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

古建筑木结构无损检测内容与研究进展

张厚江　李玉风

Content and research progress in nondestructive testing of wooden structures in ancient architecture

Zhang Houjiang, Li Yufeng

引用本文:
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. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240015
Zhang Houjiang, Li Yufeng. Content and research progress in nondestructive testing of wooden structures in ancient architecture[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(4):1–13. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240015

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240015

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

足尺人造板力学性能无损检测研究进展
Literature review of mechanical properties of full–size wood composite panels using nondestructive testing technique
北京林业大学学报, 2019, 41(9): 164–172.　https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180379

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

古建筑七架梁缺陷安全性影响数值模拟研究
Numerical simulation of the safety influence of defects on Qijia–beams of ancient timber building
北京林业大学学报, 2020, 42(4): 142–154.　https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190328

基于速度误差校正的林木应力波无损检测断层成像算法
Tomography imaging algorithm based on velocity error correction for stress wave nondestructive evaluation of wood
北京林业大学学报, 2018, 40(1): 108–119.　https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170384

自攻螺钉与榫卯连接CLT墙体节点力学性能研究
Mechanical properties of CLT shear connections between self–tapping screws and mortise tenons
北京林业大学学报, 2019, 41(11): 146–154.　https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190209

CLT墙体–楼板T型连接件节点力学性能研究
Mechanical performance of CLT wall–to–floor joints with T connector
北京林业大学学报, 2018, 40(10): 123–130.　https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180243

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240015

古建筑木结构无损检测内容与研究进展

张厚江　李玉风
（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:中国拥有大量的木结构古建筑。合理有效地检测评估木结构的存在状况，是古建筑保护和修缮工作的重要需求。古建筑木结构无损检测是以无损检测和评估古建筑木结构安全性，以现场应用和实际需求为导向的木材材性检测评估技术，检测内容主要包括缺陷无损检测和木材物理力学性能无损检测两个方面。木结构、木构件隐藏缺陷的检测以及评估是古建筑木结构无损检测工作的重点和难点。本文首先介绍古建筑木结构的组成，总结其无损检测内容和目前常见无损检测方法；然后归纳总结古建筑木构件隐藏缺陷无损检测、古建筑木构件分等、腐朽对古建筑木材力学性能影响等应用和研究进展；最后归纳说明古建筑木材力学性能无损检测和自然老化对古建筑木材性质影响的研究状况。以期对从事木结构文物保护技术应用和科研工作的相关人员，有所启发和帮助。

关键词：古建筑木结构；木构件；无损检测；缺陷；力学性能
中图分类号：TU366.2；TN29；K928.71　**文献标志码**：A　**文章编号**：1000−1522(2024)04−0001−13
引文格式：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 Houjiang, Li Yufeng. Content and research progress in nondestructive testing of wooden structures in ancient architecture［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(4): 1−13.

Content and research progress in nondestructive testing of wooden structures in ancient architecture

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

Abstract: China has a large number of ancient wood structure buildings. To test and evaluate the condition of ancient wood structures reasonably and effectively is demanded by condition assessment of the wooden structures for protection and restoration of the buildings. Nondestructive testing of ancient wood structures is a test and evaluation technique to wood properties, oriented by inspecting and evaluation of wooden structure safety, and in situ application and actual inspection demands. The testing content mainly includes two aspects: nondestructive testing of defects and nondestructive testing of physical and mechanical properties. Assessing concealed defects of wooden structures and wood members is the main task and difficult work of the nondestructive testing of ancient wooden structures. Firstly, this paper introduces the composition of wooden structures of ancient buildings, and summarizes the nondestructive testing content and current common nondestructive testing methods. Then, the application and research progress of the inspection of concealed defects, the classification of wood members and the influence of decay on mechanical properties of ancient wood were summarized. Finally, the research status of nondestructive testing of ancient wood mechanical properties and effect of natural aging on wood properties of ancient buildings were summed up. The paper should be able to inspire and help relevant people who engaged in the inspection application and scientific research of protection technology of ancient building wood structures.

收稿日期: 2024−01−11　**修回日期:** 2024−02−05
基金项目: 北京市科学计划公益应用类项目（Z090506016609002），金中都水关遗址木结构病害调查横向项目（2021HXFWGXY012）。
第一作者: 张厚江，博士，教授。主要研究方向：木材无损检测。Email：hjzhang6@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学工学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

Key words: wooden structures of ancient architecture; wooden member; nondestructive testing; defect; mechanical property

作为世界四大文明古国之一，中国拥有大量的木结构古代建筑，如故宫建筑群、雍和宫、明十三陵、山西应县木塔、宁波保国寺等。这些古代建筑不仅是对中国历史文化的传承，也是中国乃至世界的重要文物和历史文化遗产。伴随着文物保护事业的不断发展壮大，保护和修缮木结构古建筑的任务也明显增加。木结构古建筑具有许多优势，除了对人体具有多重保护作用外，对于瞬间冲击、地震等也具有较好的抵抗能力。而作为一种生物材料，木材最主要的缺点就是在其充当古建筑主要承重构件且在长时间的服役过程中，很容易受到真菌和虫类等有害生物的侵害并导致木材发生裂纹、腐朽、孔洞等缺陷，从而影响木构件的承载能力和建筑使用安全性[1]。

对木结构古建筑的保护和修缮原则为“尊重历史、尊重文物、不改变原状、最少干预”，即在条件允许的情况下尽可能保有原来的木构件，所以在木结构日常保护尤其是修缮之前需要进行检测工作来判断木结构及其各木构件的缺陷情况和保有力学性能。由于古建筑木结构的珍贵性和结构的复杂性，检测人员在不允许随意拆解木构件或进行任何破坏性检测等原则的情况下，如何合理有效地检测出各木构件存在状况，并使检测工作拥有较高效率和准确度就显得尤为重要。

无损检测是指在不损害或不影响被检测对象使用性能，不伤害被检测对象内部组织的前提下，利用材料内部特性或缺陷存在特征，以物理或化学方法为手段，借助现代化的技术和设备器材，对被测对象内部及表面的性质、状态和缺陷进行检测的方法[2]。木材无损检测内容主要包括缺陷无损检测和物理力学性能无损检测两个方面。木结构缺陷有外观缺陷和隐藏缺陷两种形式，隐藏缺陷处在木构件或木结构内部，不能直接被看到，一直是无损检测的主攻对象[3–4]。

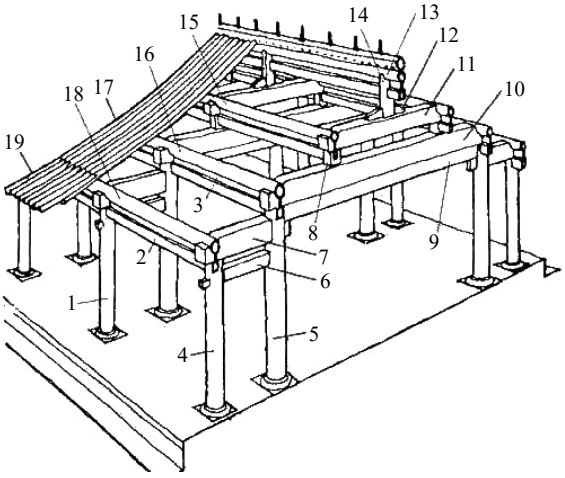
本文首先介绍古建筑木结构的组成，总结其无损检测内容和目前常见无损检测方法，然后对木构件隐藏缺陷和力学性能无损检测、古建筑木材性质自然老化的研究状况等进行归纳说明。以期对从事木结构文物保护技术应用和科研工作的相关人员，有所启发和帮助。

1 古建筑木结构及其无损检测内容

1.1 古建筑木结构类型与组成

古建筑木结构是指古建筑中起承重作用的木材构件，以榫卯连接为主要方式连接而成的木结构。中国古建筑木结构经过几千年的演化，留存和延续下来的构造形式主要包括抬梁式、穿斗式、井干式 3 种。中国现存的木结构古建筑中，明、清官式建筑占有相当大的比例，且北方古建筑木结构以抬梁式为主，南方古建筑木结构以穿斗式为主[5]。

