

活立木内部缺陷雷达波检测研究

文 剑¹ 李伟林¹ 肖中亮¹ 张 京² 韩红岩²

(1.北京林业大学工学院,北京 100083; 2.北京市颐和园管理处,北京 100091)

摘要: 针对活立木内部结构复杂,个体化差异较大,导致雷达波图像难以解析的问题,提出了一种基于振幅比在线估计相对介电常数以及利用希尔伯特积分进行层位追踪实现缺陷界面的相对定位,并结合活立木外轮廓点云数据确定其内部缺陷绝对位置和分布表征的方法,以此开发了基于雷达波的活立木内部结构缺陷分析软件。采用基于时域有限差分法的正演模拟、实验室原木试件检测分析、颐和园现场活立木检测等实验验证方法的可行性。结果表明可对检测目标点准确定位,复现树干内部横截面图像,雷达波成像结果与古树复壮时内部实际结构相符。

关键词: 活立木; 无损检测; 雷达波; 树木雷达

中图分类号: TN958.4; S758.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0180-09

Radar Wave Detection of Standing Trees Internal Defect

WEN Jian¹ LI Weilin¹ XIAO Zhongliang¹ ZHANG Jing² HAN Hongyan²

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. The Summer Palace Management Office, Beijing 100091, China)

Abstract: Nondestructive detection for standing tree trunk is more difficult than that for other materials because of characteristics of radar wave imaging of standing tree trunk itself. According to the characteristics like complex internal structure and wide individual differences among different tree species, a method of absolute position characterization of internal defects was proposed. This amplitude ratio was used to estimate relative dielectric constant, and the Hilbert method was used for horizon tracking to realize the relative localization of defect interfaces. Then, the relative position was combined with the contour cloud data of standing tree trunk. The absolute coordinate of the internal structure of trunk was located and wood faultage image was reestablished at last. The internal structure analysis software was designed based on radar wave. For verifying the feasibility of the method, three experiments were performed: numerical simulations using the software GPRMax2D, based on finite-difference time-domain method, laboratory log measurements and real tree trunk measurements. The result showed that this method can locate the target point accurately. Its image resolution can show the internal defects such as holes and rots, and the results coincided with the actual structure of standing tree trunks during the restoration in the Summer Palace.

Key words: standing trees; nondestructive detection; radar wave; tree radar

引言

名木古树是历史文化的重要载体,但常常因各种不利的环境因素或自身生理原因出现衰退现象,引起树干内部产生腐朽、空洞等缺陷,而早期缺陷一般始于树干内部中心,无法从外部准确监控和测定,导致树势衰退甚至倒塌,造成无法挽回的损失。同样,在工业生产、建筑材料领域需要在早期使用非破

坏方法对木质体内部结构进行鉴别。健康的树干内部结构主要分为3部分:心材、边材和树皮^[1]。大多数活立木无法从看似健康的外表察觉内部出现的缺陷,需要使用特殊的检测方法进行分析。为了对活立木内部结构进行评估,特别是避免破坏珍贵的名木古树,通常使用无损检测方法,目前常用的方法主要有应力波^[2-4]、阻抗分析仪^[5]、CT扫描^[6-7]、超声波^[8-9]、雷达波^[10-12]层析成像法等。应力波法存在

收稿日期: 2017-06-21 修回日期: 2017-07-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017ZY27)和国家自然科学基金项目(31600589)

作者简介: 文剑(1981—),男,副教授,博士,主要从事林业无损检测技术研究,E-mail: wenjian@bjfu.edu.cn

检测效率低的问题;阻抗分析仪对活立木具有一定的破坏性;CT 扫描法涉及到的 X 射线扫描和核磁共振技术成本较高,存在便携性差及放射源辐射等问题;超声波法存在易受外界干扰、耦合,以及信号发散等问题。相比上述几种方法,雷达波法作为在地球物理领域得到广泛应用的无损检测方法,具有高效、方便、在线连续检测、真正无损的特点,除了应用于土木工程^[13]、交通工程^[14]、水文地质^[15]等方面外,近年来也受到林业专家的广泛关注。

雷达波检测到的树干内部缺陷是指由腐朽或空洞导致的介电常数异常,从而引起雷达回波图像产生反射或折射的区域。在活立木上使用雷达波法也存在困难:活立木内部的介电常数和电导率关系难以准确衡量,天线与树皮间的耦合、信号的衰减会影响检测效果,解析数据较为困难。BUTNOR 等^[16]使用探地雷达(GPR)对松科与阔叶树种的雷达波图像进行了对比研究,验证了雷达波检测活立木内部结构的可能性。目前国内对于树干的雷达波检测方法研究尚处于起步阶段,FU 等^[17]建立了健康与含缺陷的白橡木雷达波数值正演模拟模型,采用现场试验的方式对实际活立木横断面进行重构。刘星旦等^[18]使用探地雷达对黄帝陵古侧柏树干内部腐朽情况进行研究,以树干腐朽面积占树干横截面积的百分比为指标划分等级,并分析了腐朽程度与胸径、树干高度、冠幅宽度、面积等参数间的关系,验证了雷达波检测的有效性。陈勇平等^[19]使用探地雷达检测了马尾松木材空洞开裂残损情况,检测结果指出含水率对结果影响较为显著,检测边界产生一定偏移,检测面积与实际面积存在一定的偏差。不仅是对探地雷达,含水率的不同同样也对电阻法与应力波法在腐朽和健康木材中的传播速度与检测精度存在影响^[20]。树干是一种特殊的检测对象,其表面通常呈不规则轮廓形状,目前常用的 TreeWin 分析软件^[21]无法复现树干截面外轮廓,成像结果中均设置为圆形,检测不准确。而且雷达波和目前使用较多的应力波、超声波等技术检测到的都是树皮到缺

