

# 木结构无损检测技术研究与应用综述

熊海贝 龙有为 陈琳\* 丁叶蔚

(同济大学结构防灾减灾工程系, 上海 200092)

**摘要** 木结构无损检测技术对于我国古木建筑预防性保护和现代木结构的智能运维有着重要作用。以检测方法的基本原理为分类标准,介绍了各种无损检测方法的原理和在木结构检测中的适用范围、应用情况、研究现状和现存问题,涉及的检测方法包括常用的目视法、应力波法、微钻阻抗法和前沿探索性方法,如计算机视觉法、压电传感法、电磁波法等,最后探讨了木结构无损检测的发展趋势。

**关键词** 木结构, 无损检测, 研究现状, 发展趋势

## Review on Research and Application of Nondestructive Testing Technology for Timber Structures

XIONG Haibei LONG Youwei CHEN Lin\* DING Yewei

(Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** Nondestructive testing technology of timber structure plays an important role in the preventive protection of ancient wood buildings and the intelligent operation and maintenance of modern timber structures. This paper classifies ten testing methods according to their basic principles, and introduces their application scope, research status and existing problems, including visual testing, stress wave, drilling resistance, and cutting-edge exploratory methods such as computer vision, piezoelectric sensing, Electromagnetic wave. Finally, the development trends of wood structure nondestructive testing are discussed.

**Keywords** timber structure, nondestructive testing, research status, development trend

## 0 引言

中国木结构建筑历史辉煌悠久,是中华文明的重要组成部分,现存有大量具有预防性保护需求的古代木结构和具有地方特色的传统木结构民居。随着技术的进步和对绿色节能及双碳目标<sup>[1-2]</sup>等的追求,现代木结构在大跨空间结构和高层建筑中逐渐获得关注。但是,木材作为一种生物物质材料,在生长过程中易产生木节等天然缺陷;

在外界环境,例如风雨、虫蚁侵蚀下木构件易产生腐朽、孔洞、裂纹等损伤,这会影响到木构件的力学性能,带来结构安全隐患,所以定期对木结构进行检测是非常必要的<sup>[3]</sup>。

木结构无损检测是一种非破坏性检测技术,在检测过程中不会损坏检测对象的力学性能和使用功能。对于古建筑的损伤积累导致的性能退化,及时的无损检测可以在不破坏原始结构状态的基础上获知损伤积累的程度,进而为维修加固等提供支撑。对于新建的大型木结

收稿日期: 2022-12-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978502)

作者简介: 熊海贝,博士,教授,博士生导师,主要从事新型木结构设计和结构健康监测领域的研究。E-mail: xionghaibei@tongji.edu.cn

\*联系作者: 陈琳,博士,主要从事木结构智能传感与损伤识别研究。E-mail: 1710742@tongji.edu.cn

构建筑,无损检测对于智能运维也至关重要。目前木结构无损检测技术已多达十几种,可以检测木结构的缺陷、基本物理力学性能、结构变形等。将其中研究较多的方法进行梳理,按照其检测的基本原理进行归类,分类情况见图1;介绍了每种方法的基本原理、适用范围、应用情况、研究现状和现存问题,每种方法的适用情况见表1;最后提出了木结构检测的几点发展趋势。

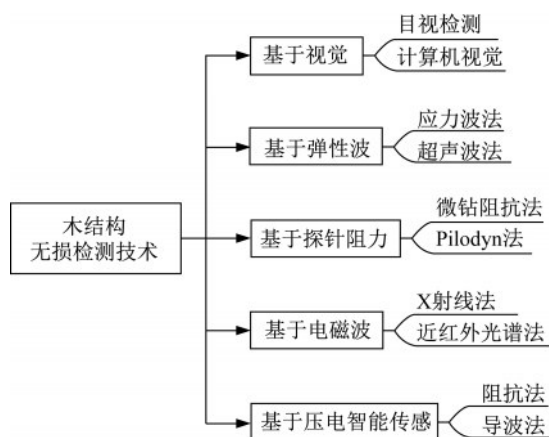


图1 木结构无损检测技术

Fig.1 Types of nondestructive testing techniques for timber structures

表1 木结构无损检测技术适用情况  
Table 1 Application of nondestructive testing technology for wood structures

方法	物理力学性能	缺陷
目视检测		✓
计算机视觉		✓
应力波	✓	✓
超声波	✓	✓
微钻阻抗仪法	✓	✓
Pilodyn法	✓	
X射线	✓	✓
近红外光谱法	✓	
阻抗法		✓
导波法	✓	✓

## 1 基于视觉的无损检测

### 1.1 目视检测

目视检测是使用最早、最简单的木材无损检测方法。对木构件的木节数量和几何尺寸、木纹斜率、腐朽的位置和几何尺寸、表面裂缝的位置与长度进行详细观察统计,从而实现了对木结构评价

的无损检测方式。目视检测也称为人工检测,现场通常会使用敲击作为辅助检测手段。

目视检测广泛应用于既有木结构的现场检测中,许多国家检测标准都将目视检测作为重要检测手段,如《木结构现场检测技术标准》(JGJ/T 488—2020)<sup>[4]</sup>中规定可用目测法判断腐朽程度。目视检测法虽然具有明显的操作优势,但是需要经验较丰富的专业人员,检测成本较高。例如,对木结构表面进行裂缝检测,检测人员需掌握木结构裂缝的相关知识,才能准确判断该裂缝情况。在进行大规模的检测时,检测人员的视觉疲劳会导致检测准确性下降、效率降低。