抬梁式古建筑依据等级不同，屋顶分为庑殿顶、歇山顶、攒尖顶、悬山顶、硬山顶、卷棚顶等形式。屋顶形式不同，木结构顶部结构形式有差异。其中，硬山顶是比较典型、常见的古建筑，其木结构形式也可认为是其他类型古建筑木结构的形成基础。图 1 为硬山顶古建筑木结构示意图[6–7]，组成木结构的构件包括柱、梁、檩、枋、斗拱、椽子等。木结构古建筑自下而上可以分为台基、大木作框架和屋顶三大部分，其中大木作框架是整个建筑木结构最主要的部分，由柱、梁、檩、枋等大木作构件组成。木结构古建筑独特的结构形式，使其在竖向荷载的传递上与现代钢筋混凝土建筑有明显的不同，一般情况下，中国木结构古建筑的木构件框架与墙体是独立的，木结构古建筑从屋顶传来的竖向荷载由上至下的传递顺序为：屋顶→屋架（檩三件）→斗拱榫卯结构→梁柱框架→木柱→台基。可见，柱、梁、檩、枋是木结构中的关键木构件。



1.檐柱 Eave column, 2.檐枋 Eave tiebeam, 3.垫板 Cushion board, 4.角柱 Corner column, 5.金柱 Hypostyle column, 6.穿插枋 Penetrating tie, 7.抱头梁 Baotou beam, 8.瓜柱 Short column, 9.随梁枋 Beam-follower tiebeam, 10.五架梁 5-purlin beam, 11.三架梁 3-purlin beam, 12.角背 Bracket, 13.脊檩 Ridged purlin, 14.脊瓜柱 King post, 15.上金檩 Upper intermediate purlin, 16.下金檩 Lower intermediate purlin, 17.檐椽 Eave rafter, 18.檐檩 Eave purlin, 19.飞椽 Flying rafter

图 1 硬山顶古建筑木结构示意图

Fig. 1 Sketch of ancient timber structures of flush gable roof buildings

1.2　古建筑木结构常见缺陷

古建筑木结构缺陷也称为古建筑木结构病害，包括木结构缺陷和木构件缺陷两类(表 1)，前者指木结构出现变形、残缺、损坏等不利于古建筑保护的现象，后者指组成木结构的木构件本身材质的败坏、降解、虫蛀等[8]。

木结构或木构件缺陷根据是否能直接被肉眼观察到，可分为外观缺陷和隐藏缺陷两类。前者能被肉眼直接观察到，后者则无法直接通过肉眼观察到。对木构件来讲，隐藏缺陷又可分为木构件内部缺陷和被周围物体遮挡的木构件外部缺陷两种。隐藏缺陷的检测和评估是古建筑木结构无损检测工作的重点和难点。

1.3　古建筑木结构无损检测基本流程

古建筑木结构无损检测基本流程总的分为准备和检测两个阶段[9−10](图 2)。准备阶段包括信息收集、实地观察、初步报告撰写 3 步，检测阶段包括几何测量、结构分析、详细检测、检测报告撰写 4 步。

表 1　古建筑木结构常见缺陷形式

Tab. 1　Common defects of ancient timber structures

分类 Type	缺陷形式 Defect form
木结构缺陷 Wood structure defect	歪斜、拔榫、脱榫、下沉、坍塌、构件缺失等 Deflection, tenon loosing, tenon separating, sinking, collapse, component missing, etc
木构件缺陷 Wood member defect	腐朽、空洞、裂纹、变形、虫蛀、节子、材料缺失等 Decay, hollow, crack, deformation, insect damage, knot, material deficiency, etc

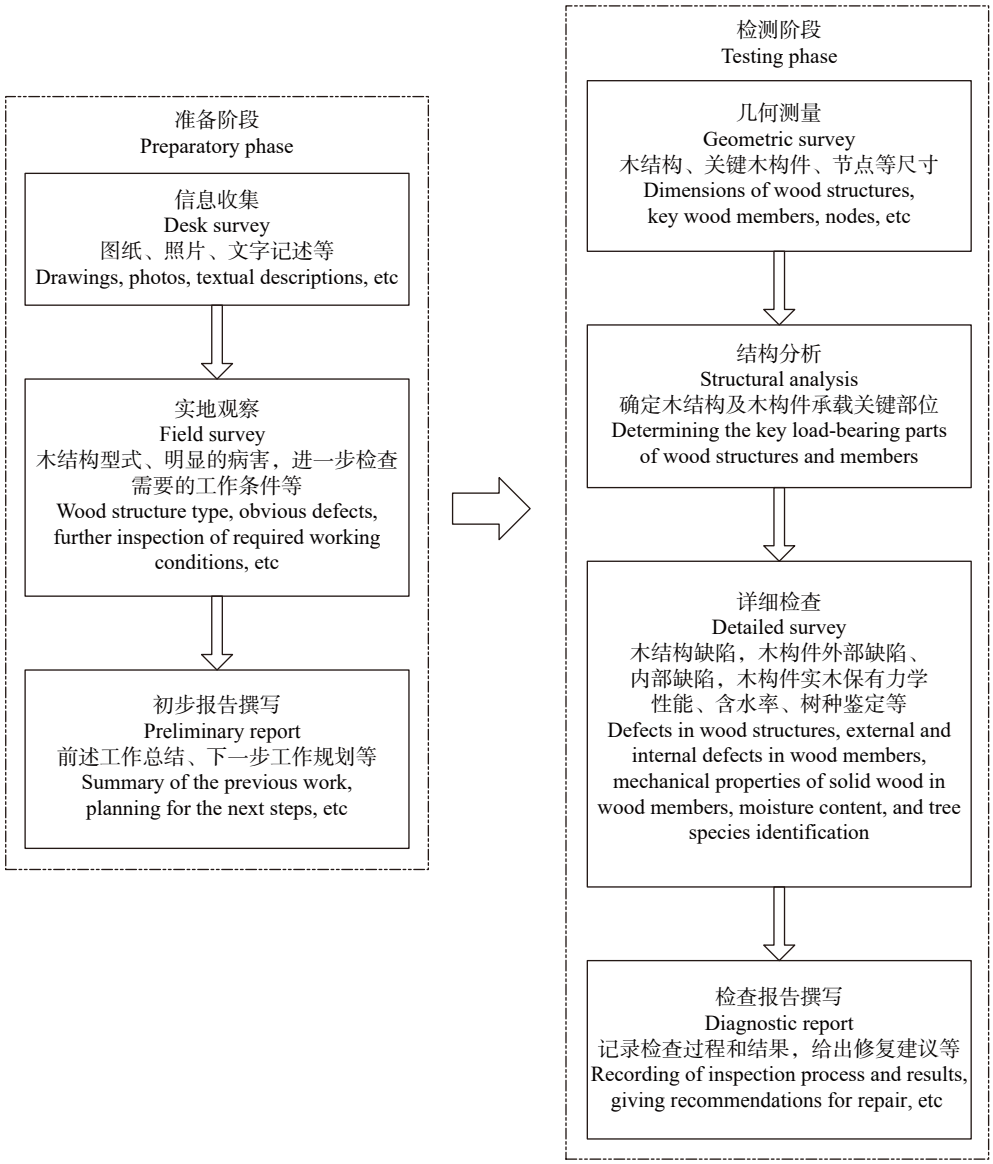


图 2　古建筑木结构无损检测基本流程

Fig. 2　Steps of nondestructive testing of ancient timber structures

信息收集内容包括被测古建筑的图纸、照片、文字记述、始建和历史修复信息，以及建筑物管理方对该古建筑维护及使用的规划等。在信息收集的同时或之后，检测者需要到古建筑现场初步实地观察，明确木结构的形式、易出问题区域，记录木结构的明显病害缺陷，确定进一步详细检测需要具备的脚手架、梯子等辅助条件。信息收集和实地观察后，一般应撰写一份初步报告给建筑物管理方，对前两步工作给予汇总，并对下一步检测工作提出规划。

在检测阶段，首先应补齐、验证图纸上的关键尺寸，如木结构、关键木构件、节点(榫卯结构)等的尺寸；如果没有收集到图纸，则要测绘木结构形式，测量尺寸，形成木结构图。然后，对木结构给予载荷、应力分布分析，明确木结构和木构件的承载关键部位、最大应力出现部位等，这些部位将是下一步详细检测的重点部位。详细检测是古建筑木结构无损检测与评估工作的核心和重点，包括木结构缺陷详细检测和单个木构件缺陷详细检测，如木结构整体歪斜、坍塌、木构件缺失、拔榫、脱榫，以及木构件的内外部腐朽、内部空洞、裂纹、损伤、虫蛀、变形等。在详细检测完成后，需要撰写检测报告，内容包括检测过程、方法、发现的问题以及原因推测、修复建议等，供古建筑物管理者和结构工程师参考，并作为他们确定保护和修缮方案的依据。