陷处的相对位置,若能准确地检测出树干内部缺陷的实际位置及形状分布,可为其材性研究和三维重构提供依据。

本文针对探地雷达在活立木无损检测应用中的特点,考虑特殊的树干内部结构雷达波图像、不同介质层相对介电常数的获取以及不规则外轮廓等问题,提出结合希尔伯特积分层处理算法、内部缺陷区域绝对定位进行准确的成像表征方法,并进行二维正演模拟、实验室试件及颐和园活立木现场检测实验。

1 研究方法及设备

1.1 雷达波层析成像原理

雷达波检测的基本原理是通过宽频带脉冲电磁波信号在被测介质中传输时,根据不同介质的分界面上形成反射和透射来确定介质的分布情况。对于活立木的探测可以通过沿活立木横截面切向扫描一周或多周,通过回波信号分析活立木的内部情况,如图 1 所示。当电磁波在含有缺陷(腐烂、空洞)活立木内部传播时,其路径、强度将发生变化,形成与正常区域不同的反射和折射,导致反射波振幅变化。因此可根据雷达回波的波形幅度、时间等参数,采用希尔伯特法推断活立木内部缺陷的位置、形状、电性质等,实现对活立木内部缺陷的分层探测识别。根据雷达波在健康木质体与缺陷介质界面间的反射时间和传播速度,得到缺陷位置的计算式为

$$Z = \frac{ct}{2\sqrt{\epsilon}}$$

(1)

式中 Z ——缺陷距离树皮深度
 t ——传播时间
 ϵ ——相对介电常数
 c ——真空中光速

1.2 介电常数估计

由式(1)可知,介电常数是估计缺陷距离树皮深度的重要参数。目前常用的介电常数检测方法主要有钻孔取芯法、共中心点法、振幅法等。钻孔取芯

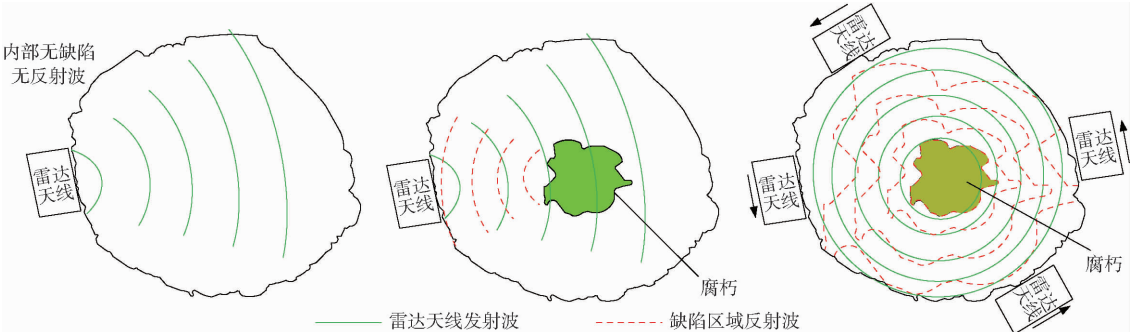


图 1 雷达波扫描横截面原理图

Fig. 1 Principle diagram for radar wave

法会对被测物造成损伤,不适用于活立木检测;其中心点法虽然属于无损检测法,但测量方法比较复杂,而且需要采用两套雷达设备。振幅法是利用雷达回波信号在各层介质反射信号的振幅比来求解相对介电常数,是对被测物完全无损的估计方法。

对于接收到的雷达回波信号,可以近似认为是各层界面反射波的叠加。假设 A_1 为反射波在空气层与第 1 介质层界面处的幅度, A_2 为反射波在第 1 与第 2 介质层界面处的幅度, A_m 为雷达波的回波幅值,则第 1 介质层面和第 2 介质层面的介电常数估计公式分别为

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{1 + \frac{A_1}{A_m}}{1 - \frac{A_1}{A_m}} \right)^2 \tag{2}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \left[\frac{1 - \left(\frac{A_1}{A_m} \right)^2 + \frac{A_2}{A_m}}{1 - \left(\frac{A_1}{A_m} \right)^2 - \frac{A_2}{A_m}} \right]^2 \tag{3}$$

1.3 扫描设备与分析软件

在获取树干的雷达波数据时,本文使用美国 TreeRadar 公司的探地雷达设备,包括野外数据管理器和 900 MHz 雷达天线两部分,如图 2 所示。野外数据管理器显示数字化波形并存储测量数据;雷达天线绕树皮每移动 5 mm 产生一次测量信号。



图 2 探地雷达
Fig. 2 Ground penetrating radar

树木雷达分析软件是基于 Matlab 开发的,如图 3 所示,主要分为数据准备、分类处理、成像合成 3 个步骤,处理流程如图 4 所示,包括如下内容:

数据准备:原始 DZT 数据经读取后,进行信号零点选取、直达波去除、Curvelet 平滑滤波、振幅增益等预处理^[22],得到树干内部本体结构和缺陷区域的有效雷达波数据。

分类处理:通过数据准备得到有效雷达波数据,使用希尔伯特积分层算法进行处理,通过振幅比估计法确定相对介电常数,利用时延估算出缺陷深度,确定层位结构及缺陷处的形状大小。将点云法^[23]

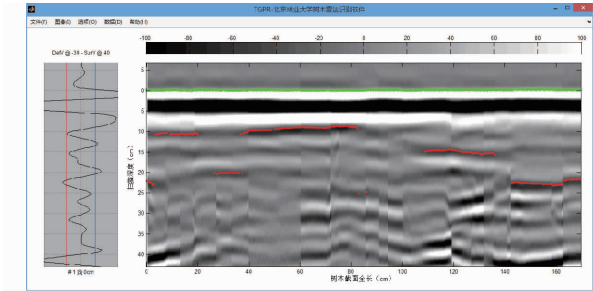


图 3 树木雷达分析软件界面
Fig. 3 Analysis software interface of tree radar

获得的树干模型进行横截面外轮廓提取,得到被测横截面准确的外轮廓数据。

成像合成:将树干内部的雷达波数据和被测横截面的外轮廓数据进行坐标转换,由笛卡尔坐标系转换到极坐标系,通过弧长等分进行数据映射,完成数据合成。成像时,将原来树皮到缺陷处的相对位置坐标,通过外轮廓绝对位置坐标的合成,得到缺陷处的绝对位置坐标,显示出树干内部缺陷的可视化图像。