### 1.2 计算机视觉检测

计算机视觉是用相机代替人眼,用计算机对图像进行特征提取,加以分析,进行目标检测的技术。在木结构检测中主要用于木结构表面缺陷检测和木结构变形检测。

学者们最先开始研究如何使用计算机视觉检测木材表面缺陷,使用了阈值化缺陷分割<sup>[5]</sup>、分形理论<sup>[6]</sup>、数学形态学<sup>[6]</sup>、小波分析<sup>[7]</sup>等方法,均取得了不错的检测效果,也为检测系统的开发打下了基础。近年来的研究进一步开展多技术结合检测,以提高检测准确率与应用性,减少了识别所需时间,提高了识别的准确率<sup>[8]</sup>。

随着技术不断成熟,国内外都研制出了集成化的计算机视觉木材无损检测系统。2016年,李超等<sup>[9]</sup>设计了一种可以识别实木表面缺陷、颜色和纹理的智能化分选系统,集成了传送、图像定位与采集、表面识别与分选等功能,且识别准确率较高。2020年,吴雨生<sup>[8]</sup>针对结构用锯材分等研发了一套检测设备,经过与《轻型木结构用规格材目测分级规则》中人工目测、机械应力分等要求对比,有较好的分等准确率。德国威力公司也开发了Combiscan+系列锯材表面检测设备,通过扫描木材表面,识别缺陷信息,实时显示检测结果,提高生产效率。

在木结构现场检测方面,杨娜等<sup>[10]</sup>研发了基于无人机与计算机视觉的木结构裂缝检测系统,无人机按照规划的航线进行拍照,经过图像拼接以及计算机处理,可有效地将裂缝从背景和木纹噪声中提取出,并与人工测量结果对比,表现出良好的检测精度。杨娜等<sup>[11]</sup>还在结构变形检测方面

展开研究,针对木结构变形微量、缓变的特性,开发了利用亚像素算法的现场检测系统,提升了检测精度,且可以满足长期荷载和偶然荷载两种工况的不同检测需求。

近年来包含有更多信息的三维点云技术成为了研究热点。三维点云携带了空间信息,对具有空间特征的损伤识别及量化更为适用,且可以获取结构几何信息进而实现三维重建,方便快捷地测量构件几何尺寸、关键构件挠度及变形数据。三维点云技术已经用于结构健康领域的损伤识别,如识别各种环境中混凝土表面的裂缝<sup>[12]</sup>、测量裂纹宽度<sup>[13]</sup>等。但是,针对木结构损伤、构件挠度及整体位移的识别研究尚未见报道。

计算机视觉检测具有非接触、效率高、成本低廉等优势,但在现场检测中,由于木结构构件形状多样、节点构造复杂等导致的图像畸变校正、图像拼接及特征点识别、木纹噪声去除等研究难点亟需解决。

## 2 基于弹性波的无损检测

固体中弹性波在传播过程中遇到缺陷波速会降低,以此可以识别木构件的物理力学性能与内部残损状况。一般采用敲击锤敲击探针或电脉冲激励等方式在木构件中产生弹性波,对应的检测方法称为应力波检测法和超声波检测法,这两种方法都已发明出成熟的现场检测仪器。

### 2.1 应力波法

应力波检测技术是目前国内外木结构无损检测技术中适用性最高、应用最广泛的技术之一,具备传播距离远、不需耦合剂、设备便于携带等优势。其基本原理为当木材受到冲击力的作用时,其内部会产生相应的应力波,并向周围传播,使用传感器接收信号并加以分析,判断被测木材的缺陷状况与材料性质。

通常认为最早将应力波技术用于木结构无损检测中的是 Lee<sup>[14]</sup>,1964年,他绘制了应力波传播时间与残余木构件的力学强度之间的关系图。自此,学者们进行了很多相关研究,主要集中在木材物理力学性能检测以及缺陷检测两个方面,涉及应力波在木材中传播机理以及应力波成像的

研究。

物理力学性能检测方面,1988年,Ross等<sup>[15]</sup>研究认为木材弹性模量、应力波波速和木材密度三者之间的关系为

$$E = C^2 \rho / g \quad (1)$$

式中: $E$ 为木材弹性模量; $C$ 为应力波波速; $\rho$ 为木材密度; $g$ 为重力加速度。此后,学者们利用统计分析等方法研究了应力波检测在评价木材弹性模量<sup>[16]</sup>、抗弯强度<sup>[17-18]</sup>、含水率<sup>[19]</sup>等物理力学性质上的效果,取得了一定的成果,但木材性质、形状等差异会影响预测的精度。如 Ergun等<sup>[17]</sup>研究土耳其红松的受弯性能,认为应力波波速与抗弯强度之间具有较好相关性,相关系数接近 0.9;但 Teixeira等<sup>[18]</sup>用花旗松进行类似试验,却发现在预测抗拉强度时效果较差,相关系数不到 0.6。

基于此,许多科研人员开始研究应力波在木材中的传播机理,致力于搭建应力波在木材中传播模型。Bulleit等<sup>[20]</sup>最早使用有限元建立了应力波在木材二维平面中的传播模型。徐华东等<sup>[21]</sup>研究了应力波速度随含水率或温度变化的规律,并建立了三者之间的回归模型。张春晓等<sup>[22]</sup>建立了应力波在不同角度纵截面上的传播理论模型,并分析了敲击力度、缺陷等对模型的影响。这些研究虽然推动了应力波木材无损检测技术的发展,但是目前相关研究模型参数少,对于含水率、环境温度、木材种类等影响因素的考虑不够全面,如何构建完善的多参数应力波传播模型还需要进行更多的研究。

应力波在缺陷检测上研究较为成熟,实际应用也较多。1999年,Service等<sup>[23]</sup>针对美国常见的木结构桥梁编制了《应力波技术木桥木材缺陷检测指南》,产生了一定的影响力。我国也将应力波法检测木材缺陷作为重要手段写入了《木结构现场检测技术标准》<sup>[4]</sup>。

