

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020175

古建筑木构件隐蔽式残损适宜性检测技术

袁霄, 陈勇平, 郭文静, 唐启恒

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 鉴于我国木结构古建筑富于变化且式样较多, 为了化繁为简, 将古建筑木构件按形状(圆形构件、方形构件)、位置(埋墙构件、露明构件)和构造(独木构件、拼合构件), 分为8种组合类型。针对这8种组合构件, 通过其适宜性检测方法研究, 形成无损检测技术体系, 实现隐蔽式残损的快速识别和可靠表征。

关键词: 古建筑木结构; 木构件; 隐蔽式残损; 适宜性检测; 无损检测

中图分类号: S781.5; TS67; TU366.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2021) 06-0009-07

Suitability Testing Technology of Invisible Damage in Wooden Components of Ancient Timber Structures

YUAN Xiao, CHEN Yong-ping, GUO Wen-jing, TANG Qi-heng

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The ancient Chinese timber structures have rich variety of styles. It is tedious to form a set of nondestructive testing methods for every type of components, therefore, the authors proposed a simplified method, which is based on the component shapes (circle, square), positions (buried-wall, exposed), and compositions (single wood, jointed member) of ancient wooden structures. This method can be generalized into eight combination types, such as circular components and quadrate based on their shapes, embedded components and open components based on their positions, single components and split components based on their structures. A nondestructive testing technology system for wooden components was developed through a suitability testing research on the eight combination components. The rapid identification and reliable characterization of invisible damage were achieved.

Key words: ancient timber structure; wooden components; invisible damage; suitability testing; nondestructive testing

古建筑木构件隐蔽式残损主要是指肉眼难以发现的构件内部残损或被墙体等障碍物遮挡的构

件外部残损, 该类残损往往因为其隐蔽性而不易被及时发现, 待其外部残损明显可见时通常整个断面已经腐朽, 严重时将引起整个建筑的倒塌。针对古建筑木构件隐蔽式残损, 科学地建立快速、可靠的无损检测技术体系, 规范各类构件的检测方法和检测流程, 对于木结构古建筑的保护具有重要的意义。中国木结构古建筑富于变化, 其规模不等且式样较多, 木构件的名称多种多样, 如

收稿日期: 2020-12-03; 修改日期: 2021-10-26

基金项目: 国家重点研发计划课题“明清官式建筑材料科学化认知研究”(2020YFC1522402); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“刺入式探测对木柱承载能力的影响机制”(CAFYBB2019SY033)。

作者简介: 袁霄 (1997—), 女, 硕士研究生。Email: 1393877048@qq.com

通讯作者: 陈勇平, 男, 副研究员。Email: chenyp@caf.ac.cn

木柱就有檐柱、角柱、金柱、山柱、瓜柱等^[1],针对每一类构件均提出一套无损检测方法较为繁琐。为此,笔者结合检测工作经验,提出一种化繁为简的思路,将古建筑木构件按形状分为圆形构件、方形构件,按位置分为埋墙构件、露明构件,按构造分独木构件、拼合构件,其中形状上近圆形归于圆形、非近圆形因检测方法的近似性归于方形,这样理论上形成8种组合构件,即圆形独木露明构件、圆形独木埋墙构件、圆形拼合露明构件、圆形拼合埋墙构件、方形独木露明构件、方形独木埋墙构件、方形拼合露明构件、方形拼合埋墙构件,古建筑木构件均可以在此8种组合类型中找到对应点。为便于叙述,本文将直观且具有明显侧重性的埋墙和露明位置分类作为基础分类,以此展开相应的无损检测技术研究。

一般来说,古建筑木构件无损检测技术有线、面、体三类。线检测技术为类阻抗仪检测技术(如RESISTOGRAPH树木针测仪)^[2-3],是用微型探针在电机驱动下以恒定速度刺入木材内部,根据刺入过程所受的木材相对阻力,判定木材内部残损和材质等信息的一种微损检测方法,阻抗仪又称树木针测仪、微钻阻力仪。面检测技术为类应力波断层检测技术(如ARBOTOM树木断层检测仪)^[4],应力波断层检测主要通过检测应力波在木材内部的传播时间,经波速计算并进行矩阵变换和图像重构后,以二维彩色图像直观地显示木材内部残损的一种方法。体检测技术为类雷达探测技术(如TRU树木雷达系统)^[5],利用高频雷达波以脉冲形式通过发射天线被定向送入木材内部,通过处理和分析遇残损发生反射的雷达波波形、强度等,实现对木材内部残损的探测。针对不同构件类型,科学合理地选用检测技术,是实现隐蔽式残损快速识别和可靠表征的有效途径。