1.4 古建筑木结构详细检测基本方法

1.4.1 外观检测

外观检测是指对能够用肉眼直接观察到的木结构及其构件的外观结构和缺陷进行的检测。外观检测内容包括：木结构整体(木结构歪斜、下沉、坍塌、木构件缺失、漏雨迹象等)、榫卯结构节点(拔榫、脱榫、腐朽等)、木构件(外观腐朽、裂纹、损伤、木构件变形等)、虫害(蠹虫、木蜂、天牛、白蚁等的蛀孔)。外观检测方法包括肉眼观察、敲击[11−12]、尺子测量、探针探查、拍照、激光扫描等，在检测过程中，做好记录。

1.4.2 含水率检测

对易潮湿和工作应力较大的木结构部位进行含水率检测，如木柱下部、木构件靠近墙壁部位、梁中部、檩中部、枋中部、木结构有漏雨迹象的部位、建筑拐角处木构件等。含水率测量仪器一般采用双针式木材含水率测量仪。含水率数值有助于判断该处木材是否容易发生或存在腐朽[13]，一般情况下，当木材含水率低于 20% 时，木材不发生腐朽，已存在腐朽的木构件部位，腐朽发展也会停止。

1.4.3 微钻阻力检测

微钻阻力检测是以小型电机将检测钢针(直径 2 ~ 3 mm)均匀地钻入木材内部，通过检测钢针在钻入过程产生的微钻阻力来反映木材密度。通过测量被测试材的微钻阻力，结合其阻力曲线图谱，可以判断木材内部缺陷，甚至年轮数等。古建筑木构件隐藏缺陷检测的依据就是这一原理。因为密度是与木材力学性能密切正相关的一个参数，所以微钻阻力也可用于木材力学性能的检测。这种方法会在木材表面和内部留下微小孔痕，但由于对木构件本身功能没有影响，也被划入无损检测范围。

1.4.4 应力波检测

应力波是应力和应变扰动的传播形式，在可变形固体介质中机械扰动表现为质点速度的变化和相应的应力、应变状态的变化。应力、应变状态的变化以波的方式传播，称为应力波。通常将扰动区域与未扰动区域的界面称为波阵面，波阵面的传播速度称为波速。物质受撞击之后产生冲击应力波，固体中的声波和超声波等都是常见的应力波[14]。应力波既可用于木构件材料力学性能的检测，又可用于其内部缺陷筛查。根据使用传感器的数量不同，应力波无损检测古建筑木构件的应用形式分为应力波波速法和应力波断层成像法[3]。

(1)应力波波速法。两个传感器置于木构件不同部位，其中一个传感器发出应力波，另一个传感器接收；通过传感器间距和传播时间可以计算出应力波波速。将两个传感器沿木构件长度方向布置，通过波速测量可以间接知道木材的弹性模量，弹性模量 E 与应力波波速 C 和密度 ρ 的关系为 $E = C^2\rho$。将两个传感器沿木构件横截面对称布置，如果波速比正常波速明显偏小，说明两传感器之间存在腐朽、空洞或开裂等形式的缺陷。

(2)应力波断层成像法。在木构件外截面上布置多个应力波传感器，可以获得该截面多个路径(两两传感器之间)上的波速及其异常，进而可以通过计算机处理形成该截面的包含缺陷信息的截面图像。这种方法存在两个方面的不足：一个是古建筑木构件内部多存在裂纹，对腐朽和空洞缺陷在图像中的位置、尺寸造成误差；另一个是除露明柱外的大多数古建筑木构件没有操作空间。

1.4.5 木构件树种鉴定

通常一个木结构中由几种不同树种的木构件组成，木构件树种关系到木结构安全计算和木构件腐朽缺陷的判断等。在古建筑现场，一般在木构件非关键部位，用小刀等工具截取一小段材料，一般尺寸为 1 cm × 1 cm × 2 cm。试样取得后，放入小塑料袋，并标记。鉴定工作程序包括切片、浸泡、显微镜观察、拍摄显微照片等。采集的样品经热水煮沸软化 3 天后，依据 GB/T 29894—2013《木材鉴别方法通

则》将样品制作成为横向、径向、弦向这 3 个面的切片，然后在彩色光学显微成像系统下观察。通过特征提取，对照《中国木材志》中记载的材种特征、木材识别特征和图谱确定树种。

2　古建筑木构件缺陷无损检测与评估

古建筑木构件缺陷可分为外部缺陷和内部缺陷两种。木构件外部缺陷发生在木构件外部，通常包括裂纹、表面腐朽、材料缺失和机械损伤等。根据外部缺陷是否能够被肉眼直接观察到，将其分为外观缺陷和非外观缺陷两种，非外观缺陷例如半露明柱与墙体接触部位存在的外部缺陷等。在古建筑木结构检测工作当中，外观缺陷的检测工作相对较为容易。检测人员通过目测和一些简单的尺寸测量工具就可以对外观缺陷的类型和大小进行判断。

木构件内部缺陷主要包括内部腐朽和内部孔洞[3]。内部腐朽是由于木构件受到细菌、病虫等侵害从内部产生的材质变异，内部腐朽发展到一定程度就会变成内部孔洞。本文将木构件内部缺陷和被隐藏的外部缺陷（非外观外部缺陷）统称为木构件的隐藏缺陷。由于木结构古建筑的珍贵性和结构的复杂性，检测人员通常在不允许随意拆解木构件或进行任何破坏性操作的情况下进行检测工作，所以相对外观缺陷来说，隐藏缺陷的检测工作更麻烦，难度更大。目前，检测人员需要使用一些无损检测技术进行木构件隐藏缺陷的检测工作。

2.1　古建筑木构件隐藏缺陷无损检测过程及检测技术研究进展

目前，古建筑木构件隐藏缺陷无损检测过程通常包括初步筛查、验证性筛查和精确检测 3 个步骤。初步筛查是指对木构件隐藏缺陷的快速系统性排查，即以整个木结构为对象，初步快速判断出可能存在隐藏缺陷的木构件和缺陷可能的位置。验证性筛查是指对可能存在隐藏缺陷的木构件进行缺陷确认和大小的估算。精确检测是指精确判断出隐藏缺陷的形状和尺寸。

2.1.1　初步筛查

针对一个特定的古建筑木构件，其隐藏缺陷的初步筛查主要采用外部观察和敲击检测两种方法。这两种方法主要是依靠检测人员的经验和感觉，通过目测木构件外观和听取小锤敲击木构件表面发出的声音来初步判断木构件可能存在隐藏缺陷的位置。例如：目测发现木构件表面有菌类生物或木构件表面有塌陷，则其内部或隐藏部位很可能有腐朽存在；小锤敲击有明显的空洞声，则木构件内部很可能有孔洞或严重的腐朽存在[11]。鉴于其对经验和感觉的依赖性，目前木构件隐藏缺陷初步筛查的准确度还有待提高。

2.1.2　验证性筛查

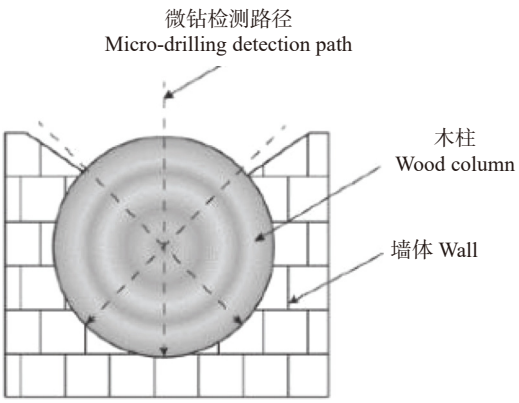
验证性筛查是指利用一些木材无损检测技术对初步筛查中判断出的可能存在内部和隐藏缺陷的部位进行进一步的确认检测工作。目前，国内外主要是使用微钻阻力和应力波检测技术对古建筑木构件隐藏缺陷进行验证性筛查。

