\mathrm{F}}) - \min(V_{\mathrm{F}})} - 1 \tag{5}$$

式中：V_{norm} 为处理后的幅值，V 为原始数据中的某个具体值，$\max(V_{\mathrm{F}})$ 为原始数据 F 波中的最大值，$\min(V_{\mathrm{F}})$ 为原始数据 F 波中的最小值。

3　结果与分析

3.1　侧面单点激励

图 11 给出了在侧面 E_1 处激励，R_3 处接收并经处理后的导波信号。根据图 5 b 的频散曲线，30 kHz 时 $L(0, 1)$ 波群速度约为 850 m/s，$F(1, 1)$ 波群速度约为 600 m/s。图 11 中首个波包到达时间约 0.22 ms，对应群速度 909 m/s，这与频散曲线中 $L(0, 1)$ 波的群速度相近；第二个波包到达时间约 0.40 ms，对应群速度 500 m/s，这与频散曲线中 $F(1, 1)$ 波的群速度相近。同时，$F(1, 1)$ 波包幅值高于 $L(0, 1)$。鉴于本文仅关注 $L(0, 1)$ 纵向模态和 $F(1, 1)$ 弯曲模态，下文分别简称 L 波和 F 波。由此可见，侧面单点激励在木棒中同时激发 F 波与 L 波，且 F 波占主导，与前述理论分析一致。

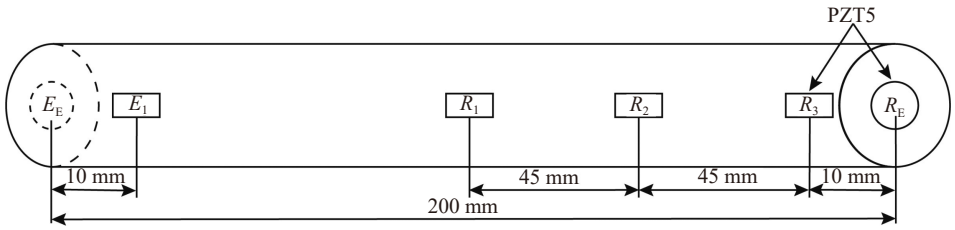


图 9　各陶瓷压电片粘贴位置示意图

Fig. 9　Schematic diagram of the position of each ceramic piezoelectric plate

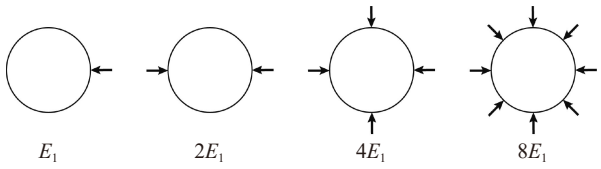


图 10 E_1 处横截面陶瓷压电片数量示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the number of ceramic piezoelectric patches on cross-section at E_1 position

表 3 试验类型、编号及陶瓷压电片位置、数量

Tab. 3 Test type, No. and location and quantity of ceramic piezoelectric patches

试验类型	试验编号	激励点数量	激励点位置	接收点位置
侧面单点激励	C-E_1-R_1	1	E_1	R_1
	C-E_1-R_2	1	E_1	R_2
	C-E_1-R_3	1	E_1	R_3
侧面多点激励	C-2E_1-R_3	2	E_1	R_3
	C-4E_1-R_3	4	E_1	R_3
	C-8E_1-R_3	8	E_1	R_3
端面激励	C-E_E-R_E	1	E_E	R_E
	C-E_E-R_3	1	E_E	R_3