1 埋墙构件的检测

埋墙构件主要包括墙内构件和半露明构件,墙内构件需破开部分墙体进行检测,该文所述埋墙构件主要针对墙体等障碍物局部遮挡的半露明构件。对于此类埋墙构件的检测,若使用应力波断层检测仪或雷达探测仪,则仅能探测到木构件

裸露部分的残损状况(如图1a所示),无法评估木构件整体材质状况;而阻抗仪检测可以根据构件的裸露空间平行或交叉探测成像,无需似应力波断层检测仪般沿断面外围均匀布置传感器,也无需似雷达探测仪般在断面进行360°扫描,使用阻抗仪微损探测方法更适合埋墙构件。



a 埋墙柱雷达探测结果



b 阻抗仪检测示例1

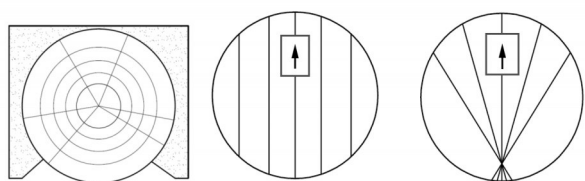


c 阻抗仪检测示例2

图1 埋墙柱的残损检测

Fig.1 Testing damages of embedded components

以圆形独木埋墙构件为例,因为构件的局部或者绝大部分被墙体遮挡,所以需要利用有限的裸露空间进行最大范围的检测和评估。根据此类构件视裸露空间的大小,可采用两种检测方法:1)当裸露面直线长度超过构件直径40%时,选定的断面从检测点向中心区域,阻抗仪探测1次及同方向左右偏移探测0~4次(图2b),偏移距离视构件直径而定,一般首次偏移探测距离约为构件直径的20%,以判定是否存在影响构件安全的残损;2)当裸露面直线长度小于构件直径20%时,选定的断面向中心区域,阻抗仪探测1次及以扇形发散的方式偏移探测0~4次(图2c)。对于存在明显残损的区域,应在该区域有针对性地增加检测次数,以确定残损范围。当裸露面直线长度大于构件直径20%、小于40%时,视具体情况而定。



a 圆形埋墙构件 b 阻抗仪检测方法1 c 阻抗仪检测方法2

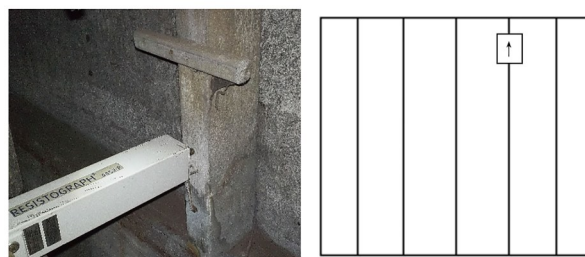
图2 圆形埋墙构件的阻抗仪检测

Fig.2 Resistograph testing of circular embedded components

对于埋墙构件中的圆形拼合埋墙构件、方形独木埋墙构件、方形拼合埋墙构件, 同样因为其裸露空间较小, 仍推荐选择阻抗仪作为检测工具。圆形拼合埋墙构件方法同上。方形构件略有不同, 一般在选定的断面向髓心区域, 阻抗仪探测1次及同方向左右偏移探测0~4次(图3)。

阻抗仪检测是根据阻抗曲线判定木材内部残损的一种方法^[6-9], 检测过程中检测曲线生成与探针刺入过程同步进行。如图4所示, 曲线横坐标为探针刺入木材的深度, 纵坐标为阻抗仪检测值, 该检测值是根据探针的能量损耗记录的相对值