微钻阻力检测技术是目前国内外木结构古建筑无损检测技术中适用性最高、应用最广泛的无损检测技术。它能够很快地检测出木构件内部的材质状况，易操作并且仪器方便携带。Frank[15]在 1993 年利用微钻阻力对多个树种的木构件进行了检测实验，用来评估各木材阻力值与内部腐朽的关系，发现当木材内部出现腐朽、裂纹、孔洞等缺陷时，微钻阻力曲线会明显下降；根据阻力值的变化可以对被测木构件在钻针路径上的缺陷有无及大小做出判断。李华等[16]在 2004 年利用微钻阻力仪对北京故宫保和殿内部的木构件缺陷进行了检测，根据微钻阻力可以比较准确地检测出钻针路径上的缺陷及其尺寸，能够在一定程度上提高木构件缺陷检测的准确度。黄荣凤等[17]在 2007 年对北京故宫武英殿的部分旧木构件进行了微钻阻力检测，发现不同腐朽等级的木材对应的微钻阻力值存在明显的不同，从而证明微钻阻力可以很好地评价木构件的腐朽状况。张典等[18]在 2021 年对故宫养心殿墙体木柱隐藏缺陷进行了检测评估，研究中微钻阻力检测起到了关键作用。

应力波检测技术是近些年被应用到古建筑木构件检测中的无损检测技术之一。当木材受到冲击力的作用时，其内部会相应地产生应力波并向周围传播，这时利用两个传感器来感应并接收该应力波信号获得两点之间的应力波传播的时间差，再根据应力波传播速度的变化来判断被测木材内部的缺陷状况。Lee 等[19]在 1964 年首次在现场使用超声应力波检测古建筑木构件，检测了英国 18 世纪建造的某古建筑屋顶各木构件横向与纵向的应力波传播速度，并初步判断了木构件的材质状况。Ross 等[3]在 1982 年利用应力波检测了华盛顿州立大学足球场看台连接结构，通过对各木构件的检测发现，外观相同的情况下，木构件内部严重腐朽部位的应力波传播速度远远小于正常部位的传播速度，从而证明了应力波用于古建筑木构件内部腐朽无损检测的效果。Perllerin 等[20]在 1996 年对美国俄勒冈州东部的两座木桥使用应力波来检测和评估其木构件的材质状况，通过检测发现存在多处木构件腐朽。段新芳等[21]在 2007 年使用应力波检测西藏木结构古建筑的虫

蛀和腐朽问题，发现古建筑部分木构件存在明显的表面和内部腐朽，并且木构件表面检测的结果和目测结果基本一致。在利用应力波进行木构件内部缺陷验证性筛查过程中，临界波速值是一个关键判据，它会因树种、检测位置的不同而不同，所以国内外一些学者[22−23]进行了这方面研究。

在古建筑现场检测过程中，应力波检测需要操作人员能同时接触到被测木构件截面的两个对称侧面，而微钻阻力检测只需要操作人员接触一个侧面即可，所以后者在操作空间上优势更明显。例如，对单面外露的半露明柱来讲，只能用微钻阻力来检测（图 3）[18]。



引自参考文献 [18]。Cited from reference [18].

图 3 单面外露的半露明柱微钻检测示意图

Fig. 3 Sketch of micro-drilling inspection on single exposed columns

单独使用微钻阻力或应力波，都只能大致判断木构件内部缺陷的位置和尺寸。所以，在可能的条件下将微钻阻力和应力波结合使用，可以取得更精确的检测效果[24]。

2.1.3 精确检测

在经过初步筛查和验证性筛查之后，根据需要可以对木构件上关键部位的内部缺陷的确切形状和尺寸再进行精确检测。主要方法包括应力波断层成像法和 X 射线 CT 法[3,25]。

应力波断层成像技术是利用计算机处理多个传感器之间检测的应力波传播速度，从而通过软件直接显示出检测截面内部的情况，这种技术对应的仪器起初是针对活立木设计的，由于古建筑木构件的含水率与活立木相差较大，再加上目前计算方法的局限性，导致检测结果一直不太理想。X 射线 CT 技术对木材内部缺陷检测的精度很高，但在现场实际检测中不能保障检测人员身体的安全，所以该检测技术并未广泛应用。另外，应力波断层成像法和 X 射线 CT 法应用到古建筑现场检测中，除周围空间开阔的露明柱外，其他木构件几乎都缺乏合适的操作空间。也就是说，古建筑木构件隐藏缺陷精确检测技术仍处在一个待完善的科研发展阶段。

2.2 古建筑木构件分等

GB50165—2020《古建筑木结构维护与加固技术标准》[26]、DB11/T 1190.1—2015《古建筑结构安全性鉴定技术规范（第 1 部分：木结构）》[27]中，对古建筑木构件和木结构状况均分为 4 等。对木构件状况的评估分级是古建筑木结构无损检测的核心，因为木构件分级是木结构状况分等的核心依据。在实际操作中，柱、梁、檩（桁）、枋等单个木构件一般分为 A、B、C、D 这 4 等，其中 A 等木构件为状况良好木构件，B 等木构件为有较小缺陷但不必干预加固的木构件，C 等木构件为有一定缺陷，修复加固后可继续使用的木构件，D 等木构件为不宜继续使用，建议更换的木构件。木构件分等中可重点依据木构件表面腐朽与材料缺失、内部缺陷、裂纹、弯曲这 4 个方面的检测结果[18,28]。

2.3 古建筑木材腐朽原因及其对力学性能的影响

腐朽是古建筑木构件最主要和最常见的缺陷形式。木材腐朽是指木材受到真菌作用，发生纤维素、半纤维素、木质素等成分降解，导致其腐烂和解体的现象。侵蚀木材的真菌被称为腐朽菌或者木腐菌，通常分为 3 种类型：褐腐菌、白腐菌和软腐菌。褐腐菌常见于针叶材中，多分解木质部中的多糖物质，留下被修饰的木质素剩余物；褐腐菌在早期腐朽时，半纤维素降解速率快于纤维素；被褐腐菌腐朽的木材松软易碎，腐朽后期木材表面呈现出大小不一的筛孔形态。白腐菌活跃于阔叶材中，以细胞壁上的碳水化合物和木质素为养分，主要侵蚀木质素和半纤维素，并产生少量降解纤维素的酶。软腐菌通常生存在非常潮湿的极端环境中，I 型软腐菌攻击木材次生壁中层（S_2）上的碳水化合物和少量脱甲氧基木质素，形成纵向孔洞；II 型软腐菌侵蚀阔叶材整个细胞壁或针叶材次生壁的 S_2 层，形成腔孔。

木材发生腐朽需要同时具备 4 个前提条件：①20% < 含水率 < 80%；②暴露在空气中（有氧气）；③温度 4 ~ 38 ℃（最佳温度 24 ~ 30 ℃）；④未经防腐处理。对一般古建筑木结构来讲，后三个条件是具备的，且②、③两个条件很难避免，所以第一个条件的控制就成为避免古建筑木构件腐朽的关键因素，也就是说，要保持古建筑木构件的干燥，需要把含水率控制在 20% 以下。

木材腐朽可分为初期腐朽、中期腐朽和后期腐朽 3 个阶段，其中初期腐朽是木材腐朽最开始的阶段，Wilcox[29]将木材质量损失率在 10% 以下的木材腐朽认定为初期腐朽。处于初期腐朽阶段的木材，外表上与正常木材没有明显区别。目前初期腐朽检

测的方法主要包括显微观察法、强度测试法、荧光显微镜法、培养菌法、红外光谱法等，其中最权威的判断木材初期腐朽的方法是显微镜观察法，通过显微镜观察法可以观察到初期腐朽木材表面的轻微腐朽，该方法对质量损失率为 5% ~ 10% 的初期腐朽木材有较为理想的准确度[30]。

