

探地雷达(GPR)在木材无损检测 应用中的可行性探讨

邸向辉^{1,2}, 王立海^{1,2}

(1. 东北林业大学 工程技术学院, 哈尔滨 150040;

2. 东北林业大学 黑龙江省森林持续经营与微生物工程重点实验室, 哈尔滨 150040)

摘要:简要地介绍了国外已有的树木雷达(TRU)系统,运用其基本原理进行了探地雷达(GPR)应用于木材无损检测的理论可行性分析。由于木材本身的复杂成分,因而其介电性质的影响因素很多,对采集到的电磁波进行客观地解释分析仍存在很大困难。笔者列举了探地雷达的处理、分析和解释的方法,指出若合理、选择性地进行树木雷达分析,可以比较科学准确地对内部腐朽、空洞等特征进行探测。

关键词:无损检测;探地雷达;树木雷达;木材

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)11-0051-04

Study on the Feasibility About GPR Applied on Wood Nondestructive Testing

DI Xiang-Hui^{1,2}, WANG Li-Hai^{1,2}

(1. College of Engineering and Technology, Northeast Forest University, Harbin 150040, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Forest Management and Environmental Microbiology, Northeast Forest University, Harbin 150040, China)

Abstract: At present the most promising nondestructive testing, geophysical survey techniques-Ground Penetrating Radar (GPR) system has been concerned and been researched widely. This paper carried on the theoretical analysis on it, and combined with the characteristics of wood, applying the ground penetrating radar in the nondestructive testing technology to wood non-destructive testing (NDT). At the same time, this paper briefly introduced the foreign existing tree radar unit (TRU) system, and aimed to apply the basic principle of GPR to make an analysis about theoretical feasibility that GPR applied to wood NDT. Because of complex components the wood itself holds, the dielectric properties are influenced by many factors, and then there still exist great difficulties in analyzing the collected electromagnetic wave objectively. But this article enumerates the GPR processing, analysis and interpretation methods, and it is to point out that if the plot of tree radar is analyzed reasonably and selectively, the inner decay and empty features description by GRP can be more scientific and accurate.

Keywords: Nondestructive testing; Ground penetrating radar; Trees radar; Wood

探地雷达^[1] (Ground Penetrating Radar, GPR),也称为表层穿透雷达(Surface Penetrating Radar, SPR)或称表层下雷达(Subsurface Radar, SSR)^[2]等,是近年来国际上新发展起来的地球物理探测技术,是极具应用前途的无损检测技术之一。GPR技术起源于1904年,德国人Hulsmeyer首次将电磁波信号应用于地下金属体的探测。1910年,

Leimback和Lowy以专利形式提出将雷达原理用于探地,正式提出了探地雷达的概念。20世纪70年代以来,商业化探地雷达系统先后问世,促进了探地雷达的发展与应用^[1-4]。国内在20世纪70年代初开始了对探地雷达的研究,并逐步应用在工程实践中^[4-5]。20世纪90年代初,随着研发水平的提高以及先进技术、先进仪器的引入,我国逐渐在工程地质勘查、质量检测、地雷探测、灾害地质调查、考古调查、资源勘探、无损评估/探测(NDE/NDT)等众多领域中广泛应用^[2,6]该技术。但是,从目前的GPR

收稿日期: 2013-01-12

作者简介: 邸向辉(1989—),男,硕士研究生,主要从事森林工程研究。

研究程度以及实际工程应用情况来看,探地雷达仍然存在很多问题。探地雷达采用中心频率为 1~1 000 MHz 的高频宽频带短脉冲电磁波^[1]探测地下或建筑物内的几何形态及几何特征。GPR 技术具有勘查精度高、无损性、连续性、费用低、检测快、约束少、操作简单、空间分辨力高、对目标敏感性强等优势^[2,7]。基于这些特点的 GPR 技术,近年来也引起了无损检测专家学者的广泛关注与研究。在 2009 年 J R Butnor^[8]等学者将 GPR 技术应用于松科活立木,并与阔叶树的检测效果进行了对比研究。特别是美国 TRU 公司开发研制的树木雷达(TRU)系统^[8]更是引起了高度的关注。