(该相对值非力学意义上的阻力大小值, 因而无单位)。检测曲线图可导入计算机, 使用配套的软件对曲线数据进行处理。当微型探针穿过木材实体进入残损区域时, 保持探针的旋转而进针方向的阻力减小, 故而阻抗仪检测曲线下降至低值且该区域波动特征缓和; 待微型探针穿过残损再进入实体木材时, 探针随即受到进针方向的阻力, 检测曲线升高并产生峰谷的变化。因此, 根据曲线的数值和走势, 可以判断木构件内部残损状况。



a 方形埋墙构件检测示意图 b 阻抗仪检测方法

图3 方形埋墙构件的阻抗仪检测

Fig.3 Resistograph testing of quadrate embedded components

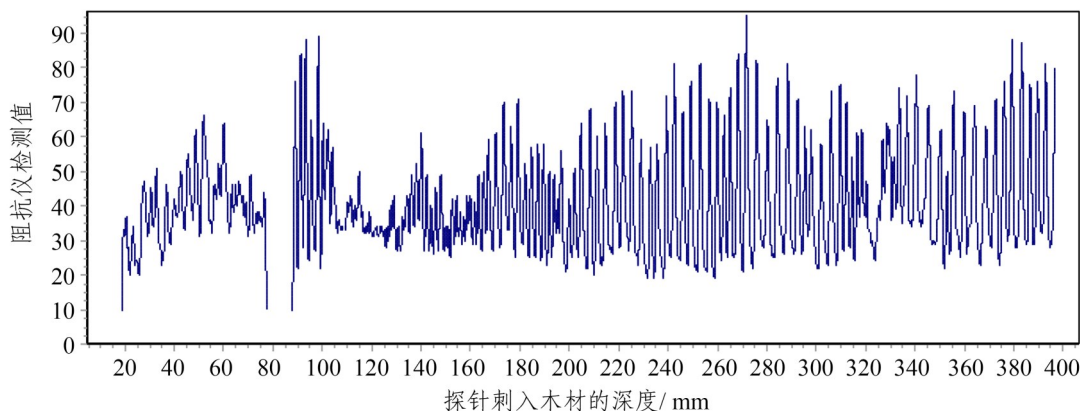


图4 阻抗仪检测曲线

Fig.4 Testing curve by Resistograph

阻抗仪检测埋墙构件内部残损, 对于个别材质较软的木材树种, 可能整体曲线较低, 有时甚至低至探测到孔洞时的检测值, 这主要是树种的材质特性以及检测设备的功率双重因素所致。有效区分孔洞残损以及树种特征, 可以采用3种方法: 1) 现场初勘的基础上, 在构件明显无残损区域进行检测验证; 2) 从设备功率着手, 减小功率针对性提高探针受到的阻力补充测试; 3) 取样鉴定树种, 进行辅助判别。此外, 阻抗仪探测到墙

体内侧边缘存在单路径残损时, 应针对性进行腐朽和开裂的区分: 一般开裂始于木构件的边缘部位, 边缘部位裂缝宽度较大, 向木构件内部延伸, 裂缝宽度逐渐减小; 而腐朽则散乱分布于木构件的边缘部位, 通过补充检测残损的形状特征可以有效区分。对于设备本身, 其使用功率一定程度上决定了其适用范围, 不同功率适宜于不同材质的木材残损检出, 一般情况下阻抗仪探针的旋转速度及磨损程度不会影响内部残损的检出。

2 露明构件的检测

露明构件可以使用雷达探测仪、应力波断层检测仪或者阻抗仪进行单独检测,具有一定径级的露明构件推荐优先使用非侵入式雷达探测仪。

2.1 雷达探测技术

以圆形露明构件为例,利用雷达探测仪进行露明柱的检测,如图5所示:将检测装置贴合于构件表面,从标记点开始推动检测装置匀速绕木段一周,直至回到标记点,进行一次完整扫描。

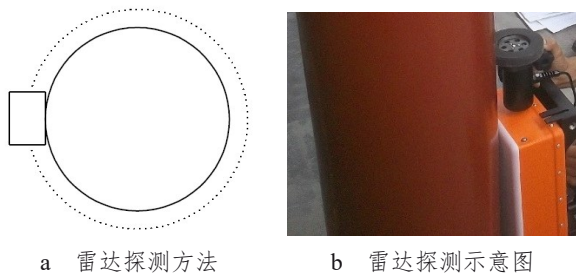


图5 圆形露明构件的雷达探测
Fig.5 Radar testing of circular open components

雷达探测木材内部残损是利用高频电磁波确定介质内部分布规律的一种方法^[10-15],通过接收发射电磁波的反射信息实现木材内部残损判定。整个检测工作包括两步:1) 现场实地数据的快速采集;2) 利用软件对数据进行分析处理,生成内部状态图。如图6所示,图像横坐标为检测长度,即雷达天线从检测点开始沿着木段周长方向的移动距离;纵坐标为探测深度,左侧为某一检测点的波形图,右侧为综合所有检测点得出的检测图像。实际检测中,雷达天线绕木柱一周,相当于一台虚拟钻孔机对该木柱进行了360°的钻孔操作。当检测对象内部存在残损时,木材和残损的交界面会产生反射,根据反射回波的特征信息可以推断残损的位置和大小。

