

# 宁波保国寺大殿宋柱现状监测的无损与微损检测技术研究

Non-destructive and Micro-destructive Testing Technology for Status Monitoring of Song Dynasty Wooden Columns in the Main Hall of Baoguo Temple, Ningbo

陈琳 Chen Lin  
符映红 Fu Yinghong  
居发玲 Ju Faling  
戴仕炳 Dai Shibing

**摘要:** 对木质建筑遗产本体进行有效监测,是确定保养维护乃至修缮的方案的前提。在对无损与微损检测技术进行可行性比较之后,检测人员选择超声波、木材阻抗、微波等检测方法,对宁波保国寺大殿宋柱进行现场勘察测量,一方面检测现有木柱的健康状况,另一方面研究这些无损、微损技术的可靠性,为未来持续监测提供基础。检测及后续研究通过超声波波速对比以及对木柱内部腐朽空洞截面图的分析,弥补了传统检测方法仅能定性判断的不足,实现对木柱内部半定量化的评估,检测结果作为此次保国寺大殿宋柱的监测记录,为未来预防性保护提供依据。水分是影响木柱出现腐朽空洞的主要因素,检测团队采用微波检测技术,测量木柱不同深度的含水率,找出木柱的水分来源,为下一步采取有效措施预防木柱含水率过高提供数据支持。最后,文章对此次所应用的无损与微损检测技术的特点进行了讨论及可靠性分析,为今后的木质建筑遗产监测工作提供参考。

**关键词:** 宁波保国寺大殿;无损检测;微损检测;微波检测;超声波检测;木材阻抗检测

**Abstract:** Effective monitoring of wooden architectures is necessary for maintenance and repair planning. Microwave detection, ultrasonic detection and impedance testing, which are nondestructive testing (NDT) and micro-destructive testing (MDT) technologies, are used for on-site surveying and inspection of the Song Dynasty wooden columns in the main hall of Baoguo Temple to compare their feasibilities. On the one hand, the health of the remaining wooden columns is tested. On the other hand, the reliability of these NDT and MDT technologies is studied to provide a basis for future continuous monitoring. Internal semi-quantitative evaluation of wooden columns is performed by analysing the ultrasonic wave velocity and cross-sections of the internal decay inside the columns, which compensates for the failure of traditional qualitative technologies to reach required precisions. Additionally, the test

results are used as monitoring records and form a basis for preventive conservation of the Song Dynasty wooden columns in the main hall of Baoguo Temple. Moisture is the main cause of the decay of the wooden columns. Microwave technology can be used to locate the moisture source in the columns by testing the water content at different depths. This provides data to aid in taking effective measures to avoid excessive moisture in the wood. Finally, the characteristics of the NDT and MDT monitoring technologies are introduced to provide a reference for future monitoring of wooden heritage sites.

**Keywords:** main hall of Baoguo Temple; non-destructive testing; micro-destructive testing; microwave detection; ultrasonic detection; resistograph testing

中图分类号: TU317; TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-7289(2018)02-0078-08

DOI: 10.19673/j.cnki.ha.2018.02.010

## 1 引言

宁波保国寺是第一批全国重点文物保护单位,现存大殿为北宋祥符六年(1013)重建,距今已有一千余年的历史(图1)。大殿的木结构因其生物质材料的特点,一般建成数十年后部分构件就会出现腐朽、虫蛀的现象。对于历经千年沧桑的保国寺大殿,为了消除隐患,延长建筑寿命,需要对其“实行连续监测,记录、整理、分析监测数据,作为采取进一步保护措施的依据”,“监测包括人员的定期巡视、观察和仪器记录等多种方式”,监测检查记录包括“对可能发生变形、开裂、位移和损坏部位的仪器监测记录和日常观察记录”。<sup>[1]</sup>“日常维护和监测

数据都应作为建筑历史资料的一部分妥善保存。”<sup>[2]</sup>木结构的无损与微损检测技术因其记录准确、科学,且不改变或仅最小程度改变文物本体原状的优点,成为日常监测保国寺大殿木构性能和安全性理想手段。

国际上,对木结构的监测可追溯到20世纪80年代后期的美国,初期主要用于评估桥梁的结构安全。过去的十年里,在欧洲的一些木结构发生坍塌之后,越来越多的人开始关注对木结构(包括新建木结构)的监测。在2006年德国巴特赖兴哈尔(Bad Reichenhall)的溜冰场倒塌之后,对木结构的结构监测工作受到了更多的重视<sup>[3]</sup>。阿尔贝托·卡瓦利(Alberto Cavalli)、马尔科·托尼(Marco Togni)<sup>[4]</sup>认为通过仔细定期的监测体系,可以避免出现木结构由于各种原因发生的坍塌<sup>[5]</sup>。扬尼斯·齐西斯(Ioannis Zisis)对北美低层木结构住宅进行了全面监测,包括对天气、压力、负荷的监测,研究了风载荷对木构结构性能的影响<sup>[6]</sup>。藤井义久(Y. Fujii)、藤原裕子(Y. Fujiwara)、木川理花(R. Kigawa)等采用非破坏性的方法,包括声发射(AE)监测、代谢气体监测、微米和毫米级电磁波监测等,对日本传统木构的材料生物降解以及结构的物理和力学性能进行监测<sup>[7]</sup>。为监测新建筑而采用的一些方法,可以扩展到历史建筑的木结构中<sup>[4]</sup>。通过监测环境湿度来估算木构的含水率,监测环境温度和木质材料含水率来预测真菌的活性,从而对木材的腐朽过程进行监测<sup>[8,9]</sup>。利用小型传感器,可以监测或干扰生物(如白蚁)的活动<sup>[4]</sup>。目前,为了监测木材的腐朽过程,有研究团队开发了一些预测木材降