沿着木柱一周布置多个敲击探头,可以获得多个路径上的应力波波速,进而可以通过计算机处理形成该截面图像,此即为应力波断层成像法。Du等<sup>[24]</sup>提出了基于椭圆插值的断层成像方法,郑泽宇等<sup>[25]</sup>提出了木材径切面内部缺陷的速度修正成像方法,刘涛等<sup>[26]</sup>提出了基于射线分割的应力波断层成像算法,还有学者<sup>[27-28]</sup>提出了木材内部缺陷的三维应力波成像算法,均取得了一定的效果。但现有的应力波法重建图像还原度不高,成

像精度不稳定,新的成像算法与信号采样方法亟待研究。

## 2.2 超声波法

超声波检测与应力波检测原理类似,主要区别在于超声波的频率更高,对于微小损伤更为敏感,且方向性更好。超声波法通常需要使用耦合剂保证被测材料与传感器接触良好。研究主要集中在检测木材物理力学性能以及内部缺陷两个方面。

物理力学性能检测方面,研究已经较为成熟。Bucur等<sup>[29]</sup>研究了影响超声波在木材中传播的因素,并给出了适用于木材检测的波形和频率范围。肖江等<sup>[30]</sup>利用纵波传播法对木材的弹性模量进行检测,提出了一种用数字处理芯片进行木材强度测定的方法,初步研制了一套数字化检测系统。

缺陷检测方面,McGovern等<sup>[31]</sup>定量研究了腐朽对超声波声速和衰减的影响,发现经12周腐朽处理的试样轴向纵波声速下降了37.5%,而衰减增加为原来的5.5倍。张甜等<sup>[32]</sup>采用超声波对不同大小的缺陷进行检测,分析了波速与缺陷大小的关系,为准确评估木材内孔洞尺寸提供理论基础。

利用超声波检测进行内部成像的技术也得到了发展。德国学者<sup>[33]</sup>应用0.5 MHz超声波对187 mm厚的中密度纤维板试件进行检测研究,得到木材缺陷位置的超声波图像。宋世全<sup>[34]</sup>使用超声信号的首波振幅、周期、上升时间和下降时间作为支持向量机的特征向量进行二维可视化研究,使落叶松和榿树中缺陷有无和缺陷大小的识别准确率都达到80%以上。

## 3 基于探针阻力分析的无损检测

阻力分析主要通过物理阻力的变化识别木构件内部腐朽、空洞等损伤。通常包含钻入与射入两种:微钻阻抗法使用插入式探针钻入木材中,得到探针在行进过程中受到的阻力变化,以此判断木材内部的腐朽和孔洞情况;皮螺钉法将探针射入构件之中,得到射入深度与木材密度的对应关系,以此判断木材内部的腐朽和孔洞情况。这类方法虽然会对木材造成微小孔痕,但对构件性能几乎没有影响。

### 3.1 微钻阻抗仪法

微钻阻抗仪的检测原理是利用电机驱动,将微型钻头以恒定的前进速度和旋转速度钻入样本内部,得到相对阻力值曲线。由于微钻阻抗仪便携性强、操作简单且准确度高,目前已成为一种常用的检测设备。但其不能识别缺陷的整体情况且容易发生断针危险。

微钻阻抗检测技术最早应用于木材内部缺陷和腐朽的检测。1994年,Rinn<sup>[35-36]</sup>研究了微钻阻抗法检测木材腐朽的可行性,随后又对信号分辨率进行了改进,使钻入阻抗检测技术能更准确地识别完整区域、腐烂区域和过渡区域。张富文等<sup>[37]</sup>给出了不同类型缺陷下的典型阻抗曲线形式,提出了木构件检测的一般规定和缺陷评定方法,并给出基于标准木的木材阻抗仪校准方法。2015年,《钻入阻抗法木材缺陷检测技术规程》(DB31/T—2015)<sup>[38]</sup>已在上海市施行。《木结构现场检测技术标准》(JGJ/T 488—2020)<sup>[4]</sup>也将此方法列为木构件缺陷检测方法,且给出了不同缺陷的典型阻力值曲线。

在物理力学性能检测方面,Lima等<sup>[39]</sup>利用微钻阻抗仪对桉树密度进行了评估,结果表明桉树的木材基本密度和阻力曲线存在显著线性相关。孙燕良等<sup>[40]</sup>将微钻阻力值和红松密度进行了线性拟合,研究发现微钻阻抗仪能够很好地实现对红松密度的测定,快速且损伤小。

由于密度是与木材力学性能密切相关的参数,所以许多学者也使用微钻阻力法检测木材力学性能。Faggiano等<sup>[41]</sup>以更换下的旧栗木构件为试验材料,分别进行了微钻阻力和传统力学性能试验,分析了结果的相关性,建立了通过微钻阻力检测获取的木构件顺纹抗压强度和横纹抗压强度之间的数值关系模型,并通过云杉新材试件验证了这个结果。朱磊等<sup>[42]</sup>结合应力波检测与微钻阻力检测,预测出了样本的抗弯弹性模量与抗弯强度,建立了红松木构件力学性能的计算模型。目前基于微钻检测的研究主要集中在木材检测阻力值与其物理力学性能及腐朽间的相关性方面,且多局限于某一树种间的关系。

### 3.2 Pilodyn法

Pilodyn仪是一种手持的测量木材基本密度

的仪器,20世纪70年代在丹麦被开发出来。其检测原理是将探针以预先设定好的能量射入木材中,通过射入的深度分析木材密度的变化情况,根据射钉深度推断木材材料性能参数,木材越致密则射入深度越浅,木材越疏松则射入深度越深。此法在实际中通常用于定性的检测,且常和其他检测方式联合使用。