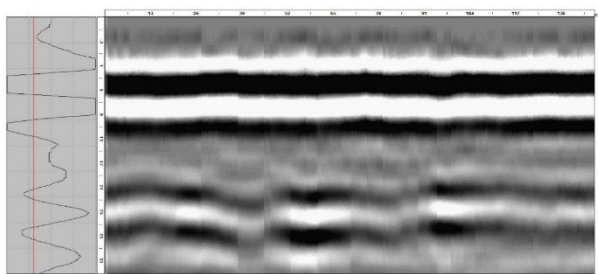


图6 雷达探测图像
Fig.6 Testing image by radar wave method

雷达探测露明构件内部残损,对于残损的存在可以快速识别,但对于残损的定量则需要进行分析,这是因为木材树种和含水率等因素会影响雷达波的传播速度,从而影响残损边界判定。

笔者利用雷达无损检测技术对马尾松和杉木内部孔洞进行了快速识别,虽然通过各种算法使残损的识别精度大幅提高,但雷达测算残损百分比相对于实际残损百分比的相对误差仍约30%。基于笔者前期的研究发现,进行木材内部孔洞探测时,利用雷达检测技术,并综合树种和含水率等参数的修正方法,可有效减小孔洞面积的识别误差。目前团队正开展不同树种、不同含水率的有孔木材雷达测试研究,尝试在大量数据下建立修正系数与雷达检测信息、实测信息以及树种、含水率等参数之间的修正函数:

$$Kws = L_s/L_t = f(W_c, S_z) \quad (1)$$

式中: Kws 为修正系数, L_s 为指定路径中木材外缘到孔洞边缘的实测距离, L_t 为指定路径中木材外缘到孔洞边缘的雷达探测距离, W_c 为含水率, S_z 为树种。

在现场雷达检测中结合检测对象的含水率和树种并依据修正函数获取雷达检测图像的修正系数,再根据修正系数对雷达检测图像中指定修正路径进行计算修正,进而对检测图像中木构件内部残损的大小进行整体修正。

2.2 应力波断层检测技术

圆形露明构件亦可使用应力波断层检测仪,如图7所示。

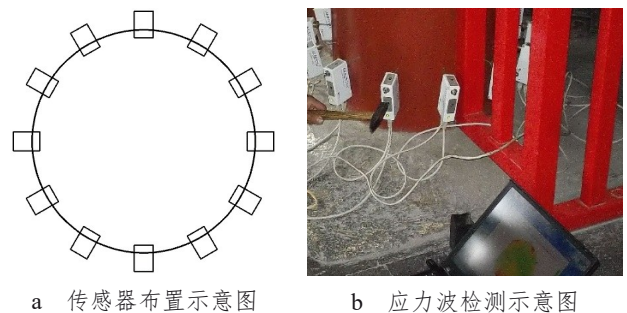


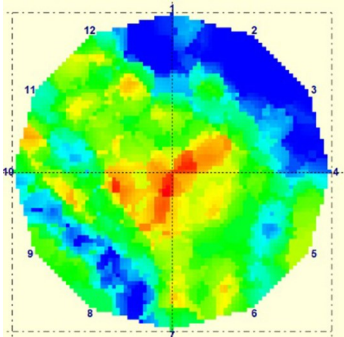
图7 圆形露明构件的应力波扫描
Fig.7 Stress wave testing of circular open components

应力波断层检测主要通过检测应力波在木材内部的传播时间，经波速计算并进行矩阵变换和图像重构后，以二维彩色图像直观地显示木材内部残损的一种方法^[16-19]。当木材内部存在残损时，应力波在残损路径上传播速度比健康路径的传播