图1 宁波保国寺大殿（图片来源：汤众摄影）

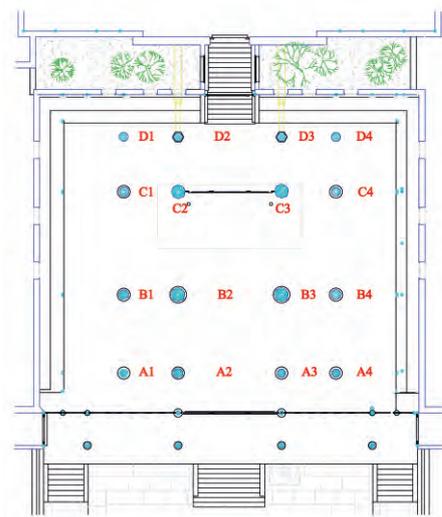


图2

图2 保国寺大殿宋柱分布及编号（图片来源：宁波市保国寺古建筑博物馆）

解速度的模型，但尚限于短时间的测试，且仅适用于小尺寸的标本<sup>[8,10]</sup>。直到今天，对历史建筑木结构的监测标准仍然较低，只需做到记录温度与湿度的变化和重复现场检查，甚或二者仅取其一。通过定期进行无损与微损检测的方法来评估历史建筑木结构状态、材质情况和新的劣化程度，是现在用于木结构历史建筑材质监测的探索性方法。

国内对中国第一木塔——山西应县木塔的监测工作开始于20世纪70年代。1975—2004年，太原理工大学、北京建筑工程学院、太原市测绘研究院先后对应县木塔进行了变形等方面的结构监测<sup>[11]</sup>。2000年，中国文化遗产研究院与中国林业科学院木材工业研究所完成对应县木塔的材质分析工作。2007年，中国文化遗产研究院负责组织研究并完成应县木塔监测系统方案设计，包括变形连续监测、结构动力特性监测、地震与地面脉动监测，以及环境监测等内容<sup>[12]</sup>。2007年，宁波保国寺古建筑博物馆与同济大学建筑与城市规划学院合作，开始构建保国寺大殿（图1）文物建筑的保护监测系统，主要采用物联网技术实现对环境和结构的监测<sup>[13,14]</sup>。2003—2008年，中国林业科学研究院先后两次对保国寺大殿材质情况进行勘察分析。2010—2011年，东南大学对保国寺大殿进行了详细测绘以及材质分析工作<sup>[15]</sup>。

目前，国内外对历史建筑木结构的监测，大多是聚焦在对环境以及结构方面的监

测。而对木构建筑本体的监测，因不同于前两者可以借助于物联网技术采集到实时数据，而需要定期应用无损、微损检测方法采集数据来评估木结构的材质现状，加之此类检测方法在国内使用并不广泛，而国外对木构本体材质的监测主要针对新建筑，所以采用无损与微损检测方法对历史建筑木结构本体材质监测的研究并不多见。

在保国寺大殿中，木柱是其最重要的竖向受力构件，而大殿内部有16根柱子属于宋柱<sup>①</sup>（图2）。其中7根木柱由较小木料镶拼而成，截面呈八瓣瓜棱状，是现存最早的木构瓜棱柱实例。这种独特的柱身形式是保国寺大殿的重要特征所在，也为监测工作带来了新的特点和难度。

保国寺大殿木柱的现状监测应用了微波检测技术，对引起木材材质腐朽、虫蛀的重要影响因素——水分传输路径进行分析，以了解木柱内部含水率的来源。同时，还采用了超声波、木材阻抗检测技术，对木柱内部材质腐朽、空洞程度进行检测分析。此次保国寺大殿宋代木柱的仪器监测记录，为采取进一步保护措施提供了依据。

## 2 宁波保国寺大殿宋柱无损与微损检测技术选择

木结构的无损与微损检测技术有含水率无损检测技术、微波检测技术、超声波检测技术、木材阻抗检测技术、皮螺钉（Pilodyn）检测技术、声应力波检测技术

和电子锤应力波检测技术等。另外还有以及其他木结构无损、微损检测技术。各种检测技术的原理、检测内容及优缺点如表1所示。

所有的检测方法各有优缺点。为了实现对保国寺大殿宋代木柱的有效监测，对其进行更好的跟踪与维护，检测人员以检测技术的可靠性、稳定性、便捷性、数据易解和费用低等为原则，选择微波检测技术、超声波检测技术、木材阻抗检测技术三种无损或微损检测技术对宋柱进行测试。

### 2.1 宁波保国寺大殿宋柱微波检测技术

微波穿过物体后强度会减弱，发生功率的衰减和幅值、相位及频率等相关参数的变化，通过检测这些变化的数据可间接测得物料的含水率<sup>[17]</sup>。微波检测速度快、精度高、测量范围大，且受外界环境影响小<sup>[18]</sup>，可以用其检测木柱内部水分来源。

宁波保国寺大殿16根宋柱中有7根为拼合柱的构造形式，包括外围八块木料用销子连接，围绕中心木柱形成的八瓣包镶柱（图3a），以及四根木柱合在一起，外加四块木料，形成外围八道瓜棱的四木合柱（图3b）。

由于拼合柱独特的构造特点，柱身内部必然存在缝隙与空洞。柱内木材与空气会因此构成微小环境，其含水率必然与整木柱有区别。这里的含水率更准确地说可以称为“木材湿度”，即木材与空气共同形