Cown等<sup>[43]</sup>最早研究了Pilodyn法与针叶树种木材基本密度之间的关系。之后,黄荣凤等<sup>[44]</sup>定量分析了径向和弦向射入深度与密度之间的关系,建立木材密度与检测结果间的数学模型,发现两者间存在着明显的幂函数关系,但是模型在不同树种间的迁移性还需进行研究。除基本密度外,也有学者尝试寻找Pilodyn法与木材弹性模量和强度之间的相关关系,但相关性并不明显<sup>[45]</sup>。

## 4 基于电磁波的无损检测

基于电磁波的方法是通过生成特定的电磁波发射到待检木结构中,根据不同能量场、不同磁场域的电磁波衰减情况进行检测的方法。多个频段的电磁波都在木结构无损检测中有应用,其中以X射线和近红外光谱两个波段应用较多,且研究较多。

### 4.1 X射线法

自1895年伦琴发现X射线以来,由于其穿透能力强、分辨率高和检测速度快等优点,迅速广泛地被应用于医学、工业和农业等领域<sup>[46]</sup>。有学者<sup>[46-48]</sup>最先使用CT设备对木材进行无损检测,探究X射线的传播与木材密度、含水率之间的关系,并研究其在木材中的成像原理,获得了内部缺陷的轮廓信息,都取得了不错的效果。其原理是X射线穿透木材时,在缺陷处表现出不同的衰减系数,分析射出的X射线,通过处理得到被测木材的图像,即可检测木材密度及其内部缺陷。

CT扫描技术对木构件断面的检测趋于成熟,但木材缺陷的空间几何形状比较复杂,2D图像往往不能反映出缺陷的3D信息,有学者对此进行了研究。葛浙东等<sup>[49]</sup>构建了一套可以重建三切面图像和透视图像的CT成像系统,可以从多个角度获得木材裂纹、节子和年轮等结构信息。

由于CT设备的购置和维护成本高,且X射线

对人体有一定危害,因此难于被推广和应用。

### 4.2 近红外光谱法

波长范围在780~2 526 nm的电磁波被称为近红外光,在这个范围内,可以观测组成有机物的官能团分子振动情况,用以推测有机物的物理特性和化学含量等信息。根据研究,波长范围在1 000~1 600 nm的近红外光谱包含绝大部分的木材信息,且红外光谱法具有速度快、测试重现性好、测量方便、对人体无害等优点<sup>[50]</sup>。

在木结构无损检测领域,此方法最先被用来识别木材主要组成成分(如纤维素、木质素等)的含量<sup>[51]</sup>。由于木材的组成成分含量影响着含水量、密度、力学性能、缺陷等,而光谱信息又是对木材成分的反映,因此理论上光谱信息与含水量、密度、力学性能、缺陷等存在联系。许多学者<sup>[52-55]</sup>对此展开了研究,采用非线性拟合、机器学习等方法建立了预测木材含水量、密度、力学性能、缺陷的模型,试验结果表明拟合度及准确率都较好。但是不同树种的光谱信息差异明显,实际应用时需要针对特定树种建立相应的模型,导致模型泛化能力偏弱。

## 5 基于压电智能传感的无损检测

随着无损检测研究的深入发展,越来越多的智能材料被应用于结构微小损伤的识别与诊断上。其中压电陶瓷具有稳定性好、频响范围宽、对微小损伤敏感的优点,已被广泛用于工程结构的健康监测领域<sup>[56]</sup>。

压电陶瓷是一种具有正逆压电效应的特殊电介质材料。当施加机械力时,晶体表面上产生电荷极化,将机械能转化成电能,可以被制作成传感器;而当施加电场时,晶体则产生机械变形,将电能转化成机械能,可用作驱动器。基于此,产生了基于压电材料导波法和阻抗法两种识别方法。

### 5.1 阻抗法

压电阻抗法基于压电材料的机电耦合特性展开,是一种针对局部损伤的识别方法。该方法的原理是:贴附于构件表面的压电传感器的阻抗曲线特性取决于耦合结构与传感器的协同作用,损伤导致结构局部刚度改变进而影响传感器的阻抗

特性。压电阻抗法采用的激发频率较高,波长较短,对结构中微小的损伤较为敏感。

自Liang等<sup>[57]</sup>从理论上推导和分析了压电传感器与基体结构之间相互作用的一维阻抗模型后,许多学者研究了其在航天器、钢结构、钢筋混凝土结构等领域中的应用。其在木结构中主要用于损伤的检测,包括裂缝、孔洞、腐蚀以及连接松动等。2010年,Annamdas等<sup>[58]</sup>将压电陶瓷传感器粘贴在木材上,分析钉有不同钢钉个数的木材的压电阻抗,研究结构刚度变化等问题。同年,他们<sup>[59]</sup>研究了用阻抗法检测木材在不同酸中造成腐蚀情况的可行性。

除可行性研究外,还有学者在损伤指标的选择上进行了研究。Wang<sup>[60]</sup>在研究了阻抗法对木材孔洞损伤的识别可行性后,提出了基于均方根误差的马氏距离作为损伤指标,获得了更好的效果。还有学者<sup>[61]</sup>尝试了使用多个压电智能传感器对木结构的损伤进行定位,试验表明在特定情况下可以识别裂纹的位置。

以上这些研究由于受到环境温度、需要初始测量以及传感器感知范围等因素影响,大多停留在实验室内,应用在实际中较少。如何在检测信号与结构损伤之间建立起准确的定量关系以及排除温湿度等环境因素影响还需要进行深入研究。

## 5.2 导波法

导波法基于压电陶瓷材料的正逆压电效应展开,是一种主动传感方法。通过布置压电陶瓷传感器,采用一发一收或一发多收的导波模式建立波传播路径,根据波在损伤界面的反射及散射机理,通过传感器收到的信号特征对波传播路径中的损伤特征进行综合评估。一般采用的信号特征包括接收信号能量、幅值和频率等。压电导波法的试验原理如图2所示。