木材在初期腐朽时其各项力学指标均有不同程度地下降。Richard[31]在研究木腐菌对针叶材材性的影响时发现：针叶材在质量损失率为 1% 时，其冲击韧性下降了 50%；当质量损失率达到了 10% 时，所有木材的冲击韧性均下降了 65% ~ 80%。同年，Mulholland[32]研究了初期腐朽时针叶材抗弯强度和弹性模量的变化，研究结果显示：当质量损失率在 2% 时，抗弯强度和弹性模量分别下降了 13% 和 4%。随后，Kennedy[33]研究了初期腐朽对木材最大荷载的影响，研究发现：当质量损失率在 2% 时，木材的最大荷载下降了 30% ~ 50%；质量损失率达到 5% 后，木材的最大荷载下降了 40% ~ 75%。Mizumoto 等[34]对木材初期腐朽时顺纹抗压强度、顺纹剪切强度和弦切面硬度变化进行了补充研究，结果发现：木材质量损失率在 2% ~ 5% 时，其顺纹抗压强度下降了 10% ~ 22%，顺纹剪切强度下降了 3%，弦切面硬度下降了 7%；质量损失率在 7% ~ 9% 时，木材的顺纹抗压强度下降了 42%，木材顺纹剪切强度下降了 13%，木材的弦切面硬度下降了 21%。Toole[35]研究了初期腐朽对木材横纹抗压强度的影响，研究发现：针叶材的质量损失率在 2% ~ 8% 时，强度降低了 18% ~ 48%；阔叶材的质量损失率在 2% ~ 5% 时，强度下降了 10% ~ 23%。Wilcox[36]通过研究发现：木材的质量损失率在 5% ~ 10% 时，木材的冲击韧性、抗弯强度和弹性模量等力学性质均有较大程度地下降，其中木材的冲击韧性下降最多，达到 60% ~ 80%，其次是木材弹性模量，下降了 60% ~ 70%，下降最少的是木材抗弯强度，也下降了 50% ~ 70%。综上可知，初期腐朽对木材的力学性能影响很大，在初期腐朽时就会造成木材力学性能的极度下降。当木材处于肉眼可辨识的中期和后期腐朽，可以认为其完全丧失了力学性能。表 2 为 Senalik 等[37]汇总的

表 2　初期腐朽对木材力学性能的影响汇总

Tab. 2　Effects of decay of early stages on mechanical property losses of wood

菌类 Fungi	木材类型 Wood type	质量损失率 Mass loss/%	力学性能损失 Mechanical property loss/%										
			韧性 Toughness	冲击韧性 Impact bending	静态弯曲 Static bending				横纹抗压强度 Compression strength perpendicular to grain	顺纹抗压强度 Compression strength parallel to grain	顺纹抗拉强度 Tension strength parallel to grain	顺纹抗剪强度 Shear strength parallel to grain	弦面硬度 Tangential hardness
					一般弯曲强度 General bending strength	最大载荷 Mximum load	MOR	MOE					
褐腐 Brown-rot	针叶材 Coniferous wood	1	57	20 ~ 38								2	
		2		20 ~ 50	5	27	13 ~ 50	4 ~ 55	18 ~ 24	10	23 ~ 40		
		4	75	25 ~ 55					25 ~ 35			6	7
		6		62 ~ 72	16		61	66	48	25	60		
		8		78					48 ~ 60		50	15	21
		10		85	36		70		66	45		20	
	阔叶材 Broadleaved wood	1		6 ~ 27									
		2	36	31 ~ 50		54	32		6 ~ 10		56		
		4		60 ~ 70		69	49						
		6		80		75	61		16 ~ 25				
		8		9 ~ 89	13 ~ 34				19		82		
		10	60	70 ~ 92									
白腐 White-rot	针叶材 Coniferous wood	1	55										
		2							10 ~ 20		4 ~ 38		
		4									8 ~ 43		
		6	75						32 ~ 61		10 ~ 49		
		8									14 ~ 58		
		10	85								20 ~ 63		
	阔叶材 Broadleaved wood	1		21					4				
		2		26		28 ~ 35	13 ~ 14	4	5		22 ~ 42		
		4	70	44		38	20				17 ~ 44		
		6	75	50		45 ~ 53	20 ~ 27	10	12 ~ 27	14	12 ~ 58		18
		8									14 ~ 49		
		10	85	60		58	24	14	35	20	20 ~ 50		25

注：表中数据源于参考文献[37]。Note: data in the table are cited from reference [37].

初期腐朽对木材力学性能影响数据。

3 古建筑木材性质检测与评估研究进展

3.1 古建筑木材力学性能无损检测与评估方法研究

古建筑木构件经过几十到几百年的服役，其中未发生腐朽等缺陷的正常木材，在自然老化作用下其力学性能不可避免地会发生变化。通过无损检测快速检测评估出古建筑正常木材保有的主要力学性能，也是近些年研究的关注点。

段新芳等[38]对应力波检测古建筑木构件残余弹性模量进行了初步研究，发现应力波波速与木构件的弹性模量之间存在关系。Ceraldi 等[39]发现古建筑木构件材料强度与微钻阻力相关。经过进一步研究发现，结合应力波波速和微钻阻力两种参数检测评价古建筑木材保有力学性能，比单纯用一种方法的检测精度更高[40−41]。这种检测方法已被列入到北京市古建筑结构安全性鉴定技术规范中[27]。

除了利用应力波波速和微钻阻力检测评价古建筑木材保有力学性能外，有学者发现利用握钉力也可实现这一目标[3,42]。

3.2 自然老化对古建筑木材性质的影响研究

现阶段关于自然老化对古建筑木材的影响研究主要集中于自然老化对古建筑木材宏观性质、微观结构的变化和化学组分的影响这 3 个角度。最新研究表明，自然老化对古建筑木材力学性质的影响存在着“宏观—微观—化学组分”联系链条[43]，即：自然老化木材力学性质的变化是由木材微观结构变化引起的，而微观结构变化又是由于化学组分变动引起的。

3.2.1 宏观力学性质的变化

古建筑木构件在自然老化的影响下，其宏观物理力学性能会发生明显变化，主要表现在木构件的材料力学性能参数、表面颜色和吸湿行为的改变。

自然老化后古建筑木材力学性能的变化规律是学者最为关注的研究领域之一，早在 20 世纪 50 年代，日本研究学者就开始了老化对木材力学性能的影响研究[44]，欧美在这方面的研究主要开始于 60—70 年代，而我国就自然老化对木材力学性能的相关研究开始于 20 世纪 90 年代[45]。

较多研究表明自然老化对木材的力学性能有消极作用。Cai 等[46]对建于 1909 年建筑中拆修下的南方松（*Pinus* spp.）木构件与相应新材进行抗弯弹性模量（modulus of elastic，MOE）的比较，发现老化木构件的 MOE 低于新材约 30%。Yokoyama 等[47]对老化扁柏（*Platycladus orientalis*）木构件及相应新材进行力学试验发现静曲强度（modulus of rupture，MOR）随着时间而显著下降，且老化后木材的断裂形式更加趋于脆性断裂。Yoshihiko 等[48]对具有超过 200 年树龄的不同树种的木构件进行力学性能测定，发现不同种类的木材力学性能下降程度不同，其中桦木的 MOR 与 MOE 分别下降了 16.3% 和 14.8%。Krajewski 等[49]对服役时间约 263 ~ 459 年的苏格兰松木及相应新材的试验分析发现，自然老化木材的 MOR 相对相应新材降低了约 20%。陈国莹[50]对应县木塔和元代建筑晋祠景清门修缮中获取的旧木构件与相应新材进行力学性能试验测定，结果发现：经过 600 ~ 900 年自然老化的木构件，力学性能等参数衰减明显，但降低程度不一。Machado 等[51]对取自某古建筑（建于 1758—1777 年）的自然老化樟子松（*Pinus sylvestris*）与松木构件进行了力学强度的测定，发现相对新材其顺纹抗拉强度降低了约 40% ~ 60%。