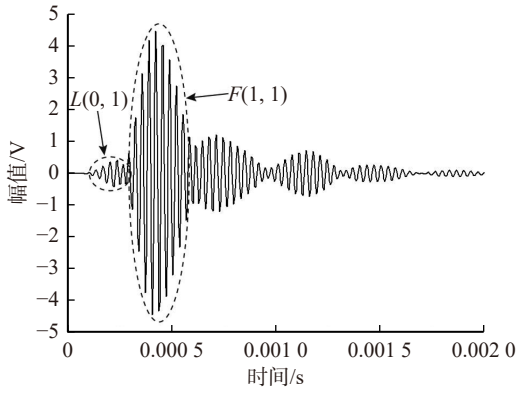


图 11 激励点 E_1 和接收点 R_3 的超声导波信号示例图

Fig. 11 Example diagram of ultrasonic guided wave signals with excitation point E_1 and receiving point R_3

图 12 给出了侧面 E_1 激励，不同接收点采集到的导波信号。当接收点位于 R_1（距激励点 90 mm）时，L 波与 F 波因传播距离短而几乎完全重叠，难以分辨。随着接收点移至 R_2（距激励点 135 mm），两波包开始分离，F 波仍占主导，但仍有部分重叠。继续移至 R_3（距激励点 180 mm），L 波与 F 波基本分离。由此可见，在木棒侧面单点激励条件下，激励点与接收点的距离越大，L 波与 F 波的可区分度越高。

3.2 侧面多点激励

图 13 对比了在 E_1 横截面圆周上布置不同数量的激励点时，R_3 接收到的导波信号。提取各波形中 L 模态与 F 模态的峰值后，绘制其与激励压电片数量的关系曲线（图 14）。随着激励点数目的增加，L

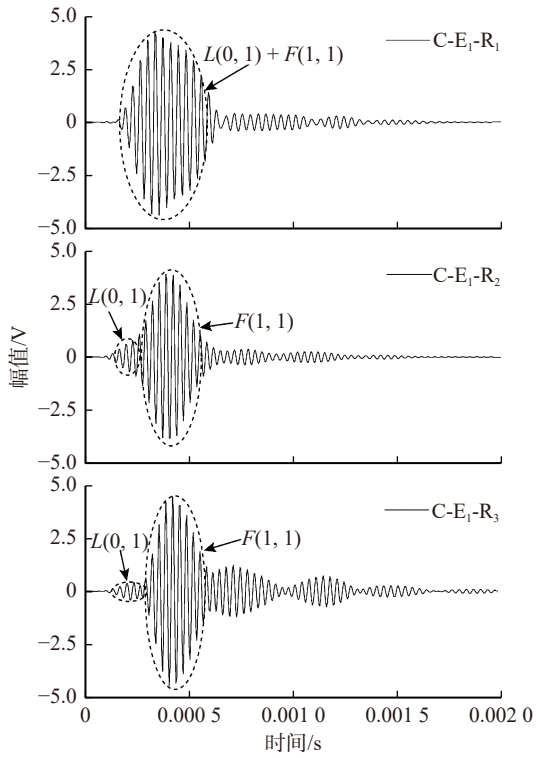


图 12 激励点 E_1，接收点分别为 R_1、R_2、R_3 的侧面单点激励下超声导波信号图

Fig. 12 Ultrasonic guided wave signal diagram of single-point excitation on the side with excitation point E_1, receiving points R_1, R_2, R_3, respectively

模态峰值逐渐上升，而 F 模态峰值逐步下降，且下降速率逐渐放缓。综合图 13 和图 14 可见，随着激励点数量的增加，F 波幅值减小，L 波的幅值增加；并且 F 波幅值减小程度要远大于 L 波的幅值增加程度。换言之，增加同一横截面圆周上激励点的数量，能够增强 L 波，抑制 F 波，且对 F 波的抑制更加明显。当该截面激励点数达到 8 个（近似在木棒侧片粘贴一圈）时，L 波峰值略高于 F 波，此时导波信号中 L 波、F 波占比几乎相同。