① 文中“宋柱”区别于清代添加的外围木柱，指的是基本体现保国寺大殿北宋初建时建筑形制的柱子，不排除其中有部分木柱为后世按原形制更替的可能性。

表 1 木结构无损与微损检测技术

名称		原理	检测内容	优缺点
摄影法		利用照相机、摄像机等设备对木构肉眼可观察部位的病害进行影像记录	木材宏观病害	优点: 仪器体积小、便于携带、操作简单 缺点: 仅限于对肉眼可见病害的记录
敲击法		利用小型敲击锤对木柱进行敲击, 通过辨别敲击发出的声音判断木柱内部腐朽空洞情况	木柱内部腐朽、空洞	优点: 仪器体积小, 便于携带; 检测快速、操作简单 缺点: 仅限于定性分析
含水率无损检测技术		根据直流电、高频电流、介电常数、红外线等原理, 对木材内部的水分进行快速检测的技术 <sup>[16]</sup>	木材含水率	优点: 仪器体积小、便于携带; 检测快速、操作简单 缺点: 数据波动性较大, 存在误差
微波检测技术		微波穿过物体后强度会减弱, 发生功率的衰减和幅值、相位及频率等相关参数的变化, 通过检测这些变化的数据可间接测得物料的含水率 <sup>[17]</sup>	木材含水量	优点: 检测快速、精度高、测量范围大、受外界环境影响小 <sup>[18]</sup> 缺点: 仪器价格较贵
超声波检测技术		根据超声波波速在木材中的变化来检测木材病害 <sup>[19]</sup>	木材内部腐朽、空洞、开裂	优点: 仪器体积小、便于携带; 指向性好; 检测快速、影响因素少 缺点: 定位和定量方面的可靠性和灵敏度不高; 超声波穿透空气能力差, 存在耦合方面技术难题 <sup>[20]</sup>
木材阻抗检测技术		根据探钻针进针过程中所遇阻力的曲线, 具体判断被测木材内部的材质状况 <sup>[21]</sup>	木材内部腐朽、空洞	优点: 精度高、测量范围大 <sup>[22]</sup> ; 操作简单 缺点: 仪器较重、价格较贵
皮罗钉检测技术		以固定大小的力, 将一个钢钉射入木材, 以钉子射入的深度表示检测的结果 <sup>[23]</sup>	木材外部腐朽	优点: 检测快速、操作简单 <sup>[24]</sup> 缺点: 仅限于木材表面特性检测 <sup>[25]</sup>
应力波无损检测技术	声应力波检测技术	通过测量木材断面不同方向应力波的传播速度, 再通过矩阵变换重构后, 可以用二维或三维图像的方式, 表示木材内部的情况 <sup>[26]</sup>	腐朽、空洞	优点: 不破坏材料原有特性; 检测快速、操作简单; 便于携带 缺点: 对小缺陷的检测灵敏度低, 影响因素较多 <sup>[26,27]</sup> ; 仪器较贵
	电子锤应力波检测技术	通过测量应力波传播速度确定木材的弹性模量, 从而求出木质材料的力学强度 <sup>[28]</sup> 。	力学强度	优点: 检测快速; 仪器体积小, 便于携带 缺点: 交叉连接点对波的阻滞使结果产生偏差 <sup>[28]</sup>
其他木结构无损、微损检测技术		① $\gamma$ 射线: 利用 $\gamma$ 射线探测防腐剂分布, 定量探测木材腐朽程度 <sup>[29]</sup>	木材内部腐朽及防腐剂痕量元素在木材中的分布	优点: 结果可以量化 缺点: 放射性对身体有害
		② X-射线: 利用 X 射线检测木材微密度、木材节疤、木材腐朽 <sup>[29]</sup>	木材内部腐朽、节疤检测微密度测定	优点: 检测范围大 缺点: 放射性对身体有害; 此检测方法适用于实验室及生产线, 不适用于现场检测

成的微小环境的湿度。检测人员采用德国 MOIST 210 手持式微波检测仪对大殿宋代木柱 3 cm、7 cm、11 cm 三个不同深度部位的湿度进行检测。

### 2.2 宁波保国寺大殿宋柱超声波检测技术

超声波检测技术的原理是根据超声波波速在木材中的变化来检测木材病害<sup>[5]</sup>。超声波检测仪器体积小, 便于携带, 对木构内部腐朽空洞检测速度快, 适合进行现场勘察测试。检测人员采用瑞士 Proceq 超声波测试仪分别对木柱 B4、C1、C4、

D1、D2、D3、D4 距离柱础高度 40 cm, 80 cm, 120 cm, 160 cm、200 cm 的部位进行检测。本次检测采用 24 kHz 频率传感器直接测量法(图 4), 在木柱表面与传感器之间涂抹耦合剂以便贴合紧密(在检测之后需尽快清除木柱上残留的耦合剂, 以免对柱面造成损害)。每个测量点检测两次并记录波速, 最后选取平均值作为该位置的波速。

### 2.3 宁波保国寺大殿宋柱木材阻抗检测技术

木材阻抗仪根据钻针进针过程中所遇

阻力的曲线, 可以具体判断被测木材内部的材质状况<sup>[7]</sup>, 检测结果准确、可靠, 检测范围宽<sup>[8]</sup>。检测人员采用德国微钻阻力仪 (IML-RESI PD600) 对病害等级最严重的 III 级木柱<sup>①</sup>进行内部腐朽空洞的重点测试, 具体测试柱号及测试高度见表 2。

对于直径小于 60 cm 的木柱, 采用穿透式检测方法, 由于拼合柱内部在圆周方向

① 对每根柱子逐瓣进行检测, 木柱内部空洞的瓣数  $\leq 25\%$  瓣数的定为 I 级, 木柱内部空洞的瓣数  $\leq 50\%$  瓣数的定为 II 级, 木柱内部空洞的瓣数  $> 50\%$  瓣数的定为 III 级

均匀分布缝隙，所以检测时须确保每个瓜棱都至少被检测一次（图 5a）；对于直径大于仪器检测范围（60 cm）的木柱，采用两侧对穿的方式进行测试，尽量保证相对的两个检测方向在同一条直线上（图 5b）。

现场检测后，采用 PD-Tools Pro. 软件对测试结果进行阻抗曲线整理，结果如图 6。结合木材密度、年轮等相关木材学知识，对阻抗曲线进行分析，将阻抗曲线合成在木柱横断面上，并用 AutoCAD 软件绘制各测试高度不同程度的腐朽空洞截面图（图 7）。图中蓝色部分代表空洞，红色部分代表严重腐朽，黄色部分代表轻微腐朽，最后得出八瓣包镶柱、四木合柱、整木柱三类木柱的内部腐朽空洞的检测结果。

### 3 宁波保国寺大殿宋柱无损与微损检测结果

#### 3.1 微波检测结果

从图 8 我们可以看出，对于任何一根木柱，都存在以下规律：同一高度，测试深度为 3 cm 的湿度最大，7 cm 次之，11 cm 最小。对于木柱而言，水分传递路径主要分为三个：从空气中吸收水分；自上而下进入木柱的水分，主要包括屋面漏雨或生物（如蝙蝠）排泄物中的水分；石柱础的冷凝水沿着柱底木纤维传递到木材内部（图 9）。如果是从后两种路径传递的水分，木柱同一高度部位不同深度的湿度差别不会十分明显。由此判断，保国寺大殿宋柱的水分传递路径主要是第一种，即从周围环境吸收水分向木柱内部传递。