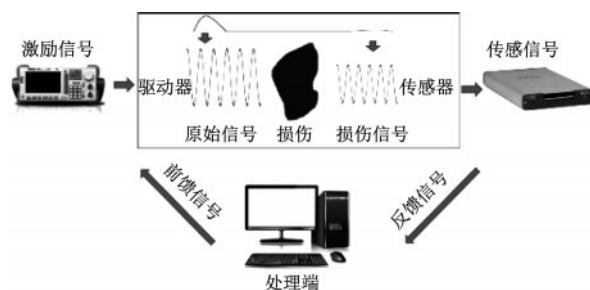


图2 压电导波法的原理

Fig.2 The principle of piezoelectric wave method

近年来,有部分学者使用导波法对木结构的含水率、木梁的裂缝损伤及连接的松动等进行了可行性的探索。Zhang等<sup>[62-63]</sup>对使用导波法检测木材的裂缝、孔洞和含水率进行了可行性研究。Han等<sup>[64]</sup>对4种常见的木结构连接(螺钉连接、螺栓连接、金属齿板连接、十字交叉连接)进行了不同松动程度的识别研究。刘孝禹等<sup>[65]</sup>对木构件在轴压和局压作用下的损伤情况进行检测。以上研究均采用基于小波包能量的损伤指标进行评估,都证明了导波法对于这些损伤检测的可行性。在此基础上,赵泽<sup>[66]</sup>将时间反演技术引入到对木结构的螺栓松动检测中,提高了时域信号信噪比,使检测结果更准确。

压电导波法采用的频带范围较宽,通常在几百Hz到几十万Hz之间,因此包含丰富的损伤信息<sup>[67]</sup>。Xiong等<sup>[68]</sup>使用导波法采集含不同深度裂缝的木构件的信号,通过短时傅里叶变换将时域信号转换为频域信号,采用深度神经网络对不同裂缝深度对应的信号进行分类,平均准确率达到95.8%。

现有的导波法大部分仅用于对结构中的单一损伤进行研究,而多种损伤耦合下波的传播特性受耦合损伤界面的影响尚需要进一步的研究。

## 6 结语与展望

经过国内外学者多年的研究和发展,木结构无损检测研究已经取得了丰硕的成果。发展木结构建筑也响应了我国“碳中和”和“碳达峰”的号召。而木材因其生物质材料特有的属性,受到外界环境的影响较大,需要在服役过程中定期检测其力学性能与使用功能。本文结合上述已有的木结构无损检测方法提出了以下展望。

### 6.1 联合检测

采用无损检测测量木材物理力学性质时,通常都是用测得的指标与物理力学性质之间建立模型,实际应用中检测结果的准确性取决于模型的精度。然而因为木材受环境(温度、湿度)与初始缺陷的影响,采用单一检测方式建立的模型往往结果不够理想。目前已有学者<sup>[69]</sup>尝试采用阻力仪与应力波结合的方法对木构件力学性能进行联合检测,并发现两者之间有良好的相关性。因此联

合使用多种无损检测方法可对木结构检测取得更加准确的结果。如计算机视觉侧重于表面损伤的识别与定位,但缺少损伤的深度信息,可以联合其他检测方法对木结构进行更全面的评估。

## 6.2 机器学习

在多种方式联合检测的基础上,如何使用测得的指标建立与木结构物理力学性质之间的模型也是影响精度的关键。传统的线性回归模型难以处理非线性问题,而近几年正在不断兴起的机器学习在处理复杂的非线性问题中具有独特的优势,因此国内外学者已将机器学习中的神经网络<sup>[70]</sup>与支持向量机等<sup>[71]</sup>方法引入研究,均取得了良好的效果。随着机器学习在深度学习、机器视觉等领域发展的不断深入,基于机器学习的无损检测技术在木结构领域也拥有巨大的应用前景。

## 6.3 新检测方法

近年来,随着新技术、新材料等快速发展,木材无损检测的新方式和新手段也不断涌现,如木材本身的压电效应等<sup>[72-73]</sup>。不断研究木结构无损检测的新方法,借鉴和引入其他学科行业中出现的先进无损检测技术,提高木结构无损检测的可靠性、时效性、准确性,并降低成本,也是木结构无损检测的重要发展方向。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 加拿大木业. 大力发展木结构建筑,助力早日实现碳中和目标[J]. 建设科技, 2021(20):1.  
Canada Wood. Vigorously develop wood structure buildings to help achieve the goal of carbon neutrality[J]. Construction science and technology, 2021(20):1. (in Chinese)
- [ 2 ] 劳万里,段新芳,吕斌,等. 碳达峰碳中和目标下木材工业的发展路径分析[J]. 木材科学与技术, 2022, 36(1):87-91.  
Lao Wanli, Duan Xinfang, Lü Bin, et al. Development path of china wood industry under the targets of carbon dioxide emission peaking and carbon neutrality [J]. Wood Science and Technology, 2022, 36(1): 87-91. (in Chinese)
- [ 3 ] Ross R J. Nondestructive Evaluation of Wood [J]. 2<sup>nd</sup> Edition. [s.l.]: Government Printing Office, 2015.
- [ 4 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 木结构现场检测技术标准: JGJ/T 488—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for in-situ inspection of timber structure: JGJ/T 488—2020 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2020. (in Chinese)
- [ 5 ] 白雪冰,王科俊,邹丽晖. 基于灰度共生矩阵的木材表面缺陷图像的纹理分割方法[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(12):23-25, 27.  
Bai Xuebing, Wang Kejun, Zou Lihui. Approach to texture segmentation of wood surface defects based on gray level co-occurrence matrix [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(12): 23-25, 27. (in Chinese)
- [ 6 ] 王克奇,马晓明,白雪冰. 基于分形理论和数学形态学的木材表面缺陷识别的图像处理[J]. 森林工程, 2013, 29(2):48-50, 53.  
Wang Keqi, Ma Xiaoming, Bai Xuebing. Image processing of wood surface defect identification using fractal theory and mathematical morphology [J]. Forest Engineering, 2013, 29(2):48-50, 53. (in Chinese)
- [ 7 ] Zhang Yizhuo, Xu Chao, Li Chao, et al. Wood defect detection method with PCA feature fusion and compressed sensing [J]. Journal of Forestry Research, 2015, 26(3):745-751.
- [ 8 ] 吴雨生. 基于机器视觉的结构用锯材分等技术研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.  
Wu Yusheng. Research on grading technology of structural lumber based on machine vision [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020. (in Chinese)
- [ 9 ] 李超,吕宪伟,涂文俊,等. 基于计算机视觉的实木表面智能化分选系统设计[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(3):102-109.  
Li Chao, Lü Xianwei, Tu Wenjun, et al. Design of an intelligent wood surface grading system based on computer vision [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(3): 102-109. (in Chinese)
- [ 10 ] 杨娜,张翀,李天昊. 基于无人机与计算机视觉的中国古建筑木结构裂缝监测系统的设计[J]. 工程力学, 2021, 38(3):27-39.  
Yang Na, Zhang Chong, Li Tianhao. Design of crack monitoring system for Chinese ancient wooden buildings based on UAV and CV [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(3): 27-39. (in Chinese)
- [ 11 ] 杨娜,汪德佳,李天昊,等. 基于计算机视觉方法的古建筑变形监测 [J/OL]. 建筑结构学报,