1 探地雷达基本原理

探地雷达系统基本组成有计算机、控制面板、发射电路、接收电路、发射天线、接收天线等,其框架图如图 1^[1]。GPR 技术利用高频宽频带电磁波,以脉冲形式通过发射天线定向地送入地下。电磁波在媒质传播过程中,遇到具有电性差异的地下目标体时会发生反射,由接收天线接收反射波后直接传输到接收机。信号在接收机经过整形和放大等处理后,传输到雷达主机。通过对接收的电磁波进行处理和分析,根据其波形、强度、双程走时等参数便可推断地下目标体的空间位置、结构、电性及几何形态,从而实现探测地下目标物^[2,9]。探地雷达的发射与接收天线之间距离小,可以合二为一。当地层的倾角不大时,反射波的全部路径几乎是垂直于地面。因此,在侧线不同位置上法线反射时间的变化就反映了地下地层的构造形态。探地雷达工作频率高,在地质介质中以位移电流为主,高频宽频带电磁波传播时很少出现频散,速度基本上决定于媒质的介电性质。应用 GPR 技术进行探测的前提是地下媒质之间具有电性差异,即介电常数和电导率不同。媒质间的电磁特性差异越大,媒质间的界面越容易识别。实际测量时,一般沿着检测线连续或密集采样,典型探地雷达波形如图 2 所示^[1]。

2 GPR 在木材 NDT 的应用理论

2.1 基本原理

根据美国 TRU 公司的树木雷达检测系统,GPR 技术应用于木材无损检测中的工作原理见图 3 和 4^[4]。TRU 公司研制的树木雷达(TRU)系统的设计,也是因为木材内部腐朽部分与健康部分存在

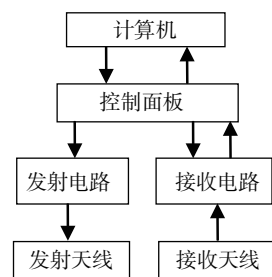


图1 探地雷达基本框架图

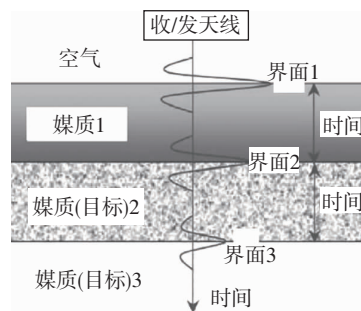


图2 探地雷达波形图

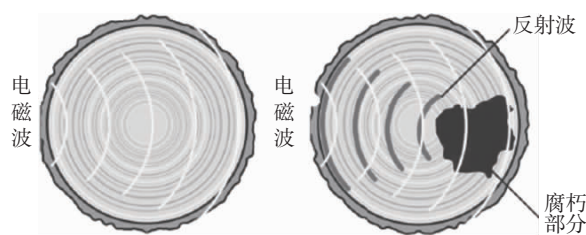


图3 健康木电磁波传播示意图

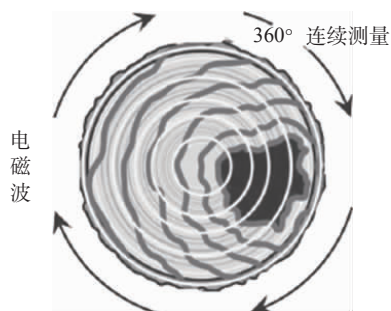


图4 腐朽木电磁波传播示意图

电性差异,所以接收天线能够接收到因界面差异而引起反射的回波,控制机记录反射时间 t ,电磁波在介质中的传播速度 v 为:

$$v = c/\epsilon_r^{1/2} \quad (1)$$

式中: c 为电磁波在真空中的传播速度,0.3 m/ns; ϵ_r 为媒质的介电常数。

利用电磁波在媒质中的传播速度和双程传播时间,可由下式推算出媒质界面的深度 h ^[9]:

$$h = v \times t / 2 \quad (2)$$

式中: v 为电磁波在介质中的传播速度; t 为控制机记录的反射时间。

探地雷达应用于木材无损检测时,不仅检测腐朽的有无,而且还应该检测腐朽目标的几何分布信息。为此,在将探地雷达应用于树木无损检测之前,必须先知道木材的介电参数^[10]。

2.2 数据采集

2.2.1 树木介电常数的测量

介电常数与木材的密度、结构取向、化学组成、温度、所加电压的频率有关。据相关文献^[10-13]了解,介电常数随着频率的增加而降低;随着温度增加而增加;沿着纹理方向的介电常数值比垂直方向的值高20%~50%,径向、切向、纵向的介电常数有很大差异;恒定含水率下,随密度增加而增加;随着含水率的提高也会有不同程度的增加。因此,在使用数据采集、分析处理前应该先了解木材的介电常数。为此含水率一定的木材可仿照探地雷达对地下媒质介电常数的测量方法,即已知目标深度法、点源反射体法、层状反射体法三种方法。此处简单介绍采用已知目标深度法来确定木材介电常数。