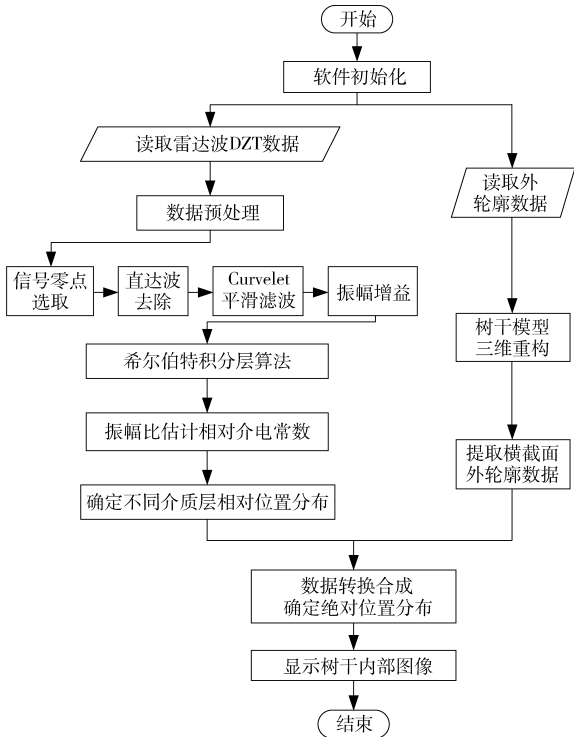


图 4 树木雷达分析软件工作流程图
Fig. 4 General flow chart of analysis software for tree radar

2 二维正演模拟

有关雷达波的研究是建立在经典的 Maxwell 方程组基础上的,时域有限差分法^[24]从 Maxwell 方程出发建立计算时域电磁场的数值方法。使用 GprMax 内置的介质 free_space 来模拟空气层,其厚度为 3 cm,将模拟天线置于空气层内。二维正演模拟中介质层的参数如表 1 所示,包括各介质层的介

表 1 二维正演模拟中介质层的参数

空气层		树皮层		边材层		芯材层		网格步长/	激励源	天线移动
ε_r	$\sigma/(S \cdot m^{-1})$	ε_r	$\sigma/(S \cdot m^{-1})$	ε_r	$\sigma/(S \cdot m^{-1})$	ε_r	$\sigma/(S \cdot m^{-1})$	mm	类型	步长/mm
1	0	5	0.001 5	11	0.001 2	13	0.001 0	3	Ricker 子波	5

电常数和电导率、模型的网格步长、激励源类型以及雷达天线移动步长, ε_r 为介电常数, σ 为电导率, 其余的参数在对应模型中列出。

内部没有任何腐朽或空洞的健康树干如图 5a 所示, 构建的模型如图 5b 所示, 由外至内分别为空

气层、树皮层、边材层、芯材层。模型区域为 200 mm × 200 mm, 树皮层厚度为 20 mm, 边材层厚度为 100 mm, 芯材层厚度为 50 mm, 时窗为 10 ns, 模型采集的道数设置为 145 道。数值模拟结果如图 5c 所示, 图中 A 为起始扫描所在位置。

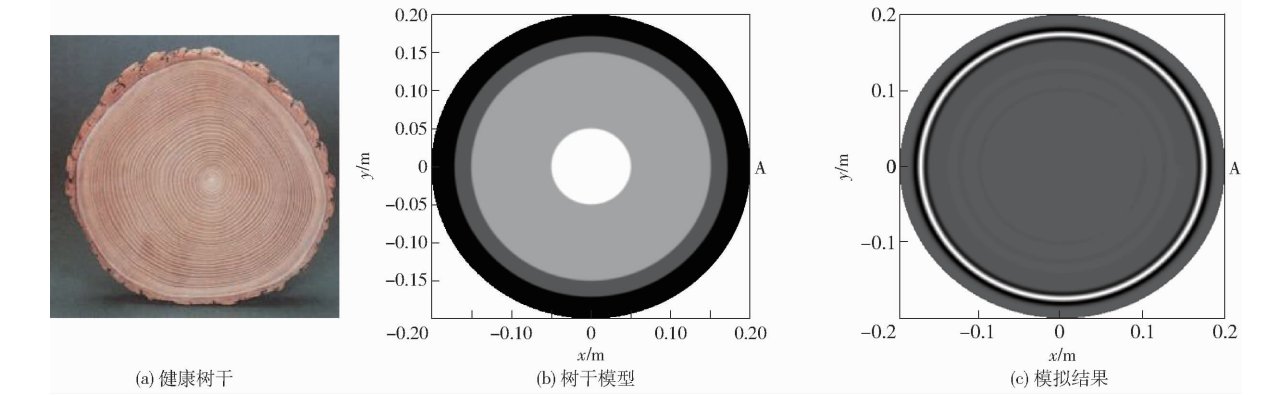


图 5 健康树干的二维正演模拟

Fig. 5 Numerical simulations of healthy trunk

由健康树干的数值模拟结果可以看出, 在树皮层与边材层、边材层与芯材层的分界面处, 由于两侧介质的介电常数差异, 雷达波在经过时发生了反射, 产生了反射波, 模拟图像中可以观察到明显的分层现象。在健康树干模型的基础上, 通过修改可以对不同形状、不同部位、不同大小的内部缺陷进行模拟, 利用数值模拟结果来推测雷达反射回波的成像规律。