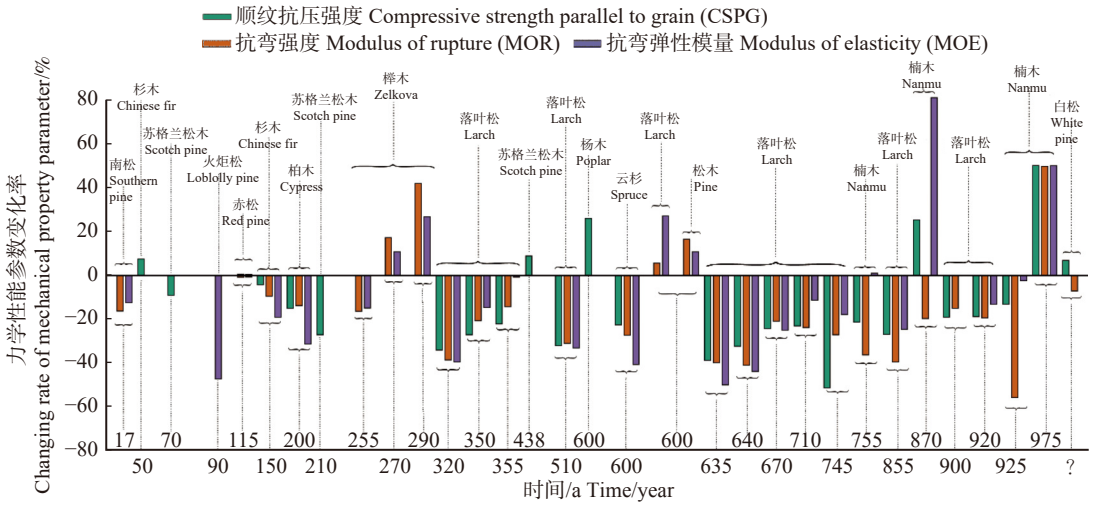
也有部分研究表明自然老化对木材力学性能具有较小或积极的影响。Attar-Hassan[52]对桦木和雪松（*Cedrus deodara*）老化木构件进行力学性能测定，结果表明自然老化对不同树种的木材力学性能的影响有所区别，老化桦木的 MOE 较新材高，这种现象在 Raposo 等[53]的研究中也被观察到。Lourenco 等[54]对取自古建筑约具有 50 年历史的板栗（*Castanea mollissima*）木构件进行物理力学性能测定，发现老化木构件与新材试件间无明显的差别。Kránitz 等[55]应用超声波装置测定了老化挪威云杉（*Picea abies*）及其对应新材的动态弹性模量和剪切模量，发现老化木材与新材间在力学性能上无显著差异。

综上发现，虽有较多关于自然老化对木材物理力学性能参数的影响研究，但由于木材的自然老化是一个复杂的化学过程，受多种环境因素的影响，同时由于木材的高度变异性，不同树种化学组分相对含量具有较大差别，故目前尚无明晰的自然老化对古建筑木材力学性能的影响规律。整理已有文献结果如图 4 所示[43]。

3.2.2 微观结构的变化

木材的自然老化过程中，木材细胞壁微观结构的变化是导致其宏观力学性能发生变化的内在原因，木材细胞作为木材的基本结构和功能单位，其细胞壁结构影响着木材宏观强度。近年来越来越多的学者通过光学显微镜、扫描电镜（scanning electron microscope，SEM）、透射电镜等表征方法观察自然老化木材切片，以分析自然老化对木材微观结构的影响，以及老化后木材的宏观性能变化的机理。

高悦文[56]通过 SEM 方法对人工加速老化后的木材及相应新材试件进行超微结构的观察发现：新材样品细胞壁光滑、规整，而经过紫外加速老化的木



引自参考文献 [43]。Cited from reference [43].

图 4　自然老化对木材力学性能影响研究结果

Fig. 4　Conclusion of the study on the effects of natural aging on wood mechanical properties

材纹孔出现裂纹，且随着老化时间的延长，这类损坏更加明显。米晓琛[57]对应县木塔拆修下的木材样品进行 SEM 微观观察，发现较多木材细胞壁出现明显损伤，主要包括细胞壁扭曲挤压变形、细胞壁开裂等，表明了木材样品的老化。Tomassetti 等[58]对自然老化后云杉与落叶松（*Larix gmelinii*）木材进行 SEM 的微观结构观察，结果表明：相对于新材，老化木材细胞壁中观察到了更多断裂与分层。相似的现象也在具有 100 ~ 300 年使用历史的椴木样品的 SEM 分析中被发现[59]。Machado 等[51]对老化樟子松木材进行了 SEM 观察，发现了细胞壁普遍存在较多裂纹，或细胞壁中间层与 S_1 层间的分层现象。这可能是由于木材在长时间的服役后，纤维素与半纤维素降解，在收缩、膨胀应力的作用下造成微观结构的变化导致了细胞壁裂纹，而木材细胞壁的分层及细胞结构的扭曲变形可能是由外部荷载和气候的周期变化引起。

此外，还有学者对老化木构件破坏时的断口进行了微观观察分析，发现老化木材的断裂处光滑，而新材的断裂则表现出滑移不易断裂的现象，解释了老化后木材相对新材呈现出脆性断裂的原因。Froidevaux 等[60]还发现在进行 SEM 样品制备时，老化木材样品更易产生由切割应力导致的木材细胞损伤。这同样表明了老化木材微观结构强度的弱化。

由此可见，自然老化对木材细胞壁微观结构的影响主要为细胞壁的裂纹及细胞壁结构的分层、扭曲等。木材细胞壁的微观损伤造成了木构件物理力学性能的改变，通过对木材细胞壁微观结构的观察，可以解释老化后木材弹性模量、强度降低的原因。

3.2.3　化学组分的变化

木材细胞壁主要组成成分为纤维素、半纤维素和木质素，被称为木材的三大素，木材的物理力学性质与三大素的分子组成、结构、性质以及三者之间的相互作用密切相关[61]。其中纤维素以分子链聚集成束和排列有序的微纤丝状态存在于细胞壁中，起着骨架物质作用，相当于钢筋水泥构件中的钢筋；半纤维素以无定形状态渗透在骨架物质之中，起着基体黏结作用，故称其为基体物质，相当于钢筋水泥构件中的砂石；木质素是在细胞分化的最后阶段木质化过程中形成的，它渗透在细胞壁的骨架物质和基体物质之中，可使细胞壁坚硬，所以称其为结壳物质或硬固物质，相当于钢筋水泥构件中的水泥[62]。

已有一些学者应用多种方法对老化木构件的化学组分相对含量进行了测定，如利用湿化学法、红外光谱法（Fourier transform infrared spectroscopy，FTIR）等[63]。湿化学法是经典木材化学组分定量分析手段，应用广泛。例如：李雄等[64]通过湿化学法化学组分测定发现相对新材，老化木构件中半纤维素、纤维素与木质素相对含量均发生降低；Kránitz 等[55]对具有 108 ~ 390 年服役时间的冷杉木构件进行化学组分分析，测定其纤维素、半纤维素和木质素的相对含量，结果表明自然老化后木构件的抽提物相对含量显著增大，半纤维素相对含量显著下降，发现半纤维素是木材中最不稳定的成分之一，而木质素相对含量相对稳定；米晓琛[57]对应县木塔的木材样品进行化学组分分析，发现老化木材的半纤维素、纤维素和木质素的相对含量均发生较为明显的降低，这也解释了经过多个世纪的自然老化后木材力学性能的降低原因。

相对湿化学方法，近年来较多的基于光谱技术的木材化学组分定性分析检测方法被使用。Tsuchikawa 等[65]通过近红外光谱技术对建于公元 750 年的木结构建筑中采集到的木构件进行化学组分分析，发现

纤维素、半纤维素和木质素随老化而降解严重，并提出了细胞壁微纤丝结构变化的形态模型。Miklečić等[66]对紫外光加速老化的多种木材进行了 FTIR 测定，发现经紫外光照射后，木质素官能团相关峰强度降低。相同的现象在对云杉样品的 FTIR 测定中也被观察到[67]。

4 结　　语

古建筑木结构无损检测是以无损检测和评估古建筑木结构安全性、以现场应用和实际需求为导向的木材材性检测评估技术，检测内容主要包括缺陷无损检测和物理力学性能无损检测两个方面。木构件的缺陷无损检测技术发展较快，实际应用较多；古建筑木构件保有材料力学性能无损检测技术发展较慢，实际应用较少。实际应用中，木构件隐藏缺陷无损检测应用最好的是基于微钻阻力的检测技术。今后古建筑木结构无损检测研究可以重点关注以下 3 个方向。

（1）适合现场使用的木构件隐藏缺陷无损检测方法精度的提高。目前适于室外现场使用的微钻阻力法只能得到钻针路径上的局部缺陷信息，应力波断层成像法不能区分内部裂纹与空洞、腐朽缺陷，且多数情况下缺乏操作空间。X 射线 CT 法是检测精度很高的方法，能清楚地显示木材内部缺陷、节子、年轮等信息，但这种方法需要在有严格防护设施的室内进行。如果木材无损检测与 X 射线检测双方科研人员合作解决了 X 射线 CT 法室外使用的防护问题和小角度扫描检测问题，则对古建筑木构件隐藏缺陷的现场高精度无损检测将是一种质的推进。