#### 3.2 超声波检测结果

从表 3 中可以看出，木柱 D3 和 D4 的波速较大，明显区别于其他受检木柱。一般来说，波速较高的材料内部相对密实，

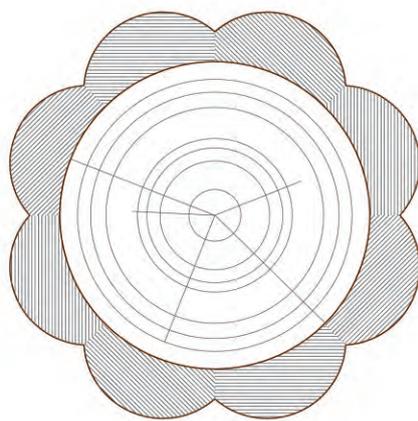


图 3a

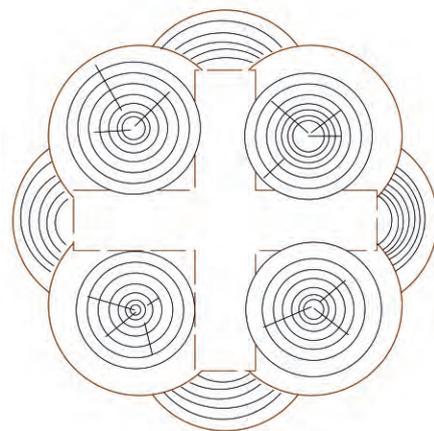


图 3b

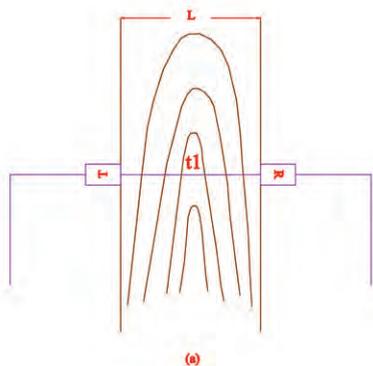


图 4a

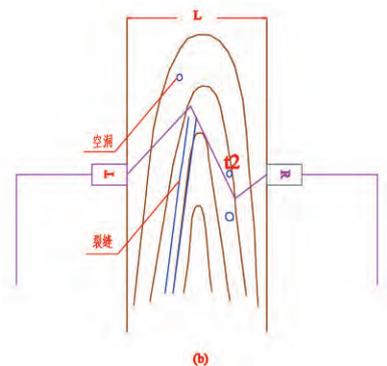


图 4b

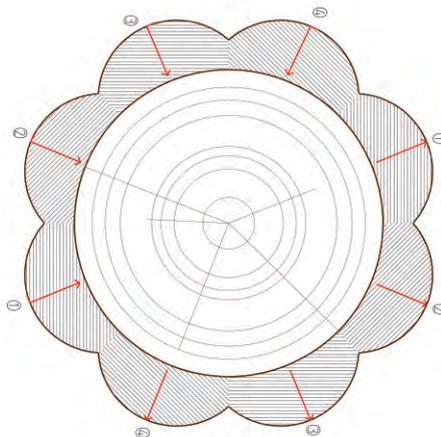


图 5a

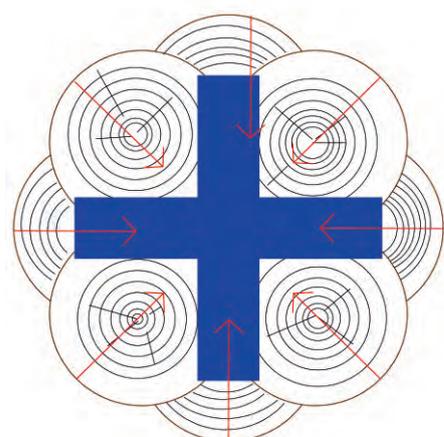


图 5b

图 3 木柱构造示意图（图片来源：陈琳绘制）

3a. 八瓣包镶柱构造示意图

3b. 四木合柱构造示意图

图 4 超声波检测木材方法示意图（图片来源：同图 3）

4a. 健康木材超声波传播路径

4b. 表示空洞和裂隙的木材超声波传播路径

图 5 木材阻抗检测方法（图片来源：同图 3）

5a. 穿透式检测方法

5b. 对穿式检测方法

表 2 木柱腐朽空洞检测表

木柱编号	木柱类型	柱径	测试高度（距离柱础高度）	检测方法
A1	八瓣包镶柱	50 cm	50 cm、80 cm	穿透式
A2	八瓣包镶柱	50 cm	50 cm、80 cm	穿透式
B1	八瓣包镶柱	50 cm	20 cm、50 cm	穿透式
B2	四木合柱	70 cm	20 cm、50 cm、80 cm	对穿式
B3	四木合柱	70 cm	50 cm、80 cm	对穿式
C2	四木合柱	70 cm	20 cm、50 cm、80 cm	对穿式
C3	四木合柱	70 cm	20 cm、50 cm、80 cm	对穿式
C4	整木柱	50 cm	20 cm、50 cm、80 cm	穿透式