为了模拟雷达波经过空洞时的情况, 在边材层分别设置了 3 个大小不等的圆形空洞, 如图 6 所示。空洞圆心坐标为 (0.5, 0.3), 半径 r 分别为 50、75、100 mm, 深蓝色为空气层, 浅蓝色为树皮层 (厚度 20 mm), 绿色为边材层 (厚度 550 mm), 棕色为模拟圆形空洞, 介电常数设置为 1, 时窗为 15 ns, 模型采集的道数设置为 165 道。

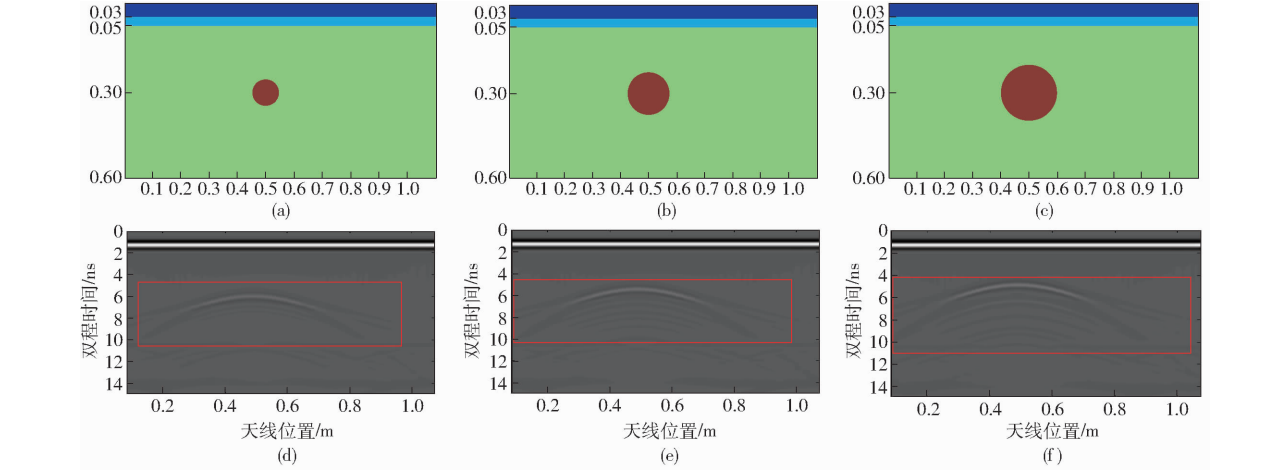


图 6 空洞的二维正演模拟结果

Fig. 6 Result of numerical simulation of cavity

3 种大小的空洞模型经过时域有限差分法二维正演模拟得到的结果如图 6, 在反射波时间 1 ~ 2 ns 存在直线型强反射信号, 为空气层与树皮层、树皮层

与边材层两交界面产生的回波图像, 由于时间较接近, 出现了叠加现象; 在反射波时间 6、5、4 ns 左右分别存在一条双曲线强反射信号, 下方有多条双曲线

弱反射信号,为圆形空洞产生,双曲线顶点深度范围为空洞区域范围,圆心位于顶点下方。雷达反射波顶点出现的时间与空洞位置有关,越靠近树皮层,反射波顶点处所对应的时间越小;雷达反射波的能量同样与空洞位置有关,越靠近树皮层,反射波的能量越强。