为进一步比较，对图 13 中的各组信号以 F 波的幅值为基准，按式（5）进行统一的归一化处理，结果如图 15 所示。从图中可以看出，随着同一横截面上激励点数量的增多，F 波在导波信号中所占比例逐渐减小，L 波在导波信号中所占比例逐渐增加。计算不同激励点数量下 L 波峰值占比，绘制两者关系图（图 16）。结合图 15 与图 16 可以看出，随着同一横截面上激励点数量的增多，L 波峰值占比与激励点数量间有着良好的正相关线性关系。

3.3 端面激励

图 17 给出了端面 E_E 激励时，由端面 R_E 与侧面 R_3 两点分别接收到的导波信号对比。图 17a 显示：在端面 R_E 处，L 波先于 F 波到达，二者分离清晰，且 L 波峰值明显高于 F 波，这表明纵向模态占主导。

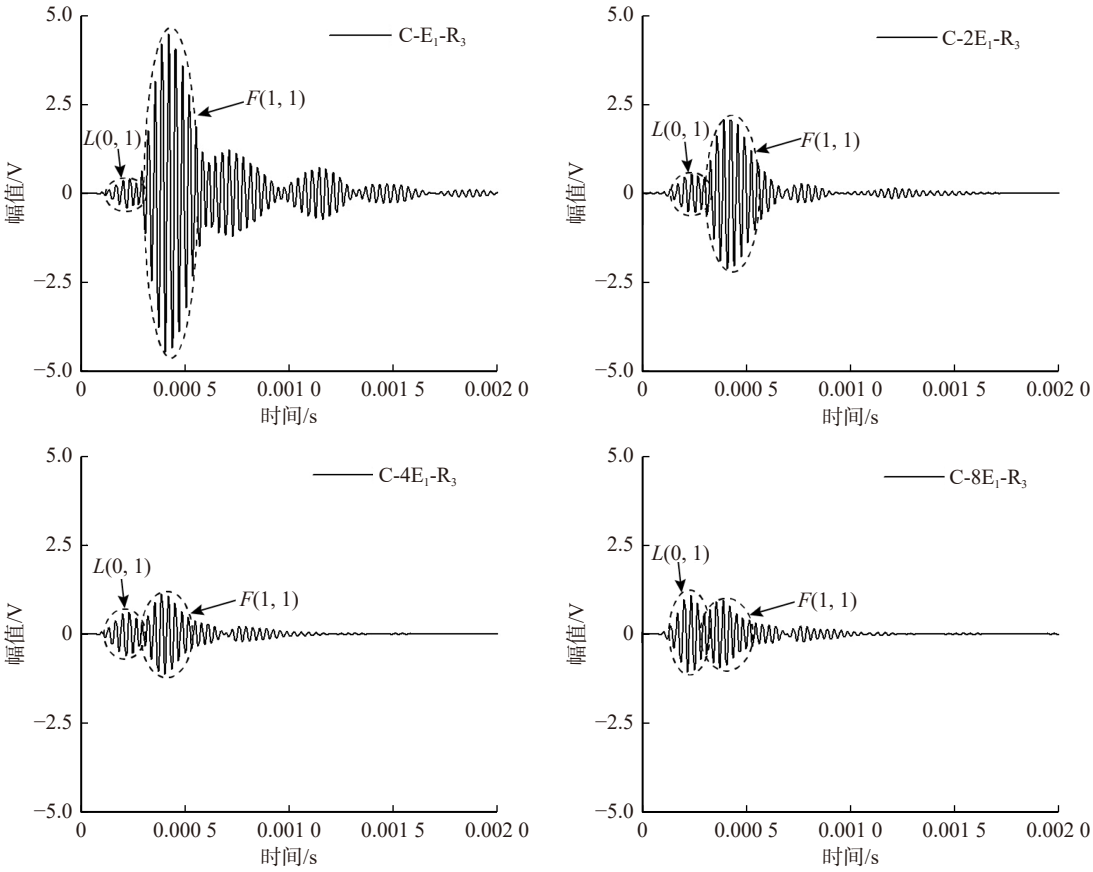


图 13　接收点 R_3 时 E_1 处不同激励点数量下导波信号图

Fig. 13　Guided wave signal diagrams under different numbers of excitation points at E_1 position with receiving point R_3