- 2023,44(1):192-202.
- Yang Na, Wang Dejia, Li Tianhao, et al. Deformation monitoring of ancient buildings based on computer vision method [J/OL]. *Journal of Building Structures*, 2023,44(1):192-202. (in Chinese)
- [12] Zhang L, Yang F, Zhang D, et al. Road crack detection using deep convolutional neural network [C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2016, 3708-3712.
- [13] Yang Xincong, Li Heng, Yu Yantao, et al. Automatic pixel-level crack detection and measurement using fully convolutional network [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2018, 33 (12) : 1090-1109.
- [14] Lee I D. Ultrasonic pulse velocity testing considered as a safety measure for timber structures [C]. *Proceedings of 2<sup>nd</sup> nondestructive testing of wood symposium*, 1965: 185-203.
- [15] Ross R J, Pellerin. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves [J]. *Forest Product Journal*, 1988,38(5):39-45.
- [16] Cademartori P H G D , André Luiz Missio, Gatto D A, et al. Prediction of the modulus of elasticity of eucalyptus grandis through two nondestructive techniques [J]. *Floresta e Ambiente*, 2014, 21 (3) : 369-375.
- [17] Ergun G, Zeynep G E, Tugba Y. Prediction of bending properties for turkish red pine (*Pinus brutia* Ten.) lumber using stress wave method [J]. *Bioresources*, 2013, 8(1):231-237.
- [18] Teixeira D E. Evaluation of maximum strength and modulus of elasticity of douglas-fir lumber in axial to grain tension by two nondestructive techniques [J]. *Ciência da Madeira*, 2016, 7(1):1-6.
- [19] Cruz C, Muniz G, Lima J T, et al. Application of stress waves to estimate moisture content in Eucalyptus wood [J]. *Cerne*, 2009, 15(4):430-438.
- [20] Bulleit W M, Falk R H. Modeling stress wave passage times in wood utility poles [J]. *Wood Science and Technology*, 1985, 19(2):183-191.
- [21] 徐华东, 王立海. 温度和含水率对红松木材中应力波传播速度的影响 [J]. *林业科学*, 2011, 47(9) : 123-128.
- Xu Huadong, Wang Lihai. Effects of moisture content and temperature on propagation velocity of stress waves in Korean pine wood [J]. *Forestry Science*, 2011, 47(9):123-128. (in Chinese)
- [22] 张春晓, 冯海林, 李光辉, 等. 应力波在树木不同角
- 度纵截面的传播速度模型 [J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(5):8.
- Zhang Chunxiao, Feng Hailin, Li Guanghui, et al. Stress wave propagation velocity model for different angles in a longitudinal section of standing trees [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2017, 34(5):8. (in Chinese)
- [23] Service F, Ross R J, Pellerin R F, et al. Inspection of timber bridges using stress wave timing nondestructive evaluation tools a guide for use and interpretation [J]. 1999.
- [24] Du X, Li S, Li G, et al. Stress wave tomography of wood internal defects using ellipse-based spatial interpolation and velocity compensation [J]. *Bioresources*, 2015, 10(3):3948-3962.
- [25] 郑泽宇, 冯海林, 杜晓晨, 等. 木材径切面内部缺陷的应力波成像算法 [J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(2):211-218.
- Zheng Zeyu, Feng Haillin, Du Xiaochen, et al. A stress wave tomography algorithm for internal defects in radial and longitudinal (RL) planes of wood [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2019, 36(2) : 211-218. (in Chinese)
- [26] 刘涛, 李光辉. 基于射线分割的林木应力波断层成像算法 [J]. *林业科学*, 2021, 57(9):181-192.
- Liu Tao, Li Guanghui. Stress wave tomography imaging algorithm based on ray segmentation for nondestructive testing of wood [J]. *Forestry Science*, 2021, 57(9):181-192. (in Chinese)
- [27] 陈方翔, 冯海林, 杜晓晨, 等. 基于TIDW的木材内部缺陷三维应力波成像方法 [J]. *传感技术学报*, 2015, 28(11):1625-1633.
- Chen Fangxiang, Feng Hailin, Du Xiaochen, et al. Three dimensional stress wave imaging method of wood internal defects based on TIDW [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(11) : 1625-1633. (in Chinese)
- [28] Du X, Feng H. Three-dimensional stress wave imaging of wood internal defects using TKriging method [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 148: 63-71.
- [29] Bucur V, Isabelle B. Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood [J]. *Ultrasonics*, 1994, 32(5):385-390.
- [30] 肖江, 杨建华, 黄娜. 基于DSP的木材强度超声波检测系统研究 [J]. *林业机械与木工设备*, 2008(1):27-28, 37.
- Xiao Jiang, Yang Jianhua, Huang Na. Research of wood