预先在规则的圆形木盘中心取一孔洞,已知目标深度 z 为:

$$z = (D_{\text{圆盘}} - d_{\text{孔洞}}) / 2 \quad (3)$$

式中: $D_{\text{圆盘}}$ 为圆盘直径; $d_{\text{孔洞}}$ 为孔洞直径。

将雷达移至孔洞径向木盘外侧,收发天线的间距近似为直线距离 l ,测量双程时间 t_0 ,根据下式即可得到木材的相对介电常数:

$$\epsilon_r = c^2 t_0^2 / (4z^2 + l^2) \quad (4)$$

应该明确的是,该测量计算值是在试验条件下的介电常数平均值。基于以上的多种因素影响木材的介电特性,其只能在一定范围内应用计算。由于木材的复合组分,可以综合考虑其内部组分的介电常数以及孔隙度的关系^[14],根据下式可推算求得木材的介电常数 ϵ_r 为^[15-16]:

$$\epsilon_r = [(1 - \phi) \cdot (\epsilon_p)^{0.5} + \phi \cdot S_w \cdot (\epsilon_w)^{0.5} + \phi \cdot (1 - S_w) \cdot (\epsilon_a)^{0.5}]^2 \quad (5)$$

式中: ϵ_p 为干燥木材的介电常数; ϵ_w 为水的介电常数; ϵ_a 为空气的介电常数; S_w 为木材中总的水分百分含量; ϕ 为木材总孔隙度。

2.2.2 树木雷达扫描

探地雷达的扫描方式大致有三种:A-scan、B-scan和C-scan^[2]。A-scan是位于平面内某一位置,

单通道一维数据采集,其信号反映不同位置的介质表面与介质内部目标的反射回波。B-scan是平面内沿某一方向移动连续扫描,二维数据采集。C-scan是在平面内沿多条平行的测量线完成对某区域的测量,可对介质内部形成立体全面的扫描,其中测量线指的是采集位置按照一定间隔连成的一条线。在测量方面,探地雷达的测量方法很多,有单点测量、共中心点测量、广角测量、连续剖面扫描测量和多天线的测量等^[2]。在TRU公司的树木雷达数据采集中使用的是C-scan、单点测量的方法进行树木内部情况扫描,扫描的现场如图5所示。试验室内扫描的腐朽木雷达如图6所示,实木余量扫描图如图7所示。图中阴影部分为实木未腐朽部分;阴影与空白的边界到中心点那条直线的部分为实木腐蚀部分。横坐标为圆周长,用两种度量方法来度量,第一排数据单位为($^\circ$)(取任意一点为初始点,记为 0° ,沿着原木周长方向旋转一圈即为 360°);第二排数据单位为cm,数据与各角度点对应。右纵坐标百分数表示将木材从中心处到树皮(即半径)等分100份,阴影部分表示未腐朽的实木部分距树皮的距离占半径长度的百分比。



图5 树木雷达扫描现场工作照片

2.3 数据处理、分析与解释

目前对雷达回波信号进行处理以识别地下目标体的主要手段包括图像识别和特征变量识别。前者是通过探地雷达二维或三维图像的处理^[16],获取地下目标体的几何特征,从而对其加以判别,处理结果一般由人工加以解释,含有较多主观因素;后者主要是利用探地雷达的回波信号进行特征变量的提取,借助神经网络完成目标的自动识别,特征变量的提取方法包括谱分析、连续子波变换和时频分析等^[1,2,18]。