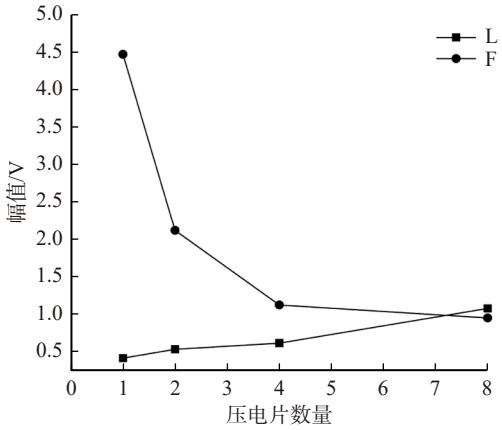


图 14　L 和 F 模态峰值与激励端压电片数量的关系

Fig. 14　Relationship between the maximum amplitude values of L and F modes and the number of piezoelectric plates at excitation terminal

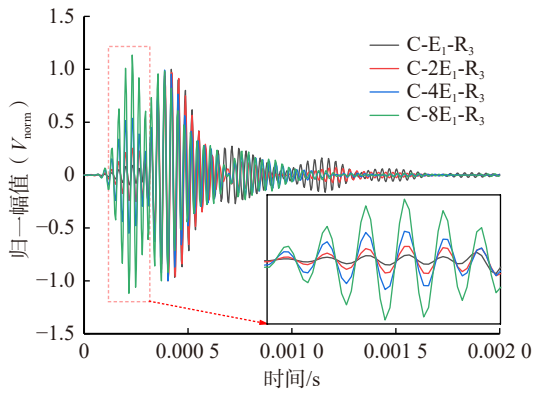


图 15　F 波峰值归一化对比图

Fig. 15　Normalized peak amplitude comparison of F-wave

图 17b 中，侧面 R_3 处的波形与 R_E 处相似，仅幅值略低，原因在于侧面接收能量弱于端面。因此，当端面激励而无法在另一端面直接接收时，可选择在另一端面附近的侧面进行接收。

4　结　　论

目前工程木柱无损检测中，超声导波激励与接收布点缺乏系统理论支撑，且针对木棒导波传播特性及布点影响的研究尚不多见。本研究在归纳分析超声导波在实心圆柱体中理论传播模态的基础上，以 Φ20 mm × 200 mm 樟子松木棒试件为对象，通过侧面单点激励、侧面多点激励、端面激励等试验，研究激励点和接收点布局对木棒中超声导波信号特征的影响。研究得到以下主要结论。

（1）无论侧面还是端面激励，木棒内都会同时出现弯曲模态（F 波）与纵向模态（L 波），只是两者占据的主导地位不同；侧面激励时 F 波占主导，端面激励时 L 波占主导。因此，应依据目标模态的检测需求，合理选择激励位置。

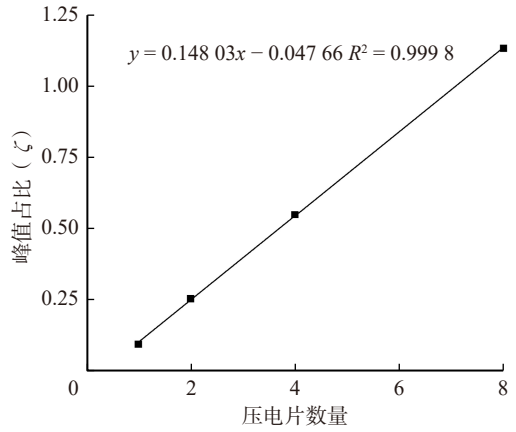


图 16 L 波峰值占比与同一横截面上激励点数量间关系

Fig. 16 Relationship between the peak amplitude of L-wave and number of excitation points on the same cross-section