速度要慢，根据检测对象实际情况结合各个传感器之间的波速值，设定残损判定的临界参数，可获得木材内部残损的二维图像。图8a为各传感器之间的传播速度，图8b为根据图8a应力波传播速度得出的残损图像。

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		-----	862	907	702	645	779	652	636	517	525	-----
2		-----		815	663	646	815	692	678	588	677	567
3		362	-----		489	567	765	669	648	573	664	647
4		426	694	-----		466	732	663	652	546	682	710
5		404	708	663	-----		600	626	649	634	642	612
6		481	827	866	665	-----		590	673	582	722	673
7		415	756	825	710	495	-----		567	586	765	662
8		443	764	854	823	651	548	-----		499	732	676
9		383	748	795	769	679	611	737	-----		562	604
10		462	855	917	793	710	675	955	675	-----		588
11		298	778	894	843	672	679	929	720	566	-----	
12		-----	716	944	935	699	646	875	736	672	492	-----

a 应力波传播速度



b 应力波成像

图8 应力波检测结果

Fig.8 Testing result by stress wave method

应力波断层检测露明构件内部残损，该项技术相比雷达探测的耗时较长，且应力波的传播速度同样受木材树种和含水率等因素影响，导致识别精度受限。为提高检测精确度，减小外部开裂等残损对内部残损定界的影响，在古建筑木构件检测应用中，应根据应力波断层检测结果，针对性在需要修正的区域设置辅助传感器，进行再次检测。设置辅助传感器，主要是为规避局部检测区域所布置的应力波传感器受裂缝影响产生检测误差。笔者曾通过设置辅助传感器的方法进行了相同体量残损试材的内部残损识别对比研究，发现设置辅助传感器有助于提升识别精度。此外，建议在进行现场木构件残损判定时，可首先选择一个明显无残损的断面进行扫描，得出该检测方式下木构件应力波传播速度的正常数值和大致规律，然后根据相应的数值设计待检断面残损评估的临界值。

方形露明构件也可以利用雷达探测仪或应力波断层检测仪，采取与圆形构件相似的方法进行残损检测。由于方形构件利用雷达探测仪环绕测量时，在两个面形成直角位置难以实现无扰动过渡，进而产生一些异常数据，因此也可以采取另外一种沿着方形构件长度方向进行探测的方法，如图9所示。

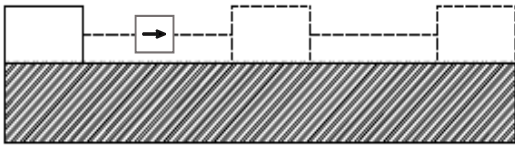


图9 方形露明构件沿长度方向雷达探测

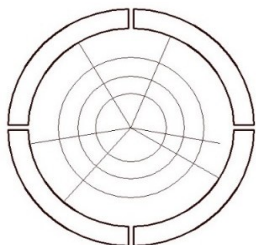
Fig.9 Radar testing method for quadrate open components

综上所述，利用雷达探测仪和应力波断层检测仪可以检测露明构件的内部残损。但当该露明构件为拼合柱时，因其内部可能存在一定的拼合孔隙，导致构造类孔隙识别为残损（应力波在构件中传播遇到孔隙时，会避开孔隙进行传播；雷达波从木材实体传播到木材内部孔隙时，将在交界面上发生强反射并引起反射波形和检测图像的变化），从而产生误判。故雷达探测仪和应力波断层检测仪较适宜的检测对象为圆形独木露明构件和方形独木露明构件；对于圆形拼合露明构件（如图10所示）和方形拼合露明构件，以及径级较小的圆形独木露明构件、方形独木露明构件，推荐使用阻抗仪进行检测。