在探地雷达的应用中,由于地下媒质的不均匀

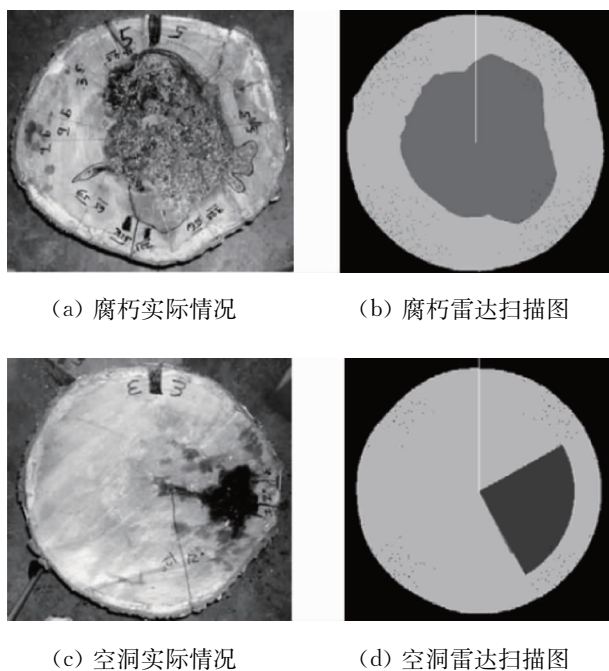


图6 腐朽、空洞实际情况与雷达扫描图

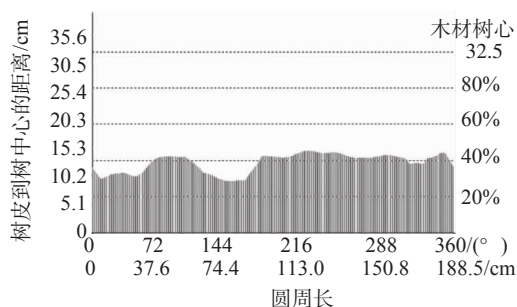


图7 整个圆周长的实木余量图

性和色散、干扰与杂波噪声等,对目标检测与属性的判别比较困难,是其应用的瓶颈,同样也给树木雷达对腐朽及空洞的判别增加了困难,因此探地雷达中的小波变换、神经网络、霍夫变换、能量统计等方法可应用到树木雷达图像的解释中,为结果的分析提供解析、解释的科学方法^[19]。

3 结论

(1) 探地雷达可以作为一种树木无损检测技术,具有检测无损快速、方便简单等特点。

(2) 由于木材与土壤同样具有不均匀性和色散,使得电磁波在健康木与腐朽、空洞界面处发生的损耗、反射等在波形上可明显识别,为木材内部情况的解释提供了直观形象的说明。

(3) 将探地雷达中数据处理、分析和解释的方法选择性地应用于树木雷达图的解释,能够更为准确地对腐朽、空洞等进行定位说明。

参考文献:

- [1] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社, 1994.
- [2] 栗毅,黄春琳,雷文太. 探地雷达理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [3] 韩波,丁亮,陈勇. 探地雷达无损检测方法评述[J]. 黑龙江大学自然科学学报,2011,28(5):608-617.
- [4] 张利军,鲁光银,朱自强. GPR 在桥梁质量无损检测中的应用[J]. 企业技术开发,2008,27(8):31-33.
- [5] 陈义群,肖柏勋. 论探地雷达现状与发展[J]. 工程地球物理学报,2005,2(2):149-155.
- [6] 侯俊胜. 探地雷达方法及其应用的新进展[J]. 国外地质勘探技术,1996(1):6-11.
- [7] 张红. 探地雷达的简述及在各领域中的应用[J]. 城市道桥与防洪,2012(7):355-357.
- [8] BUTNOR J R. Detecting defects in conifers with ground penetrating radar: applications and challenges [J]. NDT&E,2009(39):309-322.
- [9] 李梁,兰樟松,张炎孙. 探地雷达在大口径基桩无损检测中的应用[J]. 物探与化探,2000,24(6):474-476.
- [10] 阮锡根,余观夏. 木材物理学[M]. 北京:中国林业出版社,2005.
- [11] 周曼. 关于木材介电性质的研究[J]. 江苏林业科技, 1996,23(3):62-64.
- [12] 吴晔. 木材介电常数的研究[J]. 安徽农学院学报, 1989(1):59-74.
- [13] 李先泽. 射频下木材的介电性质[J]. 林业科学,1964, 9(3):233-244.
- [14] LUIGI S, LAURA V S, ALBERTO G. Ultrasonic, electric and radar measurements for living trees assessment[C]//Italy:Grugliasco,2003:10-18.
- [15] BIRCHKAK R, GARDNER CG, HIPPIE J E, et al. 1974; High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture[J]. Proc. IEEE, 1974 (62): 93-98.
- [16] TORGOVNIKOV G I. Dielectric properties of wood and wood-based materials[J]. Springer-Verlag, 1993 (15):196-201.
- [17] JAMEL B, SAMERL L, MOUNIR H, et al. GPR signal de-noising by discrete wavelet transform[J]. NDT&E International,2009(43):696-703.
- [18] 杨可,赵新生,赵钦. 探地雷达方法的原理及工作方法技术简介[J]. 西部探矿工程,2011(6):151-152.
- [19] 朱军涛,廖红建,谢勇勇,等. 采用短时傅里叶变换的铁路车载探地雷达数据解译方法[J]. 西安交通大学学报,2012,46(7):1-7.