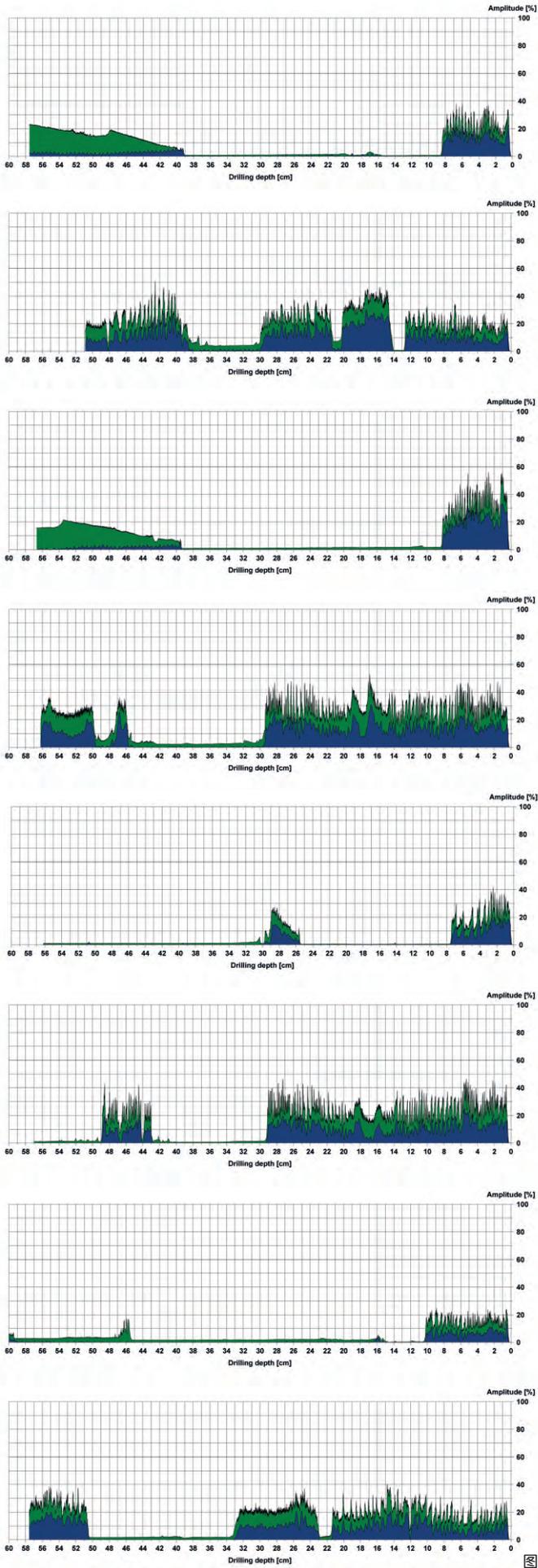


图 6

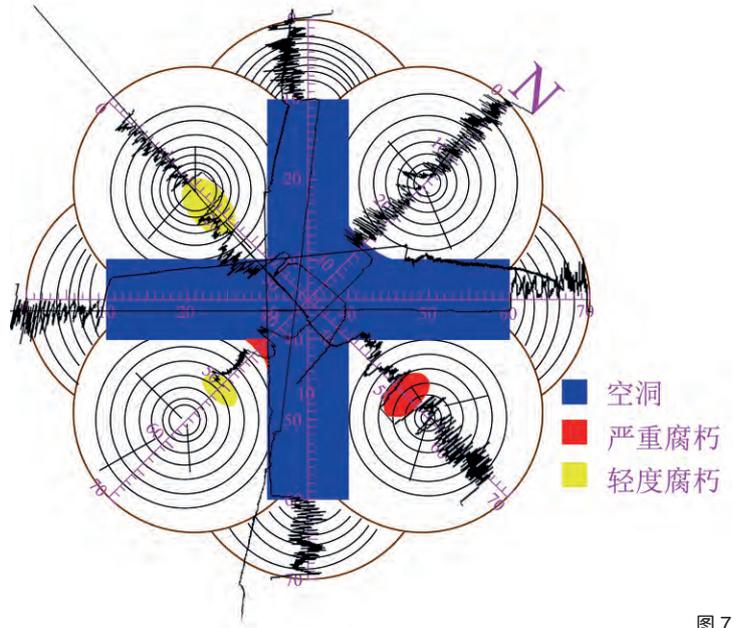


图 7

八瓣包镶柱（无损微波测试法）湿度情况测试对照图

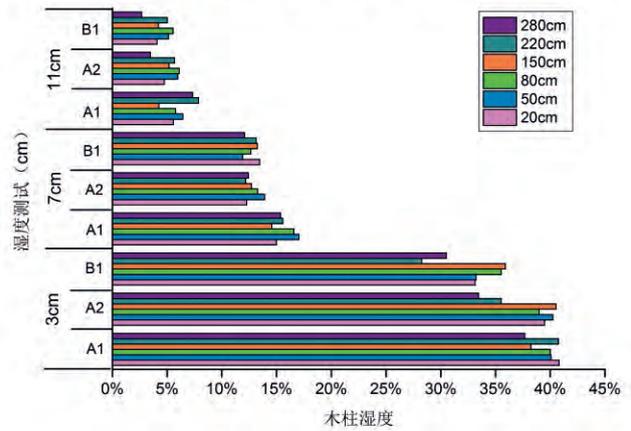


图 8a

四木合柱（无损微波测试法）湿度情况测试对照图

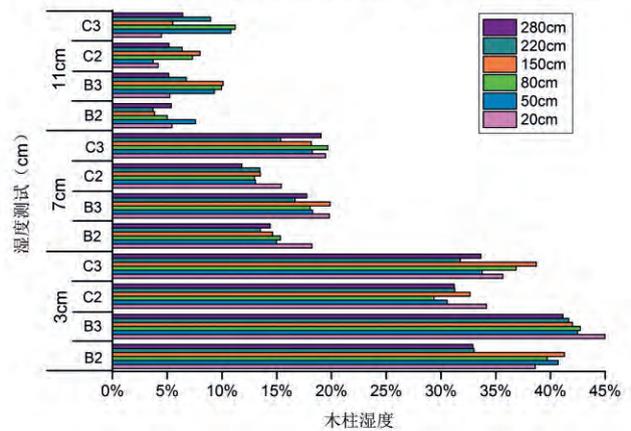


图 8b

图 6 阻抗曲线整理（图片来源：陈琳绘制）

图 7 B3 距离柱础 50cm 高度腐朽空洞截面图（图片来源：同图 6）

图 8 微波检测结果（图片来源：同图 6）

8a. 八瓣包镶柱微波检测图

8b. 四木合柱微波检测图

表 3 木柱现场超声波波速检测结果 (m/s)

		编号						
		B4	C1	C4	D1	D2	D3	D4
高度	40 cm	1 102	1 064	642	449	712	1 650	1 664
	80 cm	1 094	789	577	435	607	1 667	1 659
	120 cm	806	855	570	439	917	1 672	1 681
	160 cm	904	1 027	383	496	576	1 686	1 699
	200 cm	1 554	638	422	702	913	1 724	1 792

图 9 木柱水分传递路径示意图 (图片来源: 陈琳绘制)

图 10 木柱腐朽空洞截面图 (图片来源: 同图 10)