2.3 阻抗仪检测技术

利用阻抗仪进行圆形露明构件（包括圆形独木露明构件、圆形拼合露明构件）的检测时，可采用2种方法：1）在选定断面向中心区域，阻抗

仪探测1次及同断面其他方向向中心探测0~4次(图11a); 2) 在选定的断面向中心区域阻抗仪探测1次及同方向左右偏移探测0~4次(图11b)。



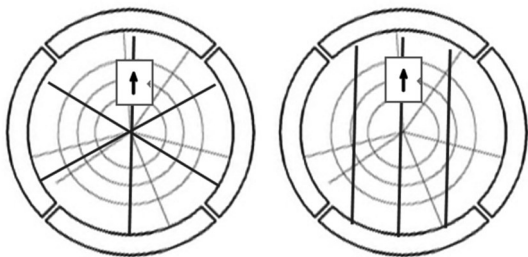
a 拼合柱结构示意图



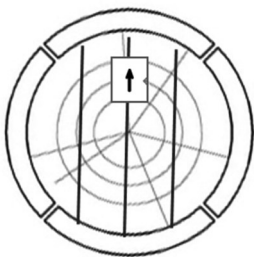
b 拼合柱实例

图10 拼合柱示意图

Fig.10 Schematic diagram of split columns



a 检测方法1



b 检测方法2



c 检测示例

图11 圆形露明构件的阻抗仪检测

Fig.11 Resistograph testing of circular open components

方形露明构件检测一般采用类似图3b的方法，即选定的检测点向中心区域，阻抗仪探测1次及同方向左右偏移探测0~4次，示例见图12。



a 检测示例1



b 检测示例2

图12 方形露明构件的阻抗仪检测

Fig.12 Resistograph testing of quadrate open components

2.4 露明构件的联合检测技术

在不明确残损特征的前提下，为提高检测系统精度和识别准确性，露明构件可采用雷达探测(应力波断层检测)-阻抗仪法联用技术进行诊断，既可以快速区分构造孔隙和隐蔽式残损，又可以更好地实现构件内部残损边界的精准定位，如图13所示。

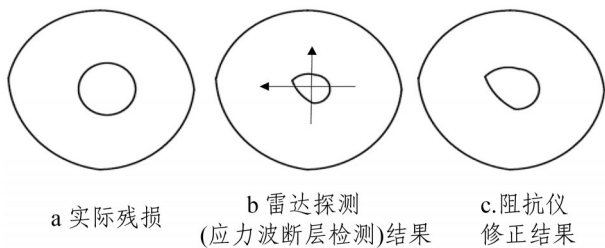


图13 露明构件的联合检测

Fig.13 Joint testing method for open components

前期研究表明，通过雷达探测或应力波断层检测，可以得到木材内部残损的直观图像，但是该图像受木材含水率、树种特征等诸多因素影响，故其显示的残损大小存在一定的偏差(如图13a、13所示)。该偏差除常规算法修正外，利用阻抗仪对残损木材开展单路径上残损长度的修正并进行同路径残损轮廓的校正或拉伸，可获得更为准确的残损面积(图13c)。

3 结语

本研究提出的古建筑木构件隐蔽式残损适宜性检测技术，主要针对古建筑木构件的形状、构造和位置，科学合理地选用检测方法和检测手段，实现隐蔽式残损的快速识别和可靠表征。

1) 为评估木构件整体材质状况，埋墙构件中的圆形独木埋墙构件、圆形拼合埋墙构件、方形

独木埋墙构件、方形拼合埋墙构件均首选类阻抗仪微损检测技术,必要时需要破开墙体进行检测。阻抗仪探测是目前单路径最准确的微损检测技术,合理利用有限的裸露面积,对埋墙构件进行平行或交叉探测成像,有效地避免了应力波断层检测和雷达探测等面、体检测方法所需要的构件大面积裸露的局限性。

2) 对于大径级的露明构件,如直径大于35 cm的圆形独木露明构件或尺寸大于35 cm的方形独木露明构件优先使用类雷达的非侵入式方法,该方法可以实现木材内部残损快速无损识别。而对于较小径级的露明构件,如直径小于35 cm的圆形独木露明构件或尺寸小于35 cm的方形独木露明构件仍优先选用类阻抗仪的微损检测技术,必要时选择应力波检测、雷达探测等技术。

3) 古建筑木构件隐蔽式残损检测总体原则为:古建筑木构件优先使用非侵入式检测技术,其检测手段完全无损且效率较高,但对于埋墙构件、拼合构件以及部分较小尺寸构件适宜性较差;阻抗仪检测技术适用于所有构件的检测,尤其是对于埋墙构件和拼合构件而言,具有不可替代性,可作为上述无法使用非侵入检测技术的补充;采取多项无损检测技术结合联用的手段进行探测,可实现隐蔽式残损的精准评估。

4) 随着科学技术的发展,非侵入式探测技术以及探测对象兼容性必将得到显著提升和扩展,古建筑木构件隐蔽式残损检测将更加高效便捷;类阻抗仪的微损探测技术在目前的古建筑木构件检测中仍具有不可替代的作用,未来或将改进并集成其他功能。