（2）古建筑木材保有力学性能无损检测的便捷化。现有的古建筑木材保有力学性能无损检测计算公式，往往需要绑定仪器的具体型号。现有的微钻阻力仪厂家各自定义了阻力值单位，而非国际通用的扭矩单位(N·m)或力单位(N)，给基于微钻阻力的木材保有力学性能计算公式的广泛应用带来困扰。完善现有仪器或开发新仪器，使仪器输出量具有通用单位，是需要做的一件事。

（3）新技术的引入。将其他学科和行业成熟或新出现的无损检测新技术，借鉴或引入到古建筑木结构无损检测领域，是时刻需要关注的事情。将雷达波、红外热成像、超声导波等技术引入到古建筑木构件隐藏缺陷的无损检测，可能会带来新突破[68−70]。其中，雷达波技术在筛查木构件内部缺陷方面，显示出较好的潜力[68,71]，其操作便捷、完全无损、不需要耦合剂，但在合理选择雷达波频率、木材含水率影响、雷达波图像处理与解读等方面还有许多科研工作要做。

总而言之，对已经较好应用的古建筑木结构无损检测技术，下一步科研的目标应当是进一步提高检测精度和效率；对尚处在科研探索阶段的无损检测技术，仍应从基础理论完善和技术实现角度进行科研工作。

参 考 文 献

[1] 陈允适. 古建筑木结构与木质文物保护 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
Chen Y S. Conservation of ancient wood structures and cultural relics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.

[2] 张厚江, 管成, 文剑. 木质材料无损检测的应用与研究进展 [J]. 林业工程学报, 2016, 1(6): 1−9.
Zhang H J, Guan C, Wen J. Applications and research development of nondestructive testing of wood based materials[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(6): 1−9.

[3] White R H, Ross R J. Wood and timber condition assessment manual [M]. Washington: USDA Forest Service, 2014.

[4] Ross R J. Nondestructive evaluation of wood[M]. Washington: USDA Forest Service, 2015.

[5] 汤崇平. 中国传统建筑木作知识入门 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
Tang C P. Chinese traditional wood architectural knowledge introduction [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.

[6] 马炳坚. 中国古建筑木作营造技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Ma B J. Wood construction technology of Chinese ancient architecture [M]. Beijing: Science Press, 2003.

[7] 于永柱. 古建筑墙体木柱缺陷无损检测与安全性数值模拟研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
Yu Y Z. Nondestructive testing of defects and numerical simulation of safety for wall wood columns of ancient buildings[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.

[8] 马星霞, 王艳华, 贺大龙. 古建筑木结构病害与保护 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2021.
Ma X X, Wang Y H, He D L. Disease and protection of ancient wood structures[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2021.

[9] Cruz H, Yeomans D, Tsakanika E, et al. Guidelines for on-site assessment of historic timber structures[J]. International Journal of Architectural Heritage, 2015(9): 277−289.

[10] Perria E, Sieder M. Six-steps process of structural assessment of heritage timber structures: definition based on the state of the art[J]. Buildings, 2020(10): 109.

[11] 廖春晖. 古建筑木构件内部缺陷无损筛查方法研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
Liao C H. Study on non-destructive screening internal defects of historic wood structural members [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.

[12] 郭开龙. 基于力信号特征的古建筑木构件内部缺陷敲击筛查研

究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
Guo K L. Investigation on screening internal defects of historic wood structural members based on the tap force characteristics [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

[13] 周浩宇, 彭林, 张厚江, 等. 金中都水关遗址木结构含水率及其影响因素 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(5): 143−154.
Zhou H Y, Peng L, Zhang H J, et al. Moisture content and its influencing factors of wood structures at Shuiguan Site in Jinzhongdu Watergate Site of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(5): 143−154.

[14] 郭伟国, 李玉龙, 索涛. 应力波基础简明教程 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
Guo W G, Li Y L, Suo T. Stress wave basic concise tutorial [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007.

[15] Frank R. Catalog of relative density profiles of trees, poles, and timber derived from resistograph micro-drillings [C]//Proceedings of the 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Madison: Forest Products Society, 1993: 61−67.

[16] 李华, 石志敏, 陈勇平, 等. 无损检测技术在故宫保和殿柱构件勘查中的应用 [C]//故宫博物院 85 周年院庆暨中国紫禁城学会第七次学术讨论会. 北京: 中国紫禁城学会, 2010: 561−566.
Li H, Shi Z M, Chen Y P, et al. Application of nondestructive testing technology in screening wood column of the Imperial Palace [C]// The 85th anniversary of the Palace Museum and the 7th Symposium of the Forbidden City Society of China. Beijing: The Forbidden City Society of China, 2010: 561−566.

[17] 黄荣凤, 王晓欢, 李华, 等. 古建筑木材内部腐朽状况阻力仪检测结果的定量分析 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(6): 167−171.
Huang R F, Wang X H, Li H, et al. Quantitative analysis on the detected results by resistograph on inside wood decay of ancient architecture[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(6): 167−171.

[18] 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.

[19] Lee I D G. Ultrasonic pulse velocity testing considered as a safety measure for timber structures [C]// Marra G G, Galligan W L. Proceedings of Second Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Spokane: Washington State University, 1964: 185−205.

[20] Perllerin R F, Lavinder J A, Ross R J, et al. In-place detection of decay in timber bridges: an application of stress wave technology [R].New York: IEEE, 1996.

[21] 段新芳, 王平, 周冠武, 等. 应力波技术在古建筑木构件腐朽探测中的应用 [J]. 木材工业, 2007, 21(2): 10−12.
Duan X F, Wang P, Zhou G W, et al. Detection of decay and insect attacked ancient wood members with stress wave methods[J]. China Wood Industry, 2007, 21(2): 10−12.

[22] 陈勇平, 李华, 黎冬青, 等. 古建筑木材中应力波传播速度的影响因素 [J]. 木材工业, 2012, 26(2): 37−40.
Chen Y P, Li H, Li D Q, et al. Effects on stress wave speed inside wood members in historical buildings[J]. China Wood Industry, 2012, 26(2): 37−40.

[23] 廖春晖, 张厚江, 黎冬青, 等. 面向古建筑木构件内部缺陷勘测的应力波临界速度确定 [J]. 西北林学院学报, 2013, 28(4): 158−161.
Liao C H, Zhang H J, Li D Q, et al. Method to calculate the critical velocity of the stress wave in defects detection of ancient architecture wood parts[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(4): 158−161.

[24] 廖春晖, 张厚江, 王喜平, 等. 明十三陵裕陵修缮工程中的木构件无损检测 [J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(1): 132−137.
Liao C H, Zhang H J, Wang X P, et al. Nondestructive assessment of wood structural members at Yu Tomb of the Ming Dynasty, Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(1): 132−137.

[25] Kim C K, Oh J K, Lee H J, et al. Feasibility study on retrospective reconstruction method with X-ray radiographs to investigate inner state of wood[C]//Ross R J, Gonçalves R. Proceedings of 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Rio de Janeiro: Forest Products Society, 2015: 520−525.

[26] 中华人民共和国住房与城乡建设部. 古建筑木结构维护与加固技术标准: GB/T50165—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 Standards for Maintenance and Reinforcement of Wood Ancient Structures. GB/T50165−2020[S]. Beijing: China Architecture &Building Press, 2020.

[27] 北京市质量技术监督局. 古建筑结构安全性鉴定技术规范 (第 1 部分: 木结构): DB11/T 1190.1—2015[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2015.
Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. Technical code for appraiser of structural safety of ancient buildings (Part 1: timber structure): DB11/T 1190.1−2015[S]. Beijing: Beijing Bureau of Quality and Technical Supervision, 2015.

[28] 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.

[29] Wilcox W W. Changes in wood microstructure through progressive stages of decay [R]. Washington: USDA Forest Service Research, 1968.

[30] 杨忠, 江泽慧, 费本华. 木材初期腐朽研究综述 [J]. 林业科学, 2006, 42(3): 99−103.
Yang Z, Jiang Z H, Fei B H. Review of literature on incipient decay in wood[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(3): 99−103.

[31] Richard D B. Physical changes in decaying wood[J]. Journal of

Forestry, 1954, 52: 260−265.