图中 a 表示柱 A1 距离柱础 50 cm、80 cm 高度木腐朽空洞示意图; b 表示柱 A2 距离柱础 50 cm、80 cm 高度木腐朽空洞示意图; c 表示柱 B1 距离柱础 20 cm、50 cm 高度木腐朽空洞示意图; d 表示柱 B2 距离柱础 20 cm、50 cm、80 cm 高度木腐朽空洞示意图; e 表示柱 B3 距离柱础 50 cm、80 cm 高度木腐朽空洞示意图; f 表示柱 C2 距离柱础 20 cm、50 cm、80 cm 高度木腐朽空洞示意图; g 表示柱 C3 距离柱础 20 cm、50 cm、80 cm 高度木腐朽空洞示意图; h 表示柱 C4 距离柱础 20 cm、50 cm、80 cm 高度木腐朽空洞示意图



强度相对较高。现有资料显示 D4 为更换过的新木柱, 根据不同高度的波速情况来看, 木柱 D3 的波速与 D4 十分接近, 均在 1 600—1 800 m/s 之间, 所以可以推测 D3 也是更换过的新木柱。由于波在空气中的传播速度为 340 m/s, 低于在木材中的传播速度, 所以超声波在穿过带有空隙的木材时波速会明显降低。据此可初步判定, 波速相对新木柱较小的其余受检木柱年代久远且内部拼接已出现开裂。

### 3.3 木材阻抗检测结果

检测结果显示, 木柱 A1 所检测部位腐朽严重, 木柱 C2、C3 所检测部位腐朽程度一般, 木柱 B1、B3 所检测部位腐朽程度轻微, 木柱 A2 所检测部位腐朽空洞程度良好, 木柱 B2 所检测部位随着木柱高度增加腐朽空洞程度由严重、轻微向良好过渡。而木柱 C4 由于内部存在 20 世纪 70 年代加固使用的环氧树脂, 腐朽空洞情况不详 (图 10)。

根据《古建筑木结构维护与加固技术规范 GB 50165-92》<sup>[30]</sup>6.9.1 条规定, 木材内部因虫蛀或腐朽形成中空时, 若表面层完好厚度不小于 50 mm, 可采用不饱和聚酯树脂进行灌注加固。鉴于环氧树脂易老化的缺点, 我们可以尽量避免单纯采用其进行加固, 而是先用相同或相近树种的木材进行填充后, 再在缝隙中浇灌环氧树脂进行粘附和加固。

### 4 结论与可靠性分析

木结构无损与微损检测是对木结构建筑本体材质现状进行勘察测量的技术手段, 借助其对既存病害进行评估分析, 可为建筑本体现状监测及决定是否进行干预提供有效依据。检测团队基于检测技术的可靠性、稳定性、便捷性、数据易解读、费用低等原则, 选择了木结构无损与微损检测技术中的微波、超声波、木材阻抗等检测方法, 对宁波保国寺大殿宋柱进行了现场勘查记

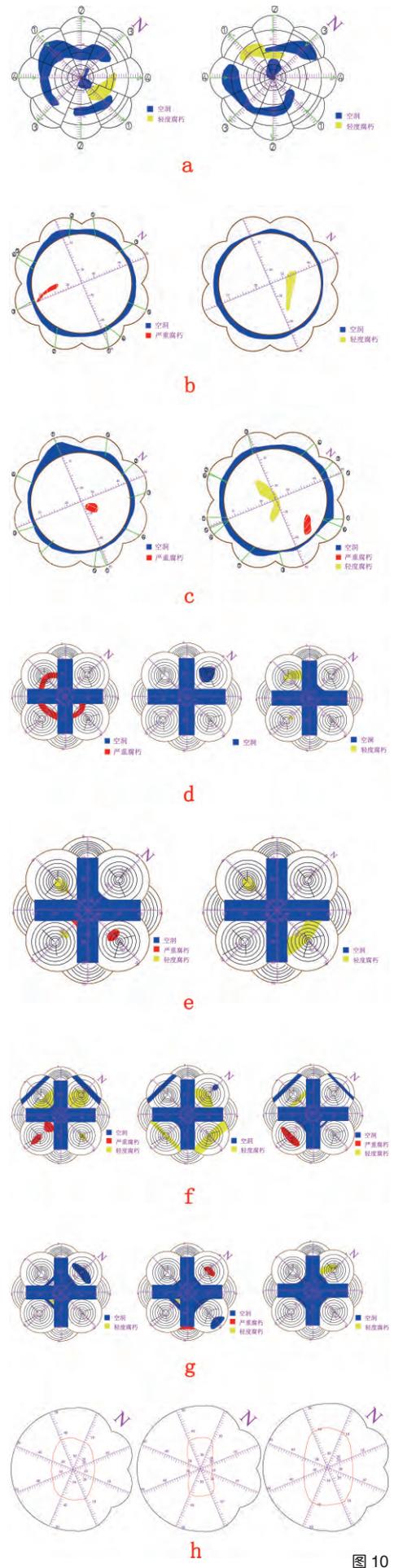


图 10

录,有效评估了木柱内部腐朽及虫蛀情况,并对木柱水分传递途径进行了分析。有关成果已经有部分阐述并公开发表,主要内容是对宋柱保存现状进行的初步研究<sup>[31]</sup>。本文则侧重于对所采用的三种无损或微损技术的可靠性进行研究,分析结论如下:

(1)微波检测是一种完全无损检测技术,在完全不损伤木材的前提下,可以测试木柱内部不同深度的含水率,从而可以分析出木柱的水分传输路径,为下一步采取有效措施预防木柱含水率过高提供数据支持。由于保国寺大殿木柱多为瓜棱柱,每瓣瓜棱弧度较大,而微波检测仪探头接触端为平直面,直径为5.5 cm,与柱面无法完全贴合,因此,经检测得到的含水率存在误差,不能采纳为含水率的绝对数值。但可采用对木柱不同深度检测结果进行分组对比来分析木柱的水分来源路径。

(2)超声波同样是一种完全无损检测技术,也可以在完全不损伤木材的前提下初步确定木构内部情况,为下一步进行精细检测提供参考。特别是超声波检测具有检测快速、仪器轻便、适合现场检测的优点,但对处于开放式或半开放式环境的木构建筑进行测试时,需要考虑到木材含水率、不同材种等因素对超声波波速的影响。在测试时要控制变量,力求检测结果有较高准确度。超声波检测过程需要借助耦合剂这种中介媒质,排除探头和被测物体之间的空气,减小探头与接触面之间的声阻抗差,提高检测结果的准确度,但同时要考虑耦合剂作为一种水溶性高分子材料检测后残留在木柱表面,对其涂层的颜色统一性可能造成的影响。