参考文献:

- [1] 白丽娟,王景福. 古建清代木构造[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007.
- [2] 张晓芳. 阻力仪在古建筑木构件勘查中的应用研究[D]. 北京: 北京林业大学硕士学位论文, 2007.
- [3] LAURENCE R C, STEPHEN L Q. Detection of wood decay in blue gum and elm: an evaluation of the Resistograph and the portable drill [J]. Journal of Arboriculture, 1999, 25(6): 1-9.
- [4] 王立海,徐华东,闫再兴,等. 传感器的数量与分布对应力波检测原木缺陷效果的影响[J]. 林业科学, 2008, 44(5): 115-121.
WANG L H, XU H D, YAN Z X, et al. Effects of sensor quantity and planar distribution on testing results of log defects based on stress wave[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(5): 115-121.
- [5] 陈勇平,高甜,李德山,等. 马尾松木材空洞开裂残损的雷达检测成像初探[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(3): 112-118.
CHEN Y P, GAO T, LI D S, et al. Preliminary study on radar detection and imaging of cavities and cracks of *Pinus massoniana*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(3): 112-118.
- [6] LIN C J, HUANG Y H, HUANG G S, et al. Detection of decay damage in iron-wood living trees by nondestructive techniques[J]. Journal of Wood Science, 2016, 62(1): 42-51.
- [7] TUMENJARGAL B, ISHIGURI F, TAKAHASHI Y, et al. Predicting the bending properties of *Larix sibirica* lumber using nondestructive-testing methods[J]. International Wood Products Journal, 2020, 11(3): 115-121.
- [8] UTHAPPA A R, HEGDE M, KUMAR P K, et al. Rapid measurement of density of wood in progeny trial of *Acacia mangium* Willd. using resistograph-A nondestructive method[M]//Wood is Good. Springer, Singapore, 2017: 37-45.
- [9] 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(1): 6-9, 74.
ZHANG F W, XU Q F, ZHANG Z Y. Wood defect inspection by drilling resistance method[J]. Nondestructive Testing, 2016(1): 6-9, 74.
- [10] UDAYA H, SACHIN A, BHASKARAN G, et al. Defect detection in wooden logs using ground penetrating radar[J]. AIP Conference Proceedings, 2007, 894(1): 1368-1375.
- [11] SANDEEP P, UDAYA H. GPR scanning methods for enhanced data imaging wooden logs[R]. AIP Conference Proceedings, 2008, 975(1): 1674-1681.
- [12] BUTNOR J R, PRUYN M L, SHAW D C, et al. Detecting defects in conifers with ground penetrating radar: applications and challenges[J]. Forest Pathology, 2009, 39(5): 309-322.
- [13] 邱向辉,王立海. 探地雷达(GPR)在木材无损检测应用中的可行性探讨[J]. 无损检测, 2013, 35(11): 51-54.
DI X H, WANG L H. Study on the feasibility about GPR applied on wood nondestructive testing [J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(11): 51-54.
- [14] 文剑,李伟林,肖中亮,等. 活立木内部缺陷雷达波检测研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 185-193.
WEN J, LI W L, XIAO Z L, et al. Radar wave detection of standing trees internal defect[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 185-193.
- [15] 肖夏阳,文剑,肖中亮,等. 基于雷达波的树木躯干内部缺陷探测识别[J]. 林业科学, 2018, 54(5): 127-134.
XIAO X Y, WEN J, XIAO Z L, et al. Detection and recognition of tree trunk internal structure based on radar [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(5): 127-134.
- [16] Rabe C, Ferner D, Fink S, et al. Detection of decay in trees with stress waves and interpretation of acoustic tomograms [J]. Arboricultural Association Journal, 2004, 28(1-2): 3-19.
- [17] 梁善庆. 古树名木应力波断层成像诊断与评价技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院博士学位论文, 2008.
- [18] 杨慧敏,王立海. 立木与原木内部腐朽二维成像检测技术研究进展[J]. 林业科学, 2010, 46(7): 170-175.
YANG H M, WANG L H. Research and development on 2D imaging technology of the decay in trees and logs[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(7): 170-175.
- [19] 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 Z Y, FENG H L, DU X C, 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.

(本文编校 向 琴)