3 原木试件检测

选取 10 个颐和园柳木试件进行探测实验,树龄

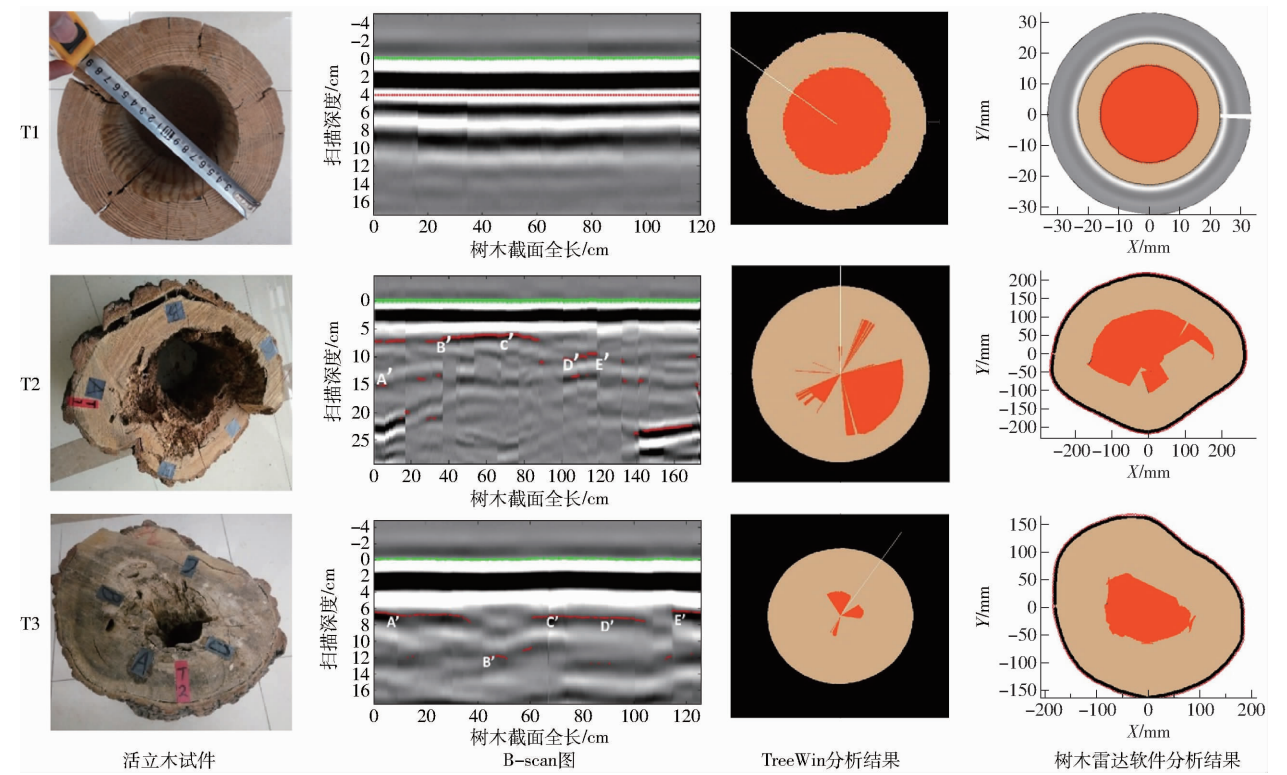


图 7 试件分析结果
Fig. 7 Analysis results of test piece

表 2 雷达波检测误差				
Tab.2 Error of radar wave				
样本 序号	含水率/%	缺陷的实际 面积/cm ²	缺陷的检测 面积/cm ²	误差率/ %
T1	35.00 ~ 50.00	452.16	462.33	2.25
T2	40.31 ~ 89.87	502.15	518.35	3.23
T3	35.83 ~ 53.67	109.24	104.15	4.66

由分析结果(图 7)与误差情况(表 2)可知,TreeWin 软件探测结果与实际样本相差较大,而使用了希尔伯特积层位识别法和点云获取外轮廓法的树木雷达分析软件,检测面积误差率在 5% 左右,提高了检测的准确度,对内部缺陷区域的检测具有可行性,且可视化效果较好。

4 实地检测

颐和园是现有保存最完好的皇家园林,名木古树众多,主要以松、柏为主,种类繁多,立地条件多

在 30 a 左右,使用探地雷达采集横截面的雷达波数据,用点云法采集外轮廓数据,经树木雷达软件得到内部缺陷分析结果,并将结果与 TreeWin 软件结果作对比,其中 3 个试件的检测情况如图 7 所示。试件缺陷的实际面积与检测面积可以通过网格法计算出来,图 7 所示的 3 个试件的雷达波检测误差情况如表 2 所示。

通过对 10 个颐和园柳木试件的检测可以发现, B-scan图无法直观地观察出树干内部的结构情况。

样,差异化较大。在颐和园选取多棵活立木进行雷达波检测成像,分别位于颐和园昆明湖西堤旁、颐和园西湖西侧岸堤旁,活立木参数如表 3 所示。

表 3 被测活立木参数			
Tab.3 Parameters of standing trees			
编号	位置	树龄/a	胸径/m
L01	颐和园昆明湖西堤旁	100	1.38
L02	颐和园昆明湖西堤旁	100	0.87
L03	颐和园昆明湖西堤旁	100	1.49
L04	颐和园昆明湖西堤旁	100	1.56
L05	颐和园昆明湖西堤旁	100	1.53
L06	颐和园昆明湖西堤旁	100	1.31
L07	颐和园昆明湖西堤旁	30	1.52
L08	颐和园西湖西侧岸堤旁	30	0.49
L09	颐和园西湖西侧岸堤旁	30	0.40
L10	颐和园西湖西侧岸堤旁	30	0.63
L11	颐和园西湖西侧岸堤旁	30	0.38
L12	颐和园西湖西侧岸堤旁	30	0.43

4.1 检测方法

实地检测过程中,首先标记活立木 5 个待测截面的高度,由地面从下到上高度依次为 0.6、0.9、1.2、1.5、1.8 m,并标记测量起始位置,如图 8 所示。然后采集活立木的点云数据,用于三维结构的构建,得到树干的三维模型,根据不同高度的标记位置,提取 5 个高度的不规则外轮廓数据。接着对每个截面由起始位置开始分别进行 360°的匀速圆周扫描,扫描时要保证天线紧贴树皮表面,步进轮连续转动,由野外数据采集器记录雷达波数据,每个高度扫描 3 次。最后使用树木雷达软件进行数据分析,得到树干内部的结构及缺陷情况。

4.2 普通柳树检测结果与分析

图 9a 为普通柳树检测现场,图 9b 为构建的树干模型。在分析不规则轮廓活立木的雷达波数据时,一般根据获得的单道 A – scan 数据,使用等间距排列获得 B – scan 数据,本文中采用 5 mm 等间距。普通柳树的 B – scan 数据图、树木雷达软件分析结果、TreeWin 软件分析结果如图 10 所示,其中树木雷达软件分析结果中,最外层黑色轮廓表示树干的外围轮廓,中间浅粉色部分表示生长良好的区域,最内层橙色部分表示空洞区域。