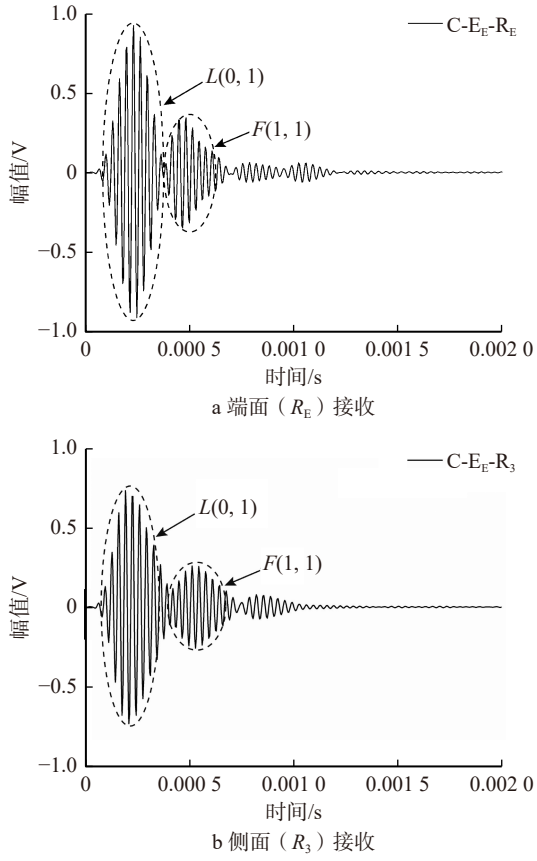


图 17 端面激励时不同接收位置信号图

Fig. 17 Signal diagrams of different receiving positions under end-face excitation

（2）在木棒侧面实施单点激励时，激励点与接收点的间距越大，导波信号图形中 F 波、L 波区分越明显。因此，检测时应将激励与接收装置布设于棒体两端，或尽可能拉开距离，以进一步放大模态分离效果。

（3）在木棒侧面实施多点激励时，对称地增加同一横截面上的激励点数目，可以增强 L 波、抑制 F 波，且这种增强/抑制效果随点数增加而愈加明显；当激励点增至 8 个（近似在木棒侧面粘贴一周陶瓷压电片）时，L 波的峰值略高于 F 波的峰值。因此，若需激发 L 波却无法在端面布设激励源，可在端面邻近侧面布置一周对称激励。

（4）在木棒试件端面激励时，导波接收点在另一端面或其邻近侧面，测得的超声导波信号相似。因此，当端面激励但另一端面不便布设传感器时，可选择在另一端面邻近侧面进行接收。

本研究仅讨论了激励−接收布局对木棒超声导波特性的影响，其结果可为不同工况下工程木柱的模态选择与布点方案提供依据。然而，将导波技术真正应用于工程木柱检测仍需长期努力。利用导波获取木材力学性能并识别缺陷，仍有广阔的研究空间。后续工作应聚焦两方面：一是系统阐明木材本构参数对导波传播的影响，二是深入解析各类缺陷引起的散射与模态转换规律。唯有厘清这些关键机制，方能推动导波技术在木材无损检测中的落地应用，并为行业提供可靠的技术支撑。

参 考 文 献

[1] 王皓宇, 彭林, 张厚江, 等. 基于红外热成像的古建筑墙内暗柱材料缺失检测 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(3): 132−144.
Wang H Y, Peng L, Zhang H J, et al. Material deficiency test of fully-concealed wood column in walls of ancient buildings based on infrared thermal imaging[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3): 132−144.

[2] Najjar J E, Mustapha S. Condition assessment of timber utility poles using ultrasonic guided waves[J]. Construction and Building Materials, 2021, 272: 121902.