(3)木材阻抗检测技术可以精细确定木构内部腐朽空洞情况,弥补传统检测只能靠人工经验定性分析的不足,可以做到对木构内部腐朽空洞情况半定量化的科学评估。但木材阻抗仪费用较高、仪器较重,检测结果需要具有木材知识的专业人员进行分析。对于保国寺瓜棱柱,因其柱径较大,需采用对穿式的检测方法进行检测,对穿打入的方向需要多次校准,力求检测在同一条直线上。木材阻抗检测为微损检测方法,检测时需要钻直径为3 mm的孔,从保护建筑本体的角度,不宜多次重复实施。

综上所述,本项现状监测针对保国寺大

殿宋柱处于半开放空间、柱径较大、木柱构造较为特殊等特点,综合运用上述三种检测方法,实践结果证明是适用的。三种方法各有其优势和难点,所得数据有一定的可靠性和分析价值,可作为保国寺大殿宋柱维护和监测的历史资料。本项监测的操作方法与经验可供其他木结构建筑遗产监测工作参考。

(本项目得到了上海同济大学建筑与城市规划学院历史建筑保护实验中心(高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室的一部分)、宁波市保国寺古建筑博物馆、上海保文建筑咨询有限公司的支持,在此表示感谢。)

### 参考文献

- [1] 国际古迹遗址理事会中国国家委员会. 中国文物古迹保护准则(2015年修订)[S]. 北京: 文物出版社, 2015.
- [2] ICOMOS. Principles for the Conservation of Wooden Built Heritage[S]. Poland, 2017.
- [3] TANNERT T, DIETSCH P, CESTARI CB, KASAL B. Cost Action Fp1101 "Assessment, Reinforcement and Monitoring Of Timber Structures" [C]// QUENNEVILLE P. World Conference on Timber Engineering 2012. New York: Curran Associates, 2012: 515-519.
- [4] CAVALLI A, TOGNI M. Monitoring of Historical Timber Structures: State of the Art and Prospective[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(2): 107-113.
- [5] FRÜHWALD E, SERRANO E, TORATTI T, et al. Design of Safe Timber Structures - How Can We Learn from Structural Failures in Concrete, Steel and Timber?[C]//Engineered Wood Products Association. 10th World Conference on Timber Engineering 2008. New York: Curran Associates, 2008: 1962-1969.
- [6] ZISIS I. Structural Monitoring and Wind[D]. Canada: Concordia University, 2006.
- [7] FUJII Y, FUJIWARA Y, KIGAWA R, SUDA T, SUZUKI Y. Characteristics and Diagnosing Technology of Biodegradation in Wooden Historical Buildings: A Case Study on Amida-do in Higashi Hongan-ji Temple in Kyoto[C]// World Conference on Timber Engineering 2010, New York: Curran Associates, 2010.
- [8] BRISCHKE C, HANSSON E F. Modeling biodegradation of timber—Dose-response models for above-ground decay and its climate-dependent variability[C]// International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures. 2011.

- [9] LEICESTER R H. Engineered Durability for Timber Construction[J]. Progress in Structural Engineering & Materials, 2001, 3(3): 216-227.
- [10] [MONTARULI N E, G VAN DE KUILEN J W, WEERSINK R G J, MEERSTADT T. Service Life Analysis of Marine Structures Made of Tropical Hardwoods[C]// Engineered Wood Products Association. 10th World Conference on Timber Engineering. New York: Curran Associates, 2008: 258-265.
- [11] 王林安, 侯卫东, 永昕群. 应县木塔结构监测与试验分析研究概述[J]. 中国文物科学研究, 2012(3): 62-67.
- [12] 中国文物研究所. 应县木塔监测系统建设[R]. 北京: 中国文物研究所, 2007: 3-18.
- [13] 汤众. 保国寺宋代大殿监测系统建设及使用[C]//浙江省文物考古研究所, 2013年保国寺大殿建成1000周年系列学术研讨会论文集. 北京: 科学出版社, 2013: 579-586.
- [14] 汤众. 浅析物联网与古建筑的预保护——以保国寺文物保护中的应用为例[C]//浙江省文物考古研究所, 宁波市保国寺古建筑博物馆. 2013年保国寺大殿建成1000周年系列学术研讨会论文集. 宁波: 科学出版社, 2013: 593-601.
- [15] 张十庆. 宁波保国寺大殿—勘察分析与基础研究[M]. 南京: 东南大学出版社, 2012: 46-55.
- [16] 段新芳, 李玉栋, 王平. 无损检测技术在木材保护中的应用[J]. 木材工业, 2002(5): 14-16.
- [17] 李薇, 吴文福, 李喜武, 等. 微波技术在物料水分检测中的应用现状及发展趋势[J]. 农业机械, 2011(32): 142-144.
- [18] 李光煜. 物料含水量微波检测系统关键技术研究[D]. 博士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [19] 李坚. 木材科学新篇[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1991.
- [20] 于子绚. 应力波检测古建旧木缺陷技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [21] 李华, 刘秀英, 陈允适, 等. 古建筑木结构的无损检测新技术[J]. 木材工业, 2009(2): 37-38+42.
- [22] 李华, 石志敏, 张晓芳, 等. 无损检测技术在故宫古建筑木结构材质勘查中的应用[C]//郑欣淼, 晋宏逵. 中国紫禁城论文学会集(第六辑下). 北京: 紫禁城出版社, 2011: 613.
- [23] 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(10): 114-118.
- [24] 尚大军. 无损检测评价技术在古建筑木构件维修中的应用研究[D]. 硕士学位论文. 西安: 西北农林科技大学, 2008.
- [25] 张涛, 黎冬青, 韩扬, 陈勇平. 无(微)损检测技术在木结构古建筑中的应用及发展[J]. 林业机械与木工设备, 2011(8): 10-12+16.
- [26] 孙晔. 应力波在木材内部传播的影响因素研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [27] 安源, 殷亚方, 姜笑梅, 等. 应力波和阻抗仪技术勘查木结构立柱腐朽分布[J]. 建筑材料学报, 2008(4): 457-463.
- [28] 于子绚, 王骞, 李华, 等. 我国古建筑木结构材质勘查技术现状与进展[J]. 木材加工机械, 2007(2): 45-47.
- [29] 宋绍代, 于江. 木材无损检测技术探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2012(7).
- [30] 四川省建筑科学研究院. 古建筑木结构维护与加固技术规范 GB 50165-92[S]. 北京: 中国标准出

版社, 1992.