由树木雷达检测结果可以看出,L10 活立木内部不同高度均存在非常严重的缺陷情况,且面积较

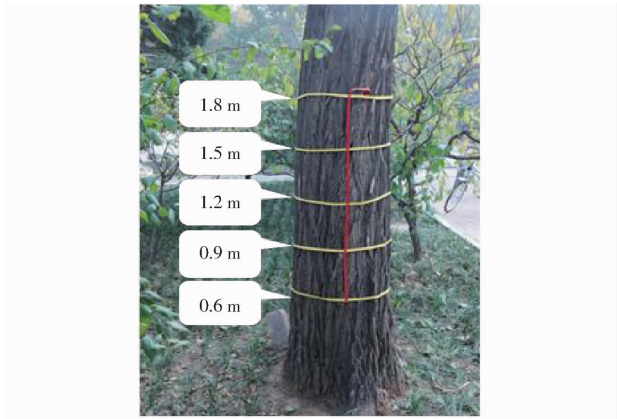


图 8 扫描高度示意图

Fig. 8 Sketch of scanning height



图 9 L10 活立木检测现场与树干模型

Fig. 9 Experimental field and trunk model

大,表明其内部存在较为严重的中空,影响其正常生

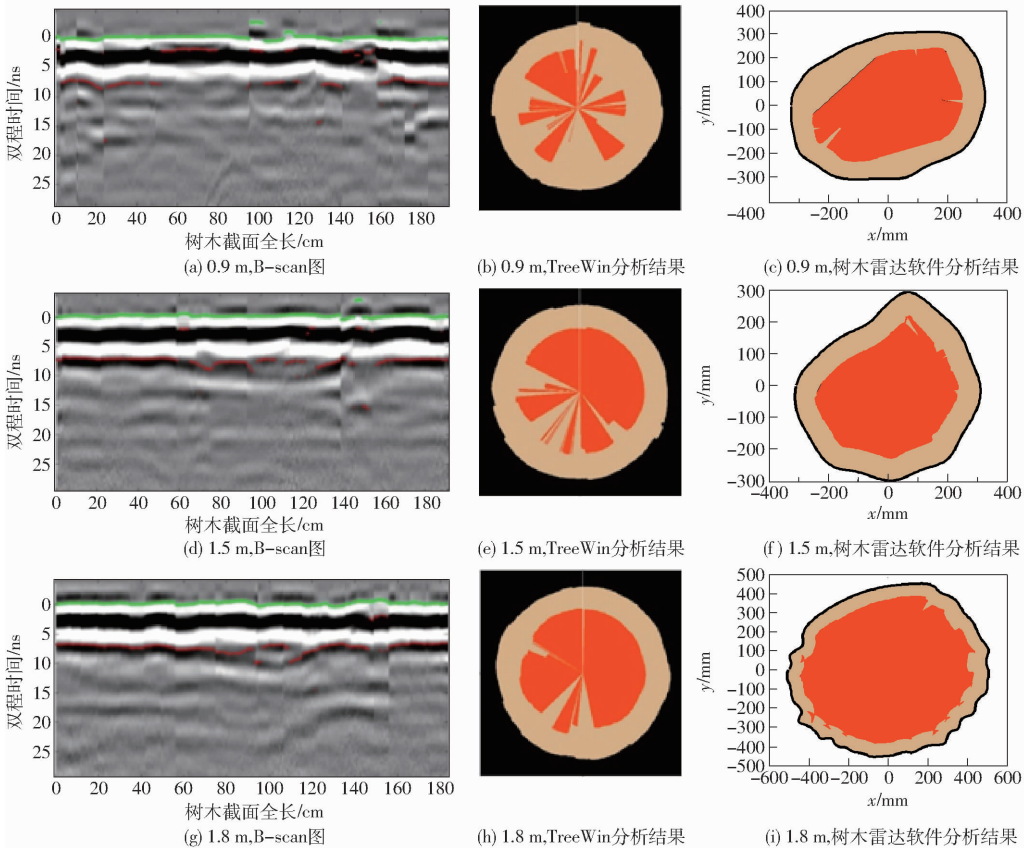


图 10 L10 检测结果

Fig. 10 Detection results of L10

长,可能会受到外力影响发生倾倒。根据树木专家的观察与经验分析,该棵柳树长势一般,内部可能存在大体积的空洞,与树木雷达检测分析结果相符。另外,与 TreeWin 分析软件相比,树木雷达分析软件对树干内部缺陷的可视化效果更准确、直观,可直接供林业研究人员使用。

4.3 古柳检测结果与分析

古树的保护长期依赖树木专家的经验积累,很难准确地判断出其内部生长状况,而大多数侵蚀都是从树干内部开始的。在颐和园内有众多一级、二级名木古树,例如活立木 L03 和 L05 是两棵树龄在 100 a 左右的古柳,经过多次复壮后,从外表几乎看不出内部存在缺陷。随着时间推进,复壮后的古柳内部会产生新的腐朽或空洞的扩大,需要通过无损方法进行检测,从而确定再次复壮的时间和方案。

采集树干外轮廓数据、使用探地雷达采集雷达波数据后,生成树干模型并对树干内部结构进行分析,得到的不同高度分析结果如图 11、12 所示,橙色部分表示空洞区域。检测结果表明,两棵古柳内部存在较大范围的缺陷区域,经计算,L03 活立木内部缺陷区域占截面面积的比例分别为 68.89%、65.79%、74.68%、69.89%,平均值高达 69.81%,L05 活立木内部缺陷区域占截面面积的比例分别为 71.68%、73.68%、72.22%、68.42%,平均值高达 71.50%,必须采取相应措施防止其发生倾倒等危险情况。

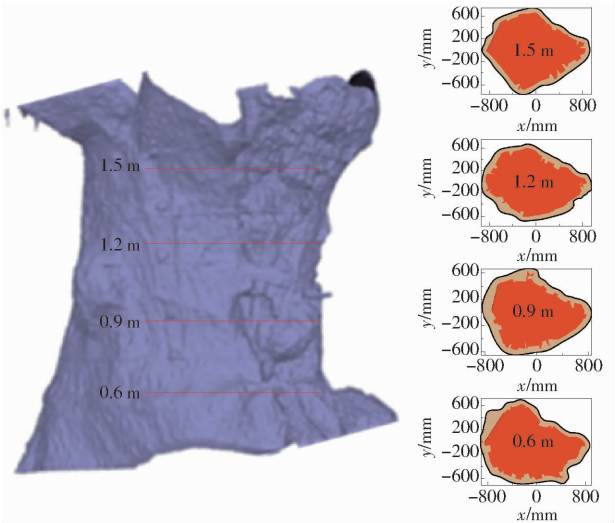


图 11 古柳 L03 检测结果
Fig. 11 Detection results of L03

在古柳进行复壮时,可以观察到其内部几乎全部为空洞,依靠铁质支架、陶粒等材料支撑,外部树皮残缺不全,需用假皮进行修复,缺陷情况非常严重。古柳复壮前和复壮的对比情况如图 13、14 所