[32] Mulholland J R. Changes in weight and strength of Sitka spruce associated with decay by a brown-rot fungus, *Poria monticola*[J]. Forest Products Journal, 1954, 4(6): 410−416.

[33] Kennedy R W. Strength retention in wood decayed to small weight losses[J]. Forest Products Journal, 1958, 8(10): 308−314.

[34] Mizumoto S. The effect of decay caused by *Gloeophyllum trabeum* on the strength properties of Japanese red pine sap-wood[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 1966, 48(1): 7−11.

[35] Toole E R. Reduction in crushing strength and weight associated with decay by rot fungi[J]. Wood Science, 1971, 3(3): 172−178.

[36] Wilcox W W. Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength[J]. Wood and Fiber, 1978, 9(4): 252−257.

[37] Senalik C A, Ross R J, Stokes C E, et al. Assessing biological deterioration in wood with acoustic-based techniques: a review [R]. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2022.

[38] 段新芳, 王平, 周冠武, 等. 应力波技术检测古建筑木构件残余弹性模量的初步研究 [J]. 西北林学院学报, 2007, 22(1): 112−114.
Duan X F, Wang P, Zhou G W, et al. Nondestructive evaluation of dynamic MOE of ancient wooden structure members by stress wave method[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(1): 112−114.

[39] Ceraldi C, Mormone V, Ermolli E R. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics[J]. Materials and Structures, 2001, 34(1): 59−64.

[40] 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.
Zhang H J, Zhu L, Sun Y L, et al. Determining main mechanical properties of ancient architectural timber[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(5): 126−129.

[41] 朱磊, 张厚江, 孙燕良, 等. 基于应力波和微钻阻力的古建筑木构件材料力学性能检测 [J]. 东北林业大学学报, 2011, 19(10): 81−83.
Zhu L, Zhang H J, Sun Y L, et al. Determination of mechanical properties of ancient architectural timber based on stress wave and micro-drilling resistance[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 19(10): 81−83.

[42] Cai Z, Hunt M, Ross R J, et al. Screw withdrawal—a means to evaluate densities of in-situ wood members[C]//Proceedings of 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Madison: Forest Products Society, 2002: 277–281.

[43] 辛振波. 自然老化对古建筑木材性质的影响研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2023.
Xing Z B. Effect of natural aging on wood properties of historic buildings [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2023.

[44] Kohara J. Studies of Japanese old timbers[J]. Journal of Scientific Reports of the Saikyo University Agriculture, 1955, 7: 9−20.

[45] 古建筑木结构维护与加固规范编制组. 古建筑木结构用材的树种调查及其主要材性的实测分析 [J]. 四川建筑科学研究, 1994(1): 11−14.
Specification Compilation Group of Historic Building Wood Structure Maintenance and Reinforcement. Investigation of species of historic wood structures and measured property analysis[J]. Sichuan Building Science, 1994(1): 11−14.

[46] Cai Z, Hunt M, Ross R, et al. Static and vibration moduli of elasticity of salvaged and new joists[J]. Forest Products Journal, 2000, 50(2): 35−40.

[47] Yokoyama M, Gril J, Matsuo M, et al. Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings[J]. Comptes Rendus Physique, 2009, 10(7): 601−11.

[48] Yoshihiko H, Mina S, Yasutoshi S. Strength properties of aged wood (Ⅲ): static and impact bending strength properties of aged Keyaki and Akamatsu woods[J]. Mokuzai Gakkaishi, 2005, 51(3): 146−152.

[49] Krajewski A, Kozakiewicz P, Witomski P. Comparison of selected properties of natural aged wood and contemporary timber of *Pinus sylvestris* L. investigated using standard methods and measuring of transition speed of ultrasounds along the fibre[J]. Wood Research, 2020, 65(3): 405−14.

[50] 陈国莹. 古建筑旧木材材质变化及影响建筑形变的研究 [J]. 古建园林技术, 2003(3): 49−52.
Chen G Y. Study on the change of old wood material and the influence of building deformation[J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens, 2003(3): 49−52.

[51] Machado J S, Pereira F, Quilho T. Assessment of old timber members: importance of wood species identification and direct tensile test information[J]. Construction and Building Materials, 2019, 207: 651−660.

[52] Attar-Hassan G. The Effect of ageing on the mechanical properties of eastern white pine[J]. Bulletin of the Association for Preservation Technology, 1976, 8(3): 64−73.

[53] Raposo P C, Martins J, Correia J A F O, et al. Characterization of the tensile mechanical behavior of wooden construction on materials from historic building [C]//2nd International Conference on Structural Integrity. Funchal: ICSI, 2017.

[54] Lourenco P, Feio B. Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: non-destructive correlations for test results in new and old wood[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21: 1617−1627.

[55] Kránitz K. Effect of natural aging on wood [D]. Zurich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2014.

[56] 高悦文. 古木材性退化人工模拟及其损伤本构模型的研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
Gao Y W. The degeneration on mechanical properties of aged wood and corresponding damage constitutive model [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.

[57] 米晓琛. 应县木塔损伤分析及材性微观劣化与保护研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
Mi X C. Damage analysis and study on micro deterioration and protection of material properties of yingxian wooden pagoda [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.

[58] Tomassetti M, Campanella L, Tomellini R. Thermogravimetric analysis of ancient and fresh woods[J]. Thermochimica Acta, 1990, 170: 51−65.

[59] Popescu M C, Sakata Y, Popescu C M, et al. Degradation of lime wood painting supports[J]. E-Preservation Science, 2005, 2(1−2): 649−658.

[60] Froidevaux J, Volkmer T, Ganne-Chedeville C, et al. Viscoelastic behavior of aged and non-aged spruce wood in the radial direction[J]. Wood Material Science and Engineering, 2012, 7(1): 1−12.

[61] 孙海燕, 苏明垒, 吕建雄, 等. 细胞壁微纤丝角和结晶区对木材物理力学性能影响研究进展 [J]. 西北农林科技大学学报, 2019, 47(5): 56−64.
Sun H Y, Su M L, Lü J X, et al. Research progress on effect of microfibril angle and crystalline area in cell wall on wood physical and mechanical properties[J]. Journal of Northwest A&F University, 2019, 47(5): 56−64.

[62] 徐有明. 木材学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
Xu Y M. Wood science [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006.

[63] 米晓琛, 李铁英. 古旧木材保存状况多参数检测研究进展 [J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31(5): 130−140.
Mi X C, Li T Y. Multi-parameter detection for characterizing the status of preservation of archaeological wood[J]. Science of Conservation and Archaeology, 2019, 31(5): 130−140.

[64] 李雄, 符小慧, 张文博, 等. 故宫长春宫木构件材质劣化研究 [J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31(1): 58−64.
Li X, Fu X H, Zhang W B, et al. Study of the degradation of wood structural components of the Changchun Palace[J]. Science of Conservation and Archaeology, 2019, 31(1): 58−64.

[65] Tsuchikawa S, Yonenobu H, Siesler H W. Near-infrared spectroscopic observation of the ageing process in archaeological wood using a deuterium exchange method[J]. Analyst, 2005, 130(3): 379−384.

[66] Miklečić J, Jirouš-Rajković V, Antonović A, et al. Discolouration of thermally modified wood during simulated indoor sunlight exposere[J]. Bioresources, 2011, 6(1): 434−446.

[67] Ganne-Chedeville C, Jaeaeskelaeinen A, Froidevaux J, et al. Natural and artificial ageing of spruce wood as observed by FTIR-ATR and UVRR spectroscopy[J]. Holzforschung, 2012, 66(2): 163−170.

[68] Rodrigues B P, Senalik C A, Wu X, et al. Use of ground penetrating radar in the evaluation of wood structures: a review[J]. Forests, 2021, 12: 492.

[69] 柳苏洋, 辛振波, 张厚江, 等. 基于红外热成像的古建筑望板腐朽状况无损检测研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(7): 139−152.
Liu S Y, Xin Z B, Zhang H J, et al. Nondestructive testing of the decay condition of ancient building roof boarding based on infrared thermal imaging[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(7): 139−152.

[70] 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.

[71] Senalik C A, Wacker J P, Wang X P. Evaluating the efficacy of ground-penetrating radar as an inspection tool for timber bridges [C/OL]//Proceedings of 4th International Conference on Timber Bridges, Biel/Bienne, Switzerland, 2022. https://doi.org/10.24451/6j5j-qw13.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　李文彬）