[31] 符映红. 保国寺大殿宋柱保存现状初步研究[M]// 保国寺古建筑博物馆. 东方建筑遗产(2015年卷). 北京: 文物出版社, 2015: 45-51.

## Synopsis

As a famous wooden architectural heritage site in China with significant cultural, craft and scientific value, Baoguo Temple is among the structures in the World Cultural Heritage preparatory list for the Maritime Silk Road. Baoguo Temple was listed by the State Council of the People's Republic of China in the first batch of Major Historical and Cultural Sites Protected at the National Level in March 1961. The main hall forms an important part of Baoguo Temple and was built in 1013 (during the Northern Song Dynasty). Because of the biomass characteristics of the materials used, decay, fungi and insect infestations have developed in the ancient wooden members of the hall for decades. To eliminate any hidden dangers and prolong the life of this architectural heritage site, it is necessary to monitor the structure continuously, record, sort and analyse the monitoring data, and then use these data as a basis for the implementation of further conservation measures.

At present, monitoring work on historic wooden structures in China and many other countries is mainly focused on environmental and structural monitoring. Researchers rarely use non-destructive testing methods to monitor the quality of the materials of these historic wooden structures. This work introduces the non-destructive testing (NDT) and micro-destructive testing technologies that are used for on-site surveying and inspection of the Song Dynasty wooden columns in the main hall of Baoguo Temple and compares the feasibilities of the NDT methods, which include microwave, ultrasonic and resistograph-based testing methods.

As a microwave passes through an object, its intensity decreases, its power is attenuated and its amplitude, phase, frequency and other related parameters also change. Therefore, the moisture content of the object material can be measured indirectly by detecting the data that measure these changes. In this work, a German MOIST 210 handheld microwave detector is used to detect the moisture content of the Song Dynasty wooden columns at depths of 3 cm, 7 cm and 11 cm. The results show that in any of the wooden columns when measured at the

same height, the moisture content is highest at the depth of 3 cm, followed by that at the depth of 7 cm, while the moisture content at the depth of 11 cm is the lowest. Therefore, the water in the Song Dynasty wooden columns in Baoguo Temple is largely transmitted from the surrounding environment to the interior of the wood.

Ultrasonic testing technology is used to detect damage to the wood based on changes in the ultrasonic velocity within the wood. In this work, a Swiss Proceq ultrasonic detector is used to measure the ultrasonic velocity at heights of 40 cm, 80 cm, 120 cm, 160 cm, and 200 cm in columns B4, C1, C4, D1, D2, D3 and D4. Measurements were taken at each measurement point twice, and the average result was used as the ultrasonic velocity in each case. The resulting velocity distributions indicate that the velocity values for columns D3 and D4 are the closest in value at approximately 1 600–1 700 m/s, and are higher than the velocity values of the other columns. In general, a higher velocity within the material means that that material is relatively dense and strong. In addition, the available data indicate that D4 is an updated wooden column, meaning that D3 may also be a comparatively new column. Because the wave propagation velocity in the air is 340 m/s, and the velocity of the wave when propagating in the wood is greater than 340 m/s, the wave velocity will be reduced significantly when an ultrasonic wave passes through wood that contains a crack. In the wooden columns other than D3 and D4, the wave velocity values are smaller than those detected in the newer columns. It is thus preliminarily concluded that internal spliced cracking is present in the wooden columns other than D3 and D4 because of their long-term use.

Resistograph testing technology is used to measure the internal conditions of wood via a resistance curve that is formed during a drilling rotation process. A German micro-drill resistance instrument (IML-RESI PD600) is used to perform important testing of the internal decay of the class III wooden columns that have the most serious degrees of disease severity. Drilling impedance results are then analysed on-site using PD-Tools Pro software. The impedance curve is analysed in combination with the wood density, the number of annual rings and other related wood science knowledge. The impedance curve is then synthesised on the cross-section of a column and Auto CAD software is used to draw cross-sections of the degrees of decay indicated at the different heights in the wooden columns. In these cross-sections, blue colour

represents holes in the wood, red colour represents serious decay, and yellow colour represents light decay. The degrees of decay in the measured sections of columns A1, C2 and C3, B1 and B3, and A2 are serious, medium, light and well, respectively and the degrees of decay of the measured sections of column B2 vary with column height from serious to light and well.

In conclusion, because of the characteristics of the semi-open spaces in which the Song Dynasty wooden columns of Baoguo Temple are located, the large diameters of the columns, and the unique structures of these wooden columns, comprehensive application of various detection methods to measure these Song Dynasty wooden columns is essential. The advantages, difficulties and data reliability of the various methods are also analysed and summarised. The data obtained can then be used as daily maintenance and monitoring records for the Song Dynasty wooden columns in the main hall of Baoguo Temple, and these detection methods can be used for reference in monitoring operations for other historic wooden structures.

**作者简介:** 陈琳, 同济大学建筑与城市规划学院(上海200092)博士研究生。  
符映红, 宁波市保国寺古建筑博物馆(宁波315033)文博馆员。  
居发玲, 上海保文建筑工程咨询有限公司(上海201800)工程师。  
戴仕炳, 同济大学建筑与城市规划学院(上海200092)教授。

**收稿日期:** 2018-03-19

**Biography:** Chen Lin, PhD Candidate at the College of Architecture and Urban Planning, Tongji University (Shanghai 200092).

Fu Yinghong, Researcher at the Ancient Architecture Museum of Baoguo Temple, Ningbo (Ningbo 315033)

Ju Faling, Engineer at Shanghai Baowen Engineering Consulting Co., Ltd. (Shanghai 201800)

Dai Shibing, Professor at the College of Architecture and Urban Planning, Tongji University (Shanghai 200092).

**Received date:** 19 March, 2018