- intensity supersonic detection system based on DSP [J]. *Forestry Machinery and Woodworking Equipment*, 2008(1): 27-28, 37. (in Chinese)
- [31] McGovern M, Senalik A, Chen G, et al. Effect of decay on ultrasonic velocity and attenuation measurements in wood [J]. *Materials Evaluation*, 2013, 71 (10): 1217-1231.
- [32] 张甜, 程小武, 陆伟东, 等. 超声波法检测木材内部孔洞缺陷的研究 [J]. *西南林业大学学报*, 2016, 36 (1): 121-125, 130.
- Zhang Tian, Cheng Xiaowu, Lu Weidong, et al. Experimental study on testing internal hole defects of wood by ultrasonic method [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2016, 36 (1): 121-125, 130. (in Chinese)
- [33] Dzbeński W, Wiktorski T. Ultrasonic evaluation of mechanical properties of wood in standing trees [C]// COST E 53 Conference—Quality Control for Wood and Wood Products, Warsaw, 2007: 15-17.
- [34] 宋世全. 基于支持向量机的原木树种及原木内部孔洞缺陷辨识 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- Song Shiquan. The identification of log species and hole defect in log based on the support vector machine [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [35] Rinn F. Drill resistance measurements on standing trees and timber [C]// IMECO XII World Congress, Torino, 1994: 2145-2150.
- [36] Rinn F. Intact-decay transitions in profiles of density-calibratable resistance drilling devices using long thin needles [J]. *Arboricultural Journal*, 2016, 38 (4): 204-217.
- [37] 张富文, 许清风, 张治宇, 等. 钻入阻抗法检测木材缺陷 [J]. *无损检测*, 2016, 38 (1): 6-9, 74.
- Zhang Fuwen, Xu Qingfeng, Zhang Zhiyu, et al. Wood defect inspection by drilling resistance method [J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38 (1): 6-9, 74. (in Chinese)
- [38] 上海市质量技术监督局. 钻入阻抗法木材缺陷检测技术规程: DB31/T 901—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Shanghai Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. Technical standard for inspection of wood defect with drilling resistance method: DB31/T 901—2015 [S]. Beijing: China Standards Press, 2015.
- [39] Lima J T, Sartório R C, Trugilho P F, et al. Use of the resistograph for Eucalyptus wood basic density and perforation resistance estimative [J]. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, 2007, 35 (75): 85-93.
- [40] 孙燕良, 张厚江, 朱磊, 等. 微钻力阻力仪在检测木材密度中的应用研究 [J]. *湖南农业科学*, 2011 (10): 43-44.
- Sun Yanliang, Zhang Houjiang, Zhu Lei, et al. Study on the application of drilling resistance instrument in measuring wood density [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011 (10): 43-44. (in Chinese)
- [41] Faggiano B, Grippa M R, Calderoni B. Non-destructive tests and bending tests on chestnut structural timber [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 778: 167-174.
- [42] 朱磊, 张厚江, 孙燕良, 等. 基于应力波和微钻阻力的红松类木构件力学性能的无损检测 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37 (2): 156-158.
- Zhu Lei, Zhang Houjiang, Sun Yanliang, et al. Mechanical properties non-destructive testing of wooden components of Korean pine based on stress wave and micro-drilling resistance [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2013, 37 (2): 156-158. (in Chinese)
- [43] Cown D J. Comparison of the pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees [J]. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1978, 8 (3): 384-91.
- [44] 黄荣凤, 伍艳梅, 李华, 等. 古建筑旧木材腐朽状况皮罗钉检测结果的定量分析 [J]. *林业科学*, 2010, 46 (10): 114-118.
- Huang Rongfeng, Wu Yanmei, Li Hua, et al. Quantitative analysis of decaying detected by pilodyn in wood of ancient architecture [J]. *Forestry Science*, 2010, 46 (10): 114-118. (in Chinese)
- [45] Lourenco P B, Artur O F, Machado J S. Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: non-destructive correlations for test results in new and old wood [J]. *Constr Build Mater*, 2007, 21 (8): 1617-1627.
- [46] 葛浙东, 侯晓鹏, 李早芳, 等. 断层扫描技术在木材无损检测中的应用 [J]. *木材工业*, 2016, 30 (3): 49-52.
- Ge Zhedong, Hou Xiaopeng, Li Zaofang, et al. Application of computed tomography (CT) in nondestructive testing of wood [J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2016, 30 (3): 49-52. (in Chinese)
- [47] Lindgren, Seifert, Du, et al. Moisture content measurements in wood using dual-energy CT scanning—a feasibility study [J]. *Wood Mater Science and Engineering*, 2016, 11 (5): 312-317.