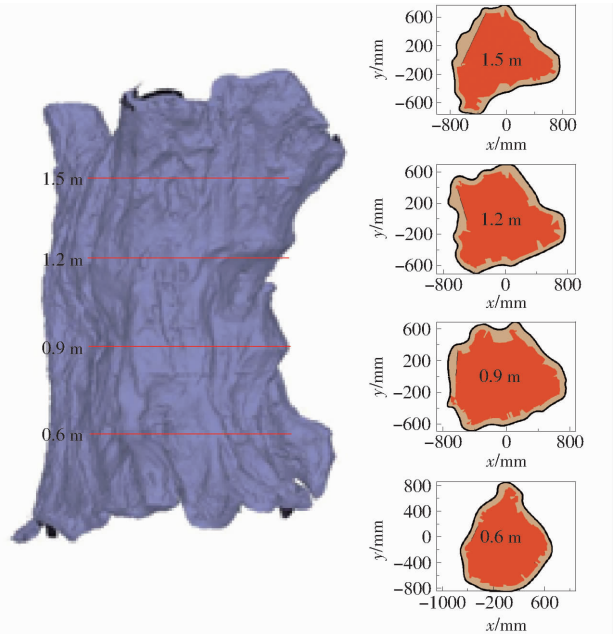


图 12 古柳 L05 检测结果
Fig. 12 Detection results of L05

示,复壮前树干内部缺陷情况无法直接观察到,但可以通过雷达波检测图像分析得到。通过比较雷达波可视化图像和复壮的古柳实际内部情况,验证了雷达波无损检测技术可以在完全不损害活立木外表的情况对内部缺陷进行准确检测和成像。



图 13 古柳 L03 修复前后对比
Fig. 13 Comparison of pre-repair and repair of L03



图 14 古柳 L05 修复前后对比
Fig. 14 Comparison of pre-repair and repair of L05

5 结论

(1)提出了活立木内部缺陷的绝对定位和分布表征方法,可应用于雷达波图像解析,并设计了基于雷达波的活立木内部结构缺陷分析软件,提高了检测精度和成像效果。

(2)针对活立木内部结构复杂、雷达波扫描图像解析困难等问题,采用振幅比估计法、希尔伯特积

分层算法确定缺陷相对位置,并结合外轮廓数据实现检测结果的绝对定位,重建活立木横截面图像可显示扫描横截面层位结构、健康木质和空洞缺陷等活立木内部结构特征。

(3)检测结果表明,雷达波绝对定位和分布表征方法对活立木内部结构及缺陷的准确检测具有有效性,可应用于活立木内部结构的无损检测,同时也适用于对建筑木构件等领域的快速准确检测。