[3] 彭林, 周浩宇, 张厚江, 等. 金中都水关遗址木结构无损检测与评估 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(11): 140−151.
Peng L, Zhou H Y, Zhang H J, et al. Nondestructive testing and condition assessment of the wooden structures of Jinzhongdu Watergate Site[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(11): 140−151.

[4] 张厚江, 李玉风. 古建筑木结构无损检测内容与研究进展 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(4): 1−13.
Zhang H J, Li Y F. Content and research progress in nondestructive testing of wooden structures in ancient architecture[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(4): 1−13.

[5] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1713−1735.
He C F, Zheng M F, Lü Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1713−1735.

[6] 马骋. 混凝土中钢筋腐蚀损伤的超声导波监测 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Ma C. Corrosion monitoring of rebar embedded in concrete using guided ultrasonic waves[D]. Harbin: Harbin Institute of

Technology, 2017.

[7] 汪佳宇, 陈铭刚, 布占宇. 基于超声波换能器的钢筋机械损伤与锈蚀损伤检测及其对比研究 [J]. 宁波大学学报 (理工版), 2024, 37(1): 67−76.
Wang J Y, Chen M G, Bu Z Y. Ultrasonic transducer-based mechanical damage and rust damage detection of steel bars and comparative study[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2024, 37(1): 67−76.

[8] Chen S, Yu Q, Xu H, et al. Investigation of pipelines defect localization for fusion reactor by using T(0, 1) mode ultrasonic guided waves[J]. Fusion Engineering and Design, 2023, 195: 113937.

[9] Veres I A, Sayir M B. Wave propagation in a wooden bar[J]. Ultrasonics, 2004, 42(1−9): 495−499.

[10] Dahmen S, Ketata H, Ghozlen M H B, et al. Elastic constants measurement of anisotropic Olivier wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave[J]. Ultrasonics, 2010, 50(4−5): 502−507.

[11] Li J, Subhani M, Samali B. Determination of embedment depth of timber poles and piles using wavelet transform[J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(5): 759−770.

[12] Bakar A H A, Legg M, Konings D, et al. The effects of dispersion on time-of-flight acoustic velocity measurements in a wooden rod[J]. Ultrasonics, 2023, 129: 106912.

[13] 张典, 于永柱, 管成, 等. 故宫养心殿墙体木柱缺陷状况无损检测研究 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 127−139.
Zhang D, Yu Y Z, Guan C, et al. Nondestructive testing of defect condition of wall wood columns in Yangxin Hall of the Palace Museum, Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5): 127−139.

[14] Viktorov I A. Rayleigh and lamb waves[M]. New York: Springer, 2013.

[15] Subhani M, Li J, Samali B. A comparative study of guided wave propagation in timber poles with isotropic and transversely isotropic material models[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2013, 3(2): 65−79.

[16] 范越, 辛振波, 张厚江, 等. 基于兰姆波的木望板试件损伤缺陷检测研究 [J]. 林业机械与木工设备, 2024, 52(4): 37−44.
Fan Y, Xin Z B, Zhang H J, et al. Research on defect detection of wooden board specimen based on lamb wave[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2024, 52(4): 37−44.

[17] 杨龙飞, 李明, 方赛银, 等. 基于 COMSOL 的声发射信号沿木材纵向传播过程的仿真 [J]. 森林工程, 2024, 40(6): 140−150.
Yang L F, Li M, Fang S Y, et al. COMSOL-based simulation study of acoustic emission signal propagation process along the longitudinal direction of wood[J]. Forest Engineering, 2024, 40(6): 140−150.

[18] 成俊卿, 杨家驹, 刘鹏. 中国木材志 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1985.
Cheng J Q, Yang J J, Liu P. Chinese wood chronicles [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1985.

[19] Bocchini P, Marzani A, Viola E. Graphical user interface for guided acoustic waves[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2011, 25(3): 202−210.

[20] 梁思成. 清式营造则例 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Liang S C. Qing Dynasty structural regulations[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　李文彬）