- [48] Jacobs P, Sevens E, Kunnen M. Principles of computerised X-ray tomography and applications to building materials [J]. *Science of the Total Environment*, 1995, 167(1-3):161-170.
- [49] 葛浙东, 侯晓鹏, 鲁守银, 等. 基于反投影坐标快速算法的木材CT检测系统研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(3):335-341, 327.  
Ge Zhedong, Hou Xiaopeng, Lu Shouyin, et al. Wood CT detection system based on fast algorithm of inverse projection coordinate [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3):335-341, 327. (in Chinese)
- [50] 陈秉慈. 木材无损检测方法的应用和发展方向[J]. *机电技术*, 2022(4):99-101.  
Chen Bingci. Application and development direction of wood nondestructive testing methods [J]. *Mechanical and Electrical Technology*, 2022 (4) : 99-101. (in Chinese)
- [51] 崔宏辉. 近红外法制浆材定性识别技术与定量模型的建立[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.  
Cui Honghui. Estimating wood speices and chemical compositions in pulping by near infrared spectroscopy [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015. (in Chinese)
- [52] 张佳薇, 韩雨杉, 李明宝. 在 1 899.703 nm 波长下木材含水率光谱检测方法研究[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(1):29-31, 35.  
Zhang Jiawei, Han Yushan, Li Mingbao. Study on spectral detection method for moisture content of wood in 1 899.703 nm wavelength [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(1):29-31, 35. (in Chinese)
- [53] 潘岫, 王克奇, 梁玉亮, 等. 应用近红外光谱和小波网络构建的木材基本密度预测模型[J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(2):59-62.  
Pan Shen, Wang Keqi, Liang Yuliang, et al. Prediction model of wood basic density by near infrared spectroscopy and wavelet networks [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(2):59-62. (in Chinese)
- [54] 苏耀文. 木材弯曲力学性质的近红外光谱无损检测方法研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.  
Su Yaowen. Research on nondestructive testing of wood bending mechanical properties by near infrared spectroscopy [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [55] 杨忠, 陈玲, 付跃进, 等. 近红外光谱结合 SIMCA 模式识别法检测木材表面节子[J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(08):70-72.  
Yang Zhong, Chen Ling, Fu Yuejin, et al. Rapid detection of knot defect in wood surface by near infrared spectroscopy coupled with SIMCA pattern recognition [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(8):70-72. (in Chinese)
- [56] Cuc A, Giurgiutiu V, Joshi S, et al. Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors for space applications [J]. *AIAA Journal*, 2007, 45 (12) : 2838-2850.
- [57] Liang C, Sun F P, Rogers C A. An impedance method for dynamic analysis of active material systems [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1997, 116(4):323-334.
- [58] Annamdas V, Annamdas K. Impedance based sensor technology to monitor stiffness of biological structures [C]. *Spie Defense, Security & Sensing*, 2010.
- [59] Annamdas K, Annamdas V. Piezo impedance sensors to monitor degradation of biological structure [C]// *Advanced Environmental Chemical, and Biological Sensing Technologies VII*. SPIE, 2010, 7673:181-191.
- [60] Wang D. Experimental study on damage detection in timber specimens based on an electromechanical impedance technique and RMSD-based mahalanobis distance [J]. *Sensors*, 2016. 16(10):1765.
- [61] 王清华. 基于压电阻抗的正交异性板与木梁损伤检测研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.  
Wang Qinghua. Damage detection of orthotropic plates and wood beams based on the piezoelectric impedance [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technclgy, 2017. (in Chinese)
- [62] Zhang J, Huang Y, Zheng Y. A feasibility study on timber damage detection using piezoceramic-transducer-enabled active sensing [J]. *Sensors*, 2018, 18(5):1563.
- [63] Zhang J, Li Y, Huang Y. A feasibility study on timber moisture monitoring using piezoceramic transducer-enabled active sensing [J]. *Sensors*, 2018, 18(9):3100.
- [64] Han F, Jiang J, Xu K, et al. Damage detection of common timber connections using piezoceramic transducers and active sensing [J]. *Sensors*, 2019, 19 (11):2486-2486.
- [65] 刘孝禹, 饶玉龙, 张继承, 等. 基于压电传感器的木材轴压损伤监测[J]. *压电与声光*, 2020, 42(5):681-685.  
Liu Xiaoyu, Rao Yulong, Zhang Jicheng, et al. Timber axial pressure damage monitoring based on piezoceramic sensor [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2020, 42(5):681-685.

- [66] 赵泽. 基于压电陶瓷的木结构螺栓松动监测试验研究[D]. 晋中: 太原理工大学, 2020.  
Zhao Ze. Experimental study on monitoring of loss of timber bolts based on piezoelectric ceramics [D]. Jinzhong: Taiyuan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [67] Cuc A, Giurgiutiu V, Joshi S, et al. Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors for space applications [J]. *AIAA Journal*, 2007, 45(12): 2838-2850.
- [68] Xiong H. A novel piezoceramic-based sensing technology combined with visual domain networks for timber damage quantification [J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8: 688594.
- [69] 张厚江, 朱磊, 孙燕良, 等. 古建筑木构件材料主要力学性能检测方法研究[J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(5): 126-129.  
Zhan Houjiang, Zhu Lei, Sun Yanliang, et al. Determining main mechanical properties of ancient architectural timber [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(5): 126-129. (in Chinese)
- [70] Tiryaki S, Coşkun H. Predicting modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of heat treated woods by artificial neural networks [J]. *Measurement*, 2014, 49(1): 266-274.
- [71] 王再超, 李光辉, 冯海林, 等. 基于应力波和支持向量机的木材缺陷识别分类方法[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(3): 130-136.  
Wang Zaichao, Li Guanghui, Feng Hailin, et al. A method of wood defect identification and classification based on stress wave and SVM [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2015, 39(3): 130-136. (in Chinese)
- [72] Nakai T, Yamamoto H, Nakao T, et al. Mechanical behavior of the crystalline region of wood and the piezoelectric response of wood in tension tests [J]. *Wood Science and Technology*, 2005, 39(2): 163-168.
- [73] Suzuki Y. Piezoelectric phenomena of wood and cellulose materials and utilization [J]. *Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute*, 2019, 449: 1-14.