参 考 文 献

- 1 HAGREY S A. Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity[J]. Journal of Experimental Botany,2007,58(4):839-854.
- 2 ZHANG H J, WANG X P, SU J. Experimental investigation of stress wave propagation in standing trees [J]. Holzforschung, 2011,65(5):743-748.
- 3 徐华东,徐国祺,王立海,等.原木横截面应力波传播时间等值线绘制及影响因素分析[J].林业科学,2014,50(4):95-100.
XU Huadong, XU Guoqi, WANG Lihai, et al. Construction of stress wave time isolines on log cross section and analysis of its effect factors[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014,50(4):95-100. (in Chinese)
- 4 房友盼,刘英,徐兆军,等.运用静态法与应力波法测定宽度对硬材弹性模量的影响[J].森林工程,2015,31(4):60-63.
FANG Youpan, LIU Ying, XU Zhaojun, et al. Width effect on the modulus of elasticity of hardwood lumber measured by static and stress wave methods[J]. Forest Engineering,2015,31(4):60-63. (in Chinese)
- 5 刘泽旭,王立海,鲍震宇,等.红松活立木内部腐朽程度的定量检测[J].东北林业大学学报,2015,43(6):89-92,106.
LIU Zexu, WANG Lihai, BAO Zhenyu, et al. Quantitative detection of internal decay degree in korean pine standing[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015,43(6):89-92,106. (in Chinese)
- 6 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/OL].农业机械学报,2016,47(3):335-341,327. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160347&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.047.
GE Zhedong, HOU Xiaopeng, LU Shouyin, et al. Wood CT detection system based on fast algorithm of inverse projection coordinate[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(3):335-341,327. (in Chinese)
- 7 戚玉涵,徐佳鹤,张星梅,等.基于扇形 X 射线束的立木 CT 成像系统[J].林业科学,2016,52(7):121-128.
QI Yuhan, XU Jiahe, ZHANG Xingmei, et al. CT imaging system for standing wood based on fan-shaped X-ray beam[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016,52(7):121-128. (in Chinese)
- 8 徐华东,王立海,宋世全.原木内部孔洞缺陷二维超声图像构建[J].林业科学,2014,50(8):126-130.
XU Huadong, WANG Lihai, SONG Shiquan. Two dimensional image construction of ultrasonic wave for detecting internal hole defect in log[J]. Scientia Silvae Sinicae,2014,50(8):126-130. (in Chinese)
- 9 曾祥,周晓军,杨辰龙,等.基于经验模态分解和 S 变换的缺陷超声回波检测方法[J/OL].农业机械学报,2016,47(11):414-420. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161156&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.056.
ZENG Xiang, ZHOU Xiaojun, YANG Chenlong, et al. Ultrasonic defect echoes identification based on empirical mode decomposition and S-transform[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(11):414-420. (in Chinese)
- 10 邸向辉,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].无损探测,2013,35(11):51-53.
DI Xianghui, WANG Lihai. Study on the feasibility about GPR applied on wood nondestructive testing[J]. NDE,2013,35(11):51-53. (in Chinese)
- 11 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 Houjiang, GUAN Cheng, WEN Jian. Applications and research development of nondestructive testing of wood based materials[J]. Journal of Forestry Engineering,2016,1(6):1-9. (in Chinese)
- 12 肖夏阳,文剑,高林,等.探地雷达识别树木内部缺陷层位技术的研究[J].林业机械与木工设备,2017,45(4):14-18,9.
XIAO Xiayang, WEN Jian, GAO Lin, et al. Research on internal defect layer identification of trees using ground penetrating radar[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2017,45(4):14-18,9. (in Chinese)
- 13 NUNEZ-NIETO X, SOLLA M, NOVO A, et al. Three-dimensional ground penetrating radar methodologies for the characterization and volumetric reconstruction of underground tunneling[J]. Computers and Chemical Engineering,2014,71:551-560.
- 14 WHITE J B, WIEGHAUS K T, KARTHIK M M, et al. Nondestructive testing methods for underwater tunnel linings: practical application at chesapeake channel tunnel[J]. Journal of Infrastructure Systems,2017,23(3):B4016011.
- 15 LYNNE B Y, HEASLER H, JAWOROWSKI C. Using ground penetrating radar, scanning electron microscopy and thermal infrared imagery to document near-surface hydrological changes in the old faithful Geyser area, Yellowstone National Park, U. S. A. [J]. Geothermics,2017,68:33-53.
- 16 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.
- 17 FU L, LIU S X, LIU L B. Internal structure characterization of living tree trunk cross-section using GPR: numerical example and field data analysis [C]// 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2014: 155 – 160.
- 18 刘星旦, 康永祥, 甘明旭, 等. 黄帝陵古侧柏树干心腐研究[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(2): 180 – 187.
LIU Xingdan, KANG Yongxiang, GAN Mingxu, et al. A study on trunk decay of ancient platycladusorientalis in tomb of yellow emperor[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(2): 180 – 187. (in Chinese)
- 19 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 Yongping, GAO Tian, LI Deshan, et al. Preliminary study on radar detection and imaging of cavities and cracks of Pinusmassoniana[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(3): 112 – 118. (in Chinese)
- 20 岳小泉, 王立海, 刘泽旭, 等. 不同含水率下利用电阻与应力波断层成像定量检测木材腐朽[J]. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2016, 45(5): 593 – 598.
YUE Xiaoquan, WANG Lihai, LIU Zexu, et al. Electrical resistance tomography and stress wave tomography to quantitatively detect wood decay under different moisture contents[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition*, 2016, 45(5): 593 – 598. (in Chinese)
- 21 TreeRadar. The TRU system[EB/OL]. [2016-07-27]. <http://www.treeradar.com>.
- 22 XIAO Z L, WEN J, GAO L, et al. Method of tree radar signal processing based on Curvelettransform[J]. *Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia*, 2016, 39(7): 243 – 250.
- 23 唐丽玉, 张浩, 黄洪宇, 等. 基于点云数据的树木三维重建方法改进[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 186 – 194. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170225&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.025.
TANG Liyu, ZHANG Hao, HUANG Hongyu, et al. Improved method for 3D reconstruction of tree model based on point cloud data[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 186 – 194. (in Chinese)
- 24 冯德山, 杨良勇, 王珣. 探地雷达 FDTD 数值模拟中不分裂卷积分完全匹配层对倏逝波的吸收效果研究[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(12): 4733 – 4746.
FENG Deshan, YANG Liangyong, WANG Xun. The unsplit convolutional perfectly matched layer absorption performance analysis of evanescent wave in GPR FDTD forward modeling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(12): 4733 – 4746. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 120 页)

- 16 张德胜, 石磊, 施卫东, 等. 轴流泵叶轮叶顶区空化流的数值模拟与实验研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(3): 335 – 342.
ZHANG Desheng, SHI Lei, SHI Weidong, et al. Numerical simulation and experimental study on impeller tip region [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(3): 335 – 342. (in Chinese)
- 17 卢加兴, 袁寿其, 任旭东, 等. 离心泵小流量工况不稳定空化特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 54 – 58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150809&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.009.
LU Jiaxing, YUAN Shouqi, REN Xudong, et al. Investigation of instabilities of cavitation at low flow rate of centrifugal pump [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 54 – 58. (in Chinese)
- 18 潘强, 施卫东, 张德胜. 鱼友好型轴流泵流场数值分析与汽蚀性能优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 15 – 21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160403&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.003.
PAN Qiang, SHI Weidong, ZHANG Desheng. Numerical analysis of flow field and cavitation performance optimization of fish-friendly axial-flow pump [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 15 – 21. (in Chinese)
- 19 LUO X W, JI B, TSUJIMOTO Y. A review of cavitation in hydraulic machinery [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2016, 28(3): 335 – 358.
- 20 王凡, 钱忠东, 郭志伟, 等. 可调导叶式轴流泵压力脉动数值分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 119 – 123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170315&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.015.
WANG Fan, QIAN Zhongdong, GUO Zhiwei, et al. Pressure oscillations prediction of axial flow pump with adjustable guide vanes [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 119 – 123. (in Chinese)
- 21 刘竹溪, 刘景植. 水泵及水泵站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 82.
- 22 张德胜, 石磊, 陈健, 等. 轴流泵叶轮叶顶区空化特性试验分析[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2016, 50(8): 1585 – 1592.
ZHANG Desheng, SHI Lei, CHEN Jian, et al. Experiment analysis on characteristic of cavitation in tip region of axial flow pump impeller [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2016, 50(8): 1585 – 1592. (in Chinese)
- 23 CHRISTOPHER S, KUMARASWAMY S. Identification of critical net positive suction head from noise and vibration in a radial flow pump for different leading edge profiles of the vane[J]. *ASME Journal of Fluid Engineering*, 2013, 135(